



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

LA CONCENTRACION DEL OXIGENO DISUELTO EN  
LA CORROSION DE TUBERIA DE AGUA POTABLE

**TRABAJO ESCRITO**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A I  
ENRIQUE GASTON MARTINEZ ESPINOSA



MEXICO, D. F.

1992

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

LA CONCENTRACION DEL OXIGENO DISUELTO EN LA  
CORROSION DE TUBERIA DE AGUA POTABLE

INDICE GENERAL

CAPITULOS	PAGS.
INTRODUCCION .....	1
I      TEORIA DE LA CORROSION EN MEDIO ACUOSO .....	2
II     LA CONCENTRACION DEL OXIGENO DISUELTO .....	20
III    FACTORES QUE MODIFICAN EL EFECTO DEL OXIGENO DISUELTO .....	41
IV     CORROSION EN SISTEMAS DE TUBERIA .....	82
V      NORMAS PARA LA PREVENCION Y CONTROL DE LA CORROSION.....	123
VI     CONCLUSIONES .....	137
BIBLIOGRAFIA .....	142

## INTRODUCCION.

A pesar que la corrosión por el agua es bastante común y cuyos efectos podrían ser mucho menos espectaculares que aquellos producidos por otros fluidos, de cualquier manera el agua dulce o salobre es el medio corrosivo más generalizado dentro del servicio público e industrial.

El fenómeno de la corrosión es un problema difícil y complejo de analizar, debido al número de variables involucradas, representando uno de los agentes destructivos y de contaminación más serios que enfrenta el Ingeniero y que pueden causar problemas a la salud en el caso de agua potable. En el diseño de un sistema de tubería, el Ingeniero deberá no únicamente alcanzar los requerimientos de resistencia, sino que también evitar el serio deterioro del material como resultado de la exposición al medio. Con el objeto de efectuar esto, el deberá entender la naturaleza, el mecanismo, manifestación y control de la corrosión.

En el presente trabajo, se tiene como objetivo explicar dichos puntos aplicados a sistemas de tubería de acero de agua potable, esclareciendo el papel que desempeña el oxígeno disuelto como principal variable y enumerar consideraciones y métodos de control más generalizados, para su aplicación en el diseño y conservación de dichos sistemas.

Se realiza, una breve introducción al campo de la normatización, enlistando las normas existentes en el país que están relacionadas al tema, como una referencia en la materia.

## CAPITULO. I

### TEORIA DE LA CORROSION EN MEDIO ACUOSO

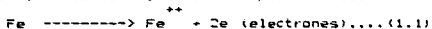
## CONTENIDO

### CAPITULO. I TEORIA DE LA CORROSION EN MEDIO ACUOSO

- 1.0 NATURALEZA Y MECANISMO DEL PROCESO CORROSIVO
  - 1.0.0. FORMACION DE CELDAS
    - 1.0.0.1. CAUSAS DE FORMACION DE CELDAS
      - 1.0.0.1.0. DOS METALES DIFERENTES EN CONTACTO
        - 1.0.0.1.1. TRATAMIENTO TERMICO DIFERENTE
        - 1.0.0.1.2. RASPADO O ABRASION
        - 1.0.0.1.3. DIFERENCIAS DE ESFUERZO
        - 1.0.0.1.4. DIFERENCIAS EN CONCENTRACION DE OXIGENO
        - 1.0.0.1.5. DIFERENCIAS EN TEMPERATURA
        - 1.0.0.1.6. DIFERENCIAS EN EL MOVIMIENTO DEL ELECTROLITO
  - 1.0.0.2. IMPORTANCIA DEL OXIGENO EN LA CORROSION
    - 1.0.0.2.0 ACCION PRIMARIA DEL OXIGENO DISUELTO
    - 1.0.0.2.1 ACCION SECUNDARIA
    - 1.0.0.2.2 PRODUCCION DE CAPAS PROTECTORAS DE INCRUSTACION
- 1.1 DIAGRAMA POTENCIAL-pH
  - 1.1.0 EL SISTEMA FIERRO-AGUA
    - 1.1.1 POTENCIALES
    - 1.1.1 INMUNIDAD Y PASIVIDAD DEL FIERRO
- 1.2 CARACTERISTICAS CINETICAS DEL PROCESO
  - 1.2.0 VELOCIDAD DE REACCION DE CORROSION
    - 1.2.0.0 CINETICA DEL OXIGENO DISUELTO
  - 1.2.1 FACTORES PRIMARIOS Y SECUNDARIOS

## 1.0 NATURALEZA Y MECANISMO DEL PROCESO CORROSIVO

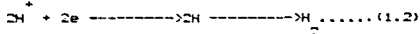
Una gran cantidad de estudios de corrosión, particularmente sobre los últimos treinta años, han demostrado que el proceso primario en la disolución de metales en agua es electroquímico en su naturaleza, el ataque es básicamente una reacción química acompañada por el pasaje de una corriente eléctrica. Para que esto ocurra una diferencia de potencial deberá existir entre una parte y otra de la estructura, mediante el establecimiento de una celda de corrosión formada por: un ánodo, un cátodo, un electrolito y un circuito eléctrico. La reacción primaria en la región que se encuentra al potencial más bajo, ánodo, es la disolución del metal en la forma de iones, como lo explica la ecuación siguiente.



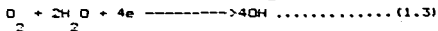
los electrones liberados migran a través del metal a la parte de más alto potencial, el cátodo, donde son utilizados en la reducción de cualquier ion u oxígeno. El efecto total es el pasaje de una corriente a través del circuito formado por el metal y la solución, los portadores de corriente vienen a ser los electrones en el metal y los iones disueltos en la solución. Cationes cargados positivamente tales como  $\text{H}^+$  y  $\text{Na}^+$  migran al cátodo y aniones tales como  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  al ánodo.

número de reacciones posibles en el cátodo

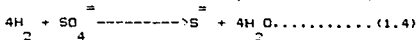
1) Reducción de hidrógeno.



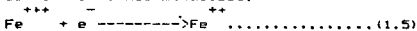
2) Reducción de oxígeno



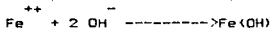
32 Reducción de sulfato (con ayuda de bacterias).



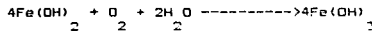
42 Reducción de iones metálicos.



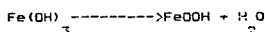
La reducción de oxígeno es la mayormente responsable de la corrosión de metales en aguas naturales, las cuales tienen una reacción aproximadamente neutral, es decir son ligeramente acidificantes o alcalinas. La corrosión en semejante medio es acompañada por la formación de producto sólido por interacción entre los productos anódicos y catódicos, por ejemplo :



Cuando la solubilidad del hidróxido ferroso es alcanzada, un producto blanco empezará a precipitar de la solución. En condiciones oxigenadas este será rápidamente oxidado para formar, primeramente, hidróxido férrico,



Este es inestable y subsecuentemente pierde agua para formar óxido ferrico hidratado,  $\text{FeOOH}$ , o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (óxido rojo)



1.0.0 Formación de celdas.

Refiriendose de nuevo a los elementos esenciales de las celdas de corrosión, además de contar con un ánodo y un electrólito (comúnmente llamado medio), un cátodo y circuito eléctrico, se deberá tener una o ambas condiciones siguientes: con el objeto de tener una diferencia de voltaje entre electrodos:

- (1). Los electrodos deberán ser diferentes, y/o
- (2).deberá existir diferencia en los medios que los rodean.



Cualquier condición producirá un voltaje; algunas veces las dos condiciones trabajando juntas producirán un voltaje más alto que el obtenido por alguna de ellas actuando sola; algunas veces trabajan en forma opuesta y el voltaje es menor del obtenido en forma separada.

#### 1.0.1 Causas de formación de celdas.

Corrosión causada por diferencias en electrodos.

##### 1.0.1.0 Dos metales diferentes en contacto.

Cuando los materiales que sirven como electrodos son bastante diferentes, como en el caso con dos metales ampliamente separados en la serie electroquímica, ellos producirán considerable voltaje y la corrosión puede ser rápida. La conexión de una tubería de cobre con una de acero que conduzca agua ilustra bien este caso.

Si los metales están cercanos en la serie electroquímica ellos desarrollarán un voltaje más pequeño y en algunos casos este no podrá ser suficiente para producir una corriente y no habrá corrosión. Algunas veces, el soldar una sección de tubería nueva con una línea vieja, puede provocar problemas, debido a que la sección reciente se convierte en ánodo y se corroe.

Otras veces, la escama de laminado formada en la superficie del tubo debido a su proceso de fabricación, actuará como si fuera un metal diferente formando una celda de corrosión.

##### 1.0.1.1 Tratamiento térmico diferente.

Si dos piezas, que de otra forma serían acero similar fueran conectados pero que uno es templado y el otro recocido, el templado será anódico al recocido.

#### 1.0.1.2 Raspado o abrasion.

Si una pieza de metal esta raspada o desgastada, el area raspada o desgastada sera anodica a la superficie alrededor de esta.

#### 1.0.1.3 Diferencias en esfuerzo.

Una superficie sometida a esfuerzo es usualmente anodica a una superficie que no lo esta. Cuando la boca de una llave para tubo incide sobre una superficie del tubo, esta area sujeta a tension sufrira corrosion, debido a que es anodica al resto del area circundante.

Corrosion causada por diferencia en electrolito.

En algunos casos la superficie puede estar uniforme en todos sus aspectos, no presentando areas catodicas o anodicas (aunque esto es raro) pero diferencias en el electrolito en contacto con el metal puede causar corrosion.

#### 1.0.1.4 Diferencias en concentracion de oxigeno.

La concentracion de oxigeno alrededor de los electrodos tiene una fuerte influencia sobre la corrosion. La area anodica es la que tiene la concentracion mas baja de oxigeno.

#### 1.0.1.5 Diferencial en temperatura.

Si la temperatura de una area de la superficie difiere de otra, la region de mas temperatura sera anodica al area fria.

#### 1.0.1.6 Diferencias en el movimiento del electrolito.

Si una tuberia esta sujeta a una variacion de la velocidad del electrolito, el area de la mas alta velocidad sera anodica.

## 1.0.2 Importancia del oxígeno en la corrosión.

### 1.0.2.0 Acción primaria del oxígeno disuelto.

Esta consiste en la formación de celdas de concentración y en la continuación de la aceleración de la disolución del hierro.

### 1.0.2.1 Acción secundaria del oxígeno.

tiene que ver con la remoción de la película de hidrógeno (despolarización) y la oxidación del hidróxido ferroso.

### 1.0.2.2 Productor de capas protectoras de incrustación.

cuando el hierro se disuelve en forma de iones (cuando se oxida), como está indicado en la ecuación 1.1, se forma los iones ferrosos, algunos de estos se combinarán con iones hidroxilo (OH<sup>-</sup>) que se encuentran en el agua para formar hidróxido ferroso, Fe(OH)<sub>2</sub>. Este es el depósito negro o verde junto al metal en corrosión. En una continua exposición a oxígeno y agua esto se convierte a hidróxido ferrico, Fe(OH)<sub>3</sub>.



El hidróxido ferrico es el herrumbre rojo el cual forma la capa más exterior. En suma a los hidróxidos de hierro, el herrumbre normalmente contiene compuestos formados de caliza, magnesio y sílice.

Los productos de corrosión pueden tener un importante comportamiento en corrosión ulterior del metal. Estos hidróxidos de hierro precipitados, usualmente llevan consigo caliza, magnesia y sílice junto con otros materiales insolubles en agua. estas sustancias pueden tener considerable influencia sobre la densidad y estructura del recubrimiento de herrumbre sobre la superficie.

metálica. Si el recubrimiento está flojo y no es adherente, podría acelerar la velocidad de corrosión, pero un recubrimiento denso y adherente puede formar una barrera efectiva y reducir materialmente la velocidad de corrosión.

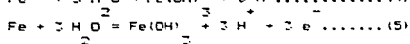
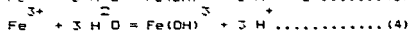
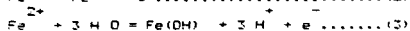
### 1.1 DIAGRAMA POTENCIAL-PH

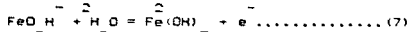
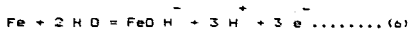
Todo metal sumergido en un medio acuoso sufre reacciones químicas y electroquímicas, debido a su inestabilidad termodinámica, que bajo condiciones de equilibrio representan reacciones dependientes del potencial y del pH. Las principales reacciones que se presentan en el cátodo y ánodo son respectivamente hidrógeno/oxígeno y la disolución del metal. Debido a la interacción de los productos de las reacciones anteriores, existen la formación de otros compuestos que son tomados en cuenta en la representación gráfica de la interacción metal-agua.

Esta representación en forma gráfica de todas las reacciones involucradas en este fenómeno se denominan diagramas de Pourbaix o de potencial-pH. Estos diagramas resultan útiles para describir las zonas de estabilidad termodinámica de cada especie involucrada en el sistema, estableciendo de esta manera las zonas de inmunidad, corrosión y pasividad.

#### 1.1.0. El Sistema Hierro-Agua

El diagrama completo para el sistema hierro-agua es muy complejo, ya que involucra muchos equilibrios, pero afortunadamente se puede obtener un diagrama simplificado y muy útil, a partir de la consideración de los siguientes equilibrios:





Las ecuaciones en equilibrio que dependen unicamente del pH o del potencial son representadas en forma de linea recta vertical u horizontal según sea el caso y las dependientes de los dos son lineas rectas con determinada pendiente.

1.1.1 Potenciales

Si el potencial del acero sumergido en agua potable ( pH de 7.0 ), es medido usando un electrodo de hidrogeno de referencia, se verá que adquiere un valor de aproximadamente -0.44 volts, que lo ubica en el diagrama de pourbaix en la zona de corrosión. Sin embargo esta conclusion sólo nos esta indicando de que existe la posibilidad de corrosion, pero no especifica velocidad o forma de corrosion. fig. 1.0 .

Potencial del oxígeno

El potencial debido a la presencia del oxígeno disuelto en el agua puede ser calculado a traves de la ecuación de Nernst, el potencial estandar de reduccion del oxígeno y la consideración de la reaccion de media celda  $\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^- = 4 \text{OH}^-$

$$E_{\text{O}_2} = E_{\text{O}_2}^{\circ} + (RT/4F) \ln (P_{\text{O}_2} / P^{\circ}) / a_{\text{OH}^-}$$

$$= 0.4 + 0.015 \text{ Log } (P_{\text{O}_2} / P^{\circ}) - 0.059 \text{ Log } a_{\text{OH}^-}$$

Recordando  $-\text{Log } a_{\text{OH}^-} = \text{pOH} = \text{pK}_w - \text{pH} = 14 - \text{pH}$  a 25 °C de donde

$$E_{\text{O}_2} = 0.4 + (14 \times 0.059) + 0.015 \text{ Log } (P_{\text{O}_2} / P^{\circ}) - 0.059 \text{ pH}$$

$$= 1.23 + 0.015 \text{ Log } (P_{\text{O}_2} / P^{\circ}) - 0.059 \text{ pH}$$

Para condiciones de aire atmosférico y agua de pH = 7 tenemos  $a_{\text{O}_2} = P_{\text{O}_2} / P^{\circ} = 0.2$  por lo tanto

$$E_{O_2} = + 1.23 + 0.015 \text{ Log } (0.2) - 0.059 (7.0)$$

$$E_{O_2} = + 0.8 \text{ V. EEH a } 25^\circ \text{ C}$$

Potencial del Hierro

Considerando una actividad para los iones hierro de  $a_{Fe^{++}} = 10^{-6}$ .

$$E_{Fe} = E_{Fe^{++}/Fe}^0 + 2.3 \frac{RT}{nF} \text{ Log } a_{Fe^{++}}$$

$$= - 0.44 + 1.98 \times 298/2 \times 96500 \text{ Log } (10^{-6} / 1)$$

$$= - 0.61 \text{ V EEH a } 25^\circ \text{ C}$$

Potencial de Corrosion.

Para que ocurra la corrosion de un metal en una solución acuosa se deberán presentar las siguientes condiciones :

- El potencial del metal se eleva hasta un valor de no equilibrio.
- El potencial del reactivo catódico debe ser más positivo que el potencial de equilibrio del metal.

De acuerdo a los resultados y a las condiciones mencionadas anteriormente se predice la existencia de corrosion.

$$E_{corr} = E_{O_2} - E_{Fe} = 0.8 - (-0.61) = 1.41 \text{ V EEH}$$

#### 1.1.1. Inmunidad y Pasivación del Hierro

Un examen del diagrama, se observara que existen tres maneras posibles de reducir la corrosion.

La primera consiste de alterar en forma sustancial el potencial en dirección negativa, de tal manera que se introduzca en el dominio de la inmunidad y semejante proceso es la convencional protección catódica.

La segunda sería que el potencial fuera cambiado en la dirección positiva para llevar hacia el dominio de la pasivación ,

tal proceso es denominado protección anódica.

Por último, el tercero sugiere el ajuste del pH del electrolito o agua, para obtener la pasivación, que se considera como una forma de inhibición, que está usualmente relacionada, más a aditivos complejos que modifican únicamente el pH.



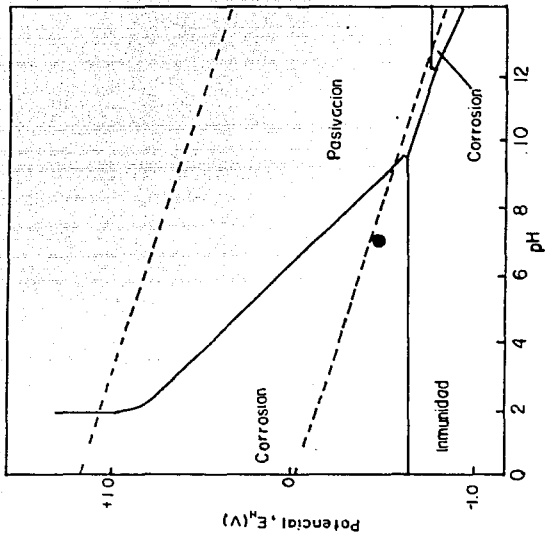


FIG.1.0 Diagrama potencial-pH del sistema Fe-H<sub>2</sub>O  
Ubicacion del potencial de corrosion del hierro

## 1.2 CARACTERISTICAS CINETICAS DEL PROCESO

Se deduce del mecanismo electroquímico de corrosión que las velocidades de las reacciones anódicas y catódicas son interdependientes y que una u otra pueden controlar la velocidad de la reacción de corrosión.

La reacción de desprendimiento de hidrógeno y la reacción de reducción de oxígeno son los dos procesos catódicos más importantes en la corrosión de metales, esto es debido al hecho de que los iones hidrógeno y las moléculas de agua están invariablemente presentes en la solución acuosa, y ya que la mayoría de estas se encuentran en contacto con la atmósfera, las moléculas de oxígeno disueltas estarán también presentes.

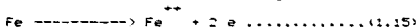
### 1.2.0 Velocidad de la Reacción de Corrosión.

En completa ausencia de oxígeno o de cualquier especie oxidante, la reacción de desprendimiento de hidrógeno (RDH) será el único proceso catódico posible y si la reacción anódica está poco polarizada, la velocidad se determinará por la cinética de la RDH en el metal bajo particular consideración (control catódico). No obstante, cuando el oxígeno disuelto está presente, ambas reacciones catódicas serán posibles y la velocidad de la reacción de corrosión dependerá sobre una variedad de factores, tales como: el potencial reversible del sistema metal-ión metálico, el pH de la solución, la concentración de oxígeno, la cinética de la RDH y la de la reacción de reducción de oxígeno en el metal bajo consideración, temperatura, etc. En general, la contribución hecha por la RDH aumentará en trascendencia con la disminución en el pH, pero esto también depende sobre la naturaleza del metal y

del óxido metálico.

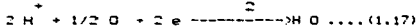
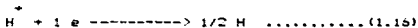
### 1.2.0.0 Cinética del Oxígeno disuelto.

De acuerdo a la teoría electroquímica, en las áreas anódicas de una superficie de hierro, la siguiente reacción tiene lugar :



La velocidad de esta reacción es dependiente de la velocidad de la reacción catódica, por consiguiente la velocidad de la corrosión esta catódicamente controlada.

Cualquiera de estas dos reacciones son típicas de las áreas catódicas :



La reacción (1.16) es bastante rápida en ácidos, pero muy lenta en medios alcalinos o neutros. Puede ser acelerada por el oxígeno disuelto como lo demuestra la reacción (1.17) en un proceso denominado despolarización. Se ha encontrado que la velocidad de corrosión en la mayoría de las aguas naturales está determinada por esta velocidad de despolarización en las áreas catódicas y, por lo tanto, por la velocidad a la cual el oxígeno disuelto alcanza estas porciones de superficie metálica. Por consiguiente, la velocidad de reacción catódica y por ende la velocidad de corrosión total para el caso o reacción (1.17), es proporcional a la velocidad de difusión del oxígeno a la superficie metálica. La velocidad de difusión, a su vez, es proporcional a la concentración de oxígeno disuelto en el medio acuoso.

A partir de estas consideraciones se deduce que, en general,

la reducción del oxígeno será más significativa que el desprendimiento de hidrógeno en soluciones casi neutras y que en este caso, el transporte del oxígeno a la superficie metálica será más importante que la transferencia electrónica controlada por activación. Un factor más importante es, que en soluciones casi neutras, los productos de corrosión sólidos serán termodinámicamente estables y afectarán la velocidad de corrosión, ya sea pasivando el metal o formando una barrera que impida el transporte del oxígeno a la superficie metálica. Por estas razones las velocidades de corrosión en soluciones ácidas son usualmente mucho más altas que en soluciones neutras.

#### 1.2.1 Factores Primarios y Secundarios.

Por otra parte, en cualquier discusión del mecanismo de una reacción química, es aconsejable separar los factores los cuales determinan la tendencia o fuerza motriz de la reacción para que se lleve a cabo, de aquellas las cuales influyen en la velocidad de la reacción, que se hace posible por la existencia de esta tendencia. Esta es una expresión del hecho de que el sistema no está en un estado de equilibrio (o estabilidad inherente), esto es medido por la diferencia en energía entre el estado inicial y final del sistema para cualquier caso en particular. En la mayoría de los casos la velocidad observada está determinada no por la magnitud absoluta de esta tendencia sino por otros factores, los cuales dependen principalmente sobre el medio.

Al considerar el grupo de las tres reacciones típicas involucradas en corrosión, indicaremos como factores primarios aquellos que determinan la tendencia del metal a corroerse y de

esta manera influyen en su velocidad inicial de disolución, y como factores secundarios aquellos que influyen en la velocidad de las reacciones subsiguientes. Este término en ninguna manera implica que estos factores secundarios son de menor importancia, en realidad, al influenciar la naturaleza y distribución de los productos finales de corrosión, ellos usualmente determinan la velocidad definitiva de corrosión y la vida útil del metal, en cada ambiente. En el caso general, uno o dos de los muchos factores implicados ejercen sobresaliente influencia sobre la velocidad definitiva de corrosión, a éstos se les denomina factores controladores o dominantes.

En general, los factores primarios tienen que ver con el metal (o aleación) en sí, los factores secundarios más con el medio en específico. Es conveniente dividirlos en esta forma, aunque ninguna distinción definida puede realizarse. En concordancia con esta base se enlistan algunos de los factores más importantes.

1. Factores asociados principalmente con el metal

- a. Potencial de electrodo de un metal en una solución
- b. Sobrepotencial de hidrógeno sobre el metal
- c. Homogeneidad química y física de la superficie metálica.
- d. Habilidad inherente para formar una película protectora insoluble.

2. Factores que varían principalmente con el medio

- a. Actividad del ion hidrógeno (pH) en solución
- b. Influencia del oxígeno en la solución adjunta al

metal.

- c. Naturaleza específica, concentración y distribución de otros iones en solución .
- d. Velocidad de flujo de la solución en contacto con el metal.
- e. Habilidad del medio para formar un depósito protector sobre el metal.
- f. Temperatura
- g. esfuerzos estáticos o cíclicos
- h. Contacto entre metales diferentes en composición

No se intenta enlistar estos factores en orden de su relativa importancia. Esto podría ser poco práctico debido a que bajo condiciones diversas, diferentes factores se convierten en dominantes. En los capítulos siguientes se analizan los puntos más importantes para el sistema de tuberías de agua potable.

## CAPITULO.II

### LA CONCENTRACION DEL OXIGENO DISUELTO

## CONTENIDO

### CAPITULO 11. LA CONCENTRACION DEL OXIGENO DISUELTUO

#### 2.0 PARAMETROS QUE LA DETERMINAN

##### 2.0.0 PRESION Y TEMPERATURA

#### 2.1 EFECTOS

##### 2.1.0 CON NINGUNA SAL MINERAL

###### 2.1.0.0 CON NINGUN CARBONATO MINERAL

##### 2.1.1 COMBINADO CON SALES DISUELTAS

###### 2.1.1.0 CON CARBONATOS MINERALES

###### 2.1.0.3 CON SALES DE CALCIO

##### 2.1.1 EN SISTEMAS CERRADOS

###### 2.1.1.0 EN TUBERIAS DE AGUA POTABLE

##### 2.1.2 EN FORMAS DE CORROSION

###### 2.1.2.0 PICADURAS BAJO CAPAS DE OXIDO DE FIERRO

###### 2.1.2.1 CORROSION EN HENDIDURAS

###### 2.1.2.2 TUBERCULIZACION

###### 2.1.2.3 CORROSION EROSION

###### 2.1.2.4 ATAQUE POR INCIDENCIA O IMPACTACION

#### 2.2 CONTROL

##### 2.2.0 CURVAS DE FRECUENCIA DE FUGAS

##### 2.2.1 GRAFICA DE ACONTECIMIENTO DE FUGA

##### 2.2.2 FRECUENCIA DE MONITOREO



### 2.0 PARAMETROS QUE LA DETERMINAN.

El Oxígeno gaseoso tal como existe en el aire, debe entrar en solución y alcanzar la superficie del metal antes de formar parte de las principales reacciones de corrosión. El oxígeno es transportado del aire al metal en tres pasos :

Paso 1. Disolución a partir de la atmósfera.

Paso 2. Convección del gas disuelto a partir de la superficie en contacto con el aire (natural o forzada), a través del cuerpo de la solución hacia la vecindad del metal.

Paso 3. Difusión a la superficie metálica través de la película estacionaria del líquido y de productos de corrosión que se encuentran junto al metal.

#### 2.0.0 Presión y Temperatura.

La velocidad a la cual el oxígeno gaseoso se disuelve del aire, está influenciada principalmente por la solubilidad del oxígeno. El grado de saturación de la solución y la cantidad de agitación de la superficie del agua. La solubilidad sigue la ley de Henry la cual establece que, cuando un gas y una solución en contacto entre sí, una vez alcanzada las condiciones de equilibrio, la concentración del gas en la solución a cualquier temperatura definida sería proporcional a la presión parcial del gas sobre la solución. Pero debido al hecho que el oxígeno es más soluble que los otros gases en el aire, sumara hasta 35% en volumen del total de los gases disueltos en el agua. La velocidad de disolución del oxígeno en cualquier instante, es proporcional a la diferencia entre la concentración de saturación y la

concentración real de la solución. De esta manera, será más alta cuando no hay oxígeno en la solución y cero cuando la solución está saturada con oxígeno. La velocidad de la disolución del oxígeno es más grande cuando el aire sobre la solución está seco que cuando está húmedo.

En general, La solubilidad total del oxígeno gaseoso es más grande en una solución fría que en una caliente. A una temperatura definida es directamente proporcional a la presión.  
Fig. 2.0 .

Una elevación en temperatura disminuye la solubilidad total del oxígeno gaseoso pero al mismo tiempo aumenta su coeficiente de velocidad de disolución (velocidad de disolución por unidad de volumen cuando la diferencia entre la concentración de saturación y la real es de 1.4 ppm). La importancia de este punto es indudable cuando es advertido que la velocidad de corrosión no alcanza un máximo en agua aireada bajo presión atmosférica, a más o menos 30 °C, aunque haya únicamente cerca de 2.8 ppm de oxígeno presente a esta temperatura. Acerca de este punto la disminución en solubilidad del oxígeno es el factor limitante. Cualquier grado de saturación ocurre, bajo igualdad de condiciones, en alrededor de una tercera parte del tiempo a 49 °C que la que se presenta a 0 °C. Un aumento en temperatura causa corrientes de convección y una disminución en viscosidad y ambas aceleran la difusión del oxígeno.

Ordinariamente, La velocidad a la cual el oxígeno disuelto es distribuido a través del líquido corrosivo por las corrientes de convección del paso 2 es tan grande, comparada con la de los pasos

1 y 3, que para vez controla la velocidad de corrosion

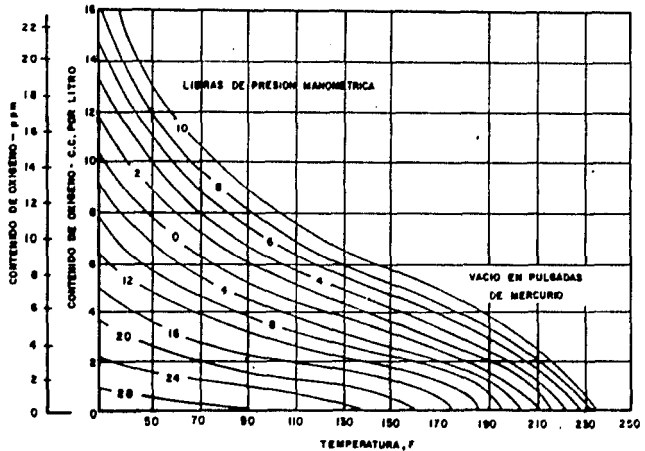


FIG. 20 SOLUBILIDAD DEL OXIGENO DISUELTO

## 2.1 EFECTOS.

El efecto de la concentración del oxígeno disuelto sobre la corrosión de tuberías de agua potable será de acuerdo al tipo de agua que conduzca, ya que se ha notado que las aguas blandas son más corrosivas que las aguas duras, debido a que estas últimas tienden a precipitar una capa insoluble, por ejemplo, de carbonato de calcio, particularmente sobre superficies catódicas de hierro en corrosión, la cual impide la difusión del oxígeno al metal. Se puede evitar si una agua será capaz de precipitar una capa superficial protectora, mediante su análisis y cálculo del índice de saturación.

### 2.1.0 Con Ninguna Sal Mineral

En la ausencia de minerales, aumentos de pH disminuyen la velocidad de corrosión para el agua que contiene oxígeno disuelto. No obstante, si el pH está cerca, pero no sobre el requerido para protección completa, ocurren picaduras, las cuales disminuyen rápidamente la vida útil del acero. Hendiduras en las uniones y soldaduras las cuales no permiten al oxígeno que sea mantenido en la superficie, están sujetas a ataque corrosivo local.

Las picaduras se llevan a cabo en puntos de corrosión no protegidos localmente: donde los productos de corrosión perturban la difusión del oxígeno a la superficie metálica y por lo tanto permiten diferencias en concentración de oxígeno en la superficie metálica. En forma similar las picaduras pueden ocurrir bajo depósitos de escombros. También diferencias en concentración de oxígeno, como en la línea de agua de superficies expuestas en

parte al aire y en parte al agua, causará picadura. La velocidad de corrosión aumenta con la temperatura.

#### 2.1.0.0 Ningun carbonato mineral con oxígeno presente.

En la ausencia de carbonatos minerales, aumentos de concentración de otros minerales comunes, como sales de cloruros y sulfatos, aumentan la velocidad de corrosión en todos los valores de pH abajo del rango del pH de picadura, y aumenta la picadura cuando el pH está un poco abajo del requerido para la protección en presencia de oxígeno disuelto. Aumentos en temperatura acelera la corrosión general y por picadura.

#### 2.1.1 Combinado Con Sales Disueltas

##### 2.1.1.0 Carbonatos minerales con oxígeno disuelto presente.

Los carbonatos minerales señalados por la determinación de alcalinidad para bicarbonatos, inhiben la corrosión, actuando en forma contraria a la aceleración en corrosión que producen las sales de cloruros y sulfatos en aguas que contienen oxígeno disuelto. En ausencia de calcio, esta inhibición es un máximo a un pH de 6.5 a 7.0 en concentraciones que se encuentran de 5 a 10 veces sobre la concentración de sales de cloruros y sulfatos y es un mínimo a un pH de 8 a 9. En concentraciones que disminuyen abajo de 5 veces de las de sales de cloruros y sulfatos, aumenta la velocidad de corrosión. Ya que casi todas las aguas de bebida naturales contienen carbonatos minerales y en forma adicional usualmente contienen sales de cloruros y sulfatos, esto también es un criterio en

clasificación.

2.1.1.1 Sales de Calcio con Oxígeno Disuelto presente.

A partir del punto de vista de corrosividad, la estabilidad como esta señalado por la saturación de carbonato de calcio, es el criterio más ampliamente aceptado en clasificación. No obstante, para acero al carbono desnudo una sobresaturación es muy importante que exista para formar un depósito blanco visible de carbonato de calcio; sin embargo este criterio no está libre de falla. Tiene limitaciones específicas:

1. Una alcalinidad mínima de 50 a 100 ppm (calculadas como carbonato de calcio) y aproximadamente un mínimo de 50 ppm de calcio (como carbonato de calcio) deben estar presente a temperaturas normales (32 a 160 F) para asegurar una pequeña ampliación en su vida útil.

2. Mientras más grandes sean las concentraciones de alcalinidad y calcio, más grande es la acción protectora del agua. Pero, tal aumento hacia las altas concentraciones son responsables por un incremento en la tendencia a depositar objetables cantidades de incrustación a temperaturas sobre las cuales, la estabilidad de saturación está establecida.

3. La acción protectora es intensificada por el movimiento del agua y disminuida por condiciones de casi estancamiento.

4. La acción protectora puede ser anulada a altas temperaturas cuando el pH está lo suficientemente alto para depositar hidróxido de magnesio no protector.

5. La picadura y tuberculación ocurrirán en presencia de

oxígeno disuelto si la estabilidad y velocidad están cercanas, pero aun abajo de la requerida para completa protección.

5. La acción protectora se ve disminuida por aumento de las proporciones de sales de cloruros y sulfatos sobre una relación de aproximadamente 0.1 o 0.2 a 1 con respecto a la alcalinidad. Esta limitación se convierte en menos importante en la ausencia de oxígeno disuelto.

#### 2.1.1 En Sistemas Cerrados

Para sistemas cerrados, el paso No.3 (difusión del oxígeno a la superficie metálica a través de película estacionaria) es el que controla el proceso de corrosión, debido a que ningún oxígeno se disuelve del aire y únicamente el ya presente en solución está disponible para llevar a cabo la corrosión.

##### 2.1.1.0 En Tuberías de Agua Potable

En tuberías de distribución que llevan agua potable, ha sido frecuentemente observado que la corrosión es más notable cerca de la entrada del sistema y decrece como el agua fluye a través de la línea. Esto fue lo que se encontró en 12 millas de tubería de acero de 5 pulgadas, donde el análisis del agua para el oxígeno disuelto en puntos diferentes mostraba una reducción desde 5.8 ppa en la entrada hasta trazas en un punto siete millas de distancia de la entrada de la misma. El ataque en el interior de la tubería de distribución se encontró que disminuye en proporción directa a la concentración del oxígeno disuelto. La reducción del oxígeno en tal caso es enteramente debido a la corrosión del metal.



### 2.1.2 En Formas de Corrosion

El oxígeno es un factor principal en la corrosión generalizada o uniforme del fierro sumergido en agua, pero en su ausencia a esto puede causar localización del ataque. Las formas más comunes son : Corrosion localizada o picado bajo las capas de óxido de fierro parcialmente protectoras que se encuentran sobre la superficie metálica, corrosión en hendiduras, tuberculización, corrosión erosión y ataque por incidencia o impactación.

#### 2.1.2.0 Picado Bajo Las Capas De Oxido De Fierro.

El ataque localizado llega a ocurrir sobre la superficie metálica cuando la capa producto de la corrosión presenta discontinuidades en su superficie, ya sea por rompimiento local y no recuperación de la misma o por deficiencias en su formación al no contar con elementos necesarios y por la presencia de otros. Por ejemplo, celdas de aeración causarán problemas en las capas, debido a que la deficiencia de oxígeno en ciertos puntos originan disminución de grosor e inestabilidad de las mismas, y por otra parte la presencia de iones cloruros en cierta concentración provocan defectos en la adherencia de este tipo de capas. Este hecho dejará áreas expuestas del sustrato metálico, que actuarán como ánodos y dada la relación de área catódica grande a área anódica pequeña y ya que la corriente anódica ( $I_a$ ) debe ser igual a la corriente catódica ( $I_c$ ), el efecto de la corrosión se concentrará en dichos puntos causando lo que se conoce como picado.

#### 2.1.2.1 Corrosion En Hendiduras.

El ataque localizado puede ocurrir en una hendidura debido al

acceso limitado del electrolito al área dentro de la hendidura. Esto resulta en la formación de una celda de concentración debido a diferencias en concentración de : sales y más comúnmente de oxígeno.

La hendidura puede originarse del contacto de un metal con otro, que puede ser otra pieza del mismo metal, otros metales o cualquier material no metálico. De esta manera, el ataque en hendiduras puede iniciarse en esquinas inaccesibles producidas por mal diseño o bajo materia extraña que se sedimenta en la superficie. Lo anterior puede ser material carbonoso que puede actuar como cátodo, pero más comúnmente es lodo o barro, arena, piedra, escoria y basura. Las hendiduras pueden ser formadas en las intersecciones de : los hilos de las cuerdas de los tubos, juntas, uniones roscadas y uniones remachadas.

#### 2.1.2.2 Tuberculización.

La tuberculización está estrechamente asociada con el picado del interior de tuberías de hierro y acero. El tubérculo consiste de un amontonamiento de productos de corrosión, que cubren áreas anódicas donde las picaduras se están desarrollando. Los tubérculos al principio aumentan su velocidad de penetración debajo de ellos, pero posteriormente, cuando se vuelven más impermeables, la velocidad de ataque puede ser grandemente reducida. Bastante a menudo la principal objeción a la tuberculización es el aumento en fricción y reducción del flujo, lo cual para tuberías de agua más pequeñas algunas veces resulta en taponamiento del sistema. Los esfuerzos por mantener la velocidad de flujo significan costos más altos de bombeo y.

finalmente, la limpieza de las tuberías es necesaria, seguida por la instalación de tratamiento del agua; operaciones las cuales cuestan mucho en tiempo y trabajo. Esta tuberculización a menudo ocurre en aguas blandas con un alto contenido de ácido carbónico, es decir alta alcalinidad en bicarbonatos.

Los tuberculos usualmente están formados de costra exterior dura de óxido ferrico hidratado café, con posiblemente un componente de carbonato de calcio y una capa interna de magnetita negra y ocasionalmente óxido verde. Esta costra físicamente separa la área anódica dentro de la picadura donde la solución es ligeramente ácida, independiente del pH del agua externa. Dentro del tuberculo la concentración del oxígeno es bastante reducida y es probable que sea cero. La acidez tiende a acelerar el ataque al proporcionar una reacción catódica secundaria, es decir, desprendimiento de hidrógeno. El hidrógeno formado de esta manera será, ya sea disuelto en el metal o difundido a través del producto hasta el seno del agua.

La ausencia de oxígeno debajo de tales tuberculos dará las condiciones anaeróbicas necesarias para que bacterias sulfato reductoras proliferen. De esta manera, aun si el ataque con desprendimiento de hidrógeno o reducción de oxígeno han sido parados, la corrosión podría continuar en presencia de bacterias sulfato reductoras.

Una forma de ataque inesperado podría llevarse a cabo en aguas corrientes que contienen cloruro de sodio y bicarbonato de calcio. Largas barbas huecas de 4 a 6 milésimas de pulgada de diametro son formadas y crecen a varias pulgadas de longitud en la

direccion del flujo. Estas podrian ser consideradas como tuberculos distorsionados en los cuales el fierro ferroso disuelto en la raiz de la barba, formando una picadura, se difunde a lo largo del tubulo y es oxidado al entrar en contacto con solucion oxigenada en la punta en crecimiento.

La bacteria del fierro son una causa mas de la tuberculizacion y taponamiento de tuberias. Ellas no toman parte en la reaccion de corrosion principal sino que utilizan fierro ferroso en su metabolismo y expelen fierro ferrico a traves de su membrana externa, causando la acumulacion de grandes cantidades de oxido ferrico hidratado. Tal accion podria dar problemas debido al "agua roja".

#### 2.1.2.3 Corrosion Erosion.

El efecto del movimiento de la solucion en la velocidad y forma de la corrosion es compleja, y sobre la base de consideraciones previas, la situacion puede ser resumida como sigue :

1. El aumento en la velocidad de flujo puede incrementar la velocidad de corrosion al llevar reactante catodico mas rapidamente a la superficie del metal, de esta manera disminuye la polarizacion catodica, y por remocion de iones metalicos tambien disminuye la polarizacion anodica.

2. El aumento en velocidad de flujo puede disminuir la velocidad de corrosion llevando el reactante catodico a la superficie, a una proporcion que excede la critica, por lo tanto estara causando pasivacion.

3. La disminucion en velocidad favoreceria todas las formas

de ataque localizado, en el cual una celda oculta esta implicada en el mecanismo, y tambien favoreceria la disolucion selectiva de aleaciones que son susceptibles a esta forma de ataque.

Ademas, el movimiento a velocidades apreciables puede resultar en otra forma de ataque, que es llevado a cabo por la accion conjunta de la erosion y la corrosion; de ahi el termino corrosion erosion, que incluye todas las formas de ataque acelerado, en el cual peliculas protectoras, y aun la superficie metalica en si, son removidas por la accion abrasiva del movimiento de un fluido liquido a alta velocidad. En general, mientras mas alta la velocidad mas abrasiva se vuelve la solucion.

#### 2.1.2.4 Ataque Por Incidencia o Impactacion.

El ataque por incidencia, como esta implicito en el nombre, es una corrosion erosion en la cual la solucion golpea la superficie metalica a una alta velocidad, siendo una situacion que puede ocurrir en cambios de direccion como son : codos, tes, cambios repentinos de seccion y en superficies de tubos en los cuales residuos o productos de corrosion se han acumulado. Asi en la mayoria de los casos de ataque por incidencia, una caracteristica geometrica del sistema resulta en turbulencia en una o mas partes de la superficie metalica, el ataque puede ocurrir de esta forma con una solucion que este libre de burbujas gaseosas o solidos suspendidos, pero este ataque es marcadamente acentuado cuando estos estan presentes.

## 2.2 CONTROL.

### 2.2.0 Curvas De Frecuencia De Fugas.

Es una generalización, pero sin embargo cierta, que las fugas en un sistema pueden predecirse (en número, no en lugar) por graficado del número acumulado de fugas vs. el tiempo, en una hoja semilogarítmica (fig. 2.1 a). El tiempo se encuentra en el eje X y las fugas acumuladas sobre el eje logarítmico Y. Este tipo de reporte es comúnmente usado al considerar líneas de tubería enterrada. Puede ser alarmante en sus implicaciones, ya que establece que las fugas aumentan logarítmicamente con el tiempo. Afortunadamente la ocurrencia de fugas pueden ser grandemente reducida o paradas completamente por una acción apropiada. Cuando esta es tomada, una nueva pendiente de la línea de fugas acumuladas da origen que revele una reducción marcada en la proporción de fugas acumuladas. La acción correctora podría ser cualquiera o todas las siguientes :

- . protección catódica
- . tratamiento químico
- . forro plástico
- . eliminación de entradas de aire (líneas siempre llenas)

### 2.2.1 Grafica De Acontecimiento de fuga.

Otra herramienta útil es simplemente graficar la localización y fecha de cada fuga sobre un mapa del sistema de conducción o distribución. La localización de puntos problemáticos o vulnerables rápidamente se vuelven evidentes con este tipo de análisis (fig. 2.1 b).

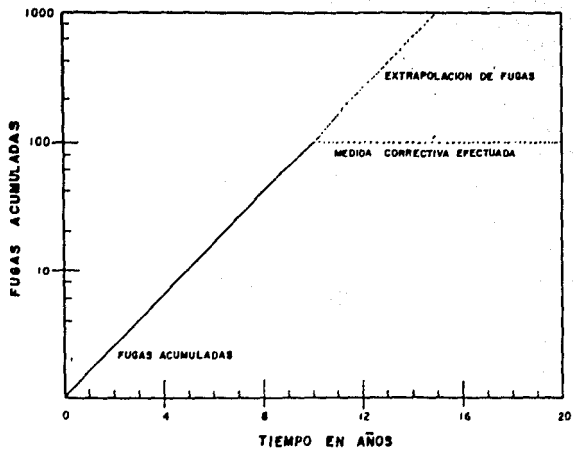
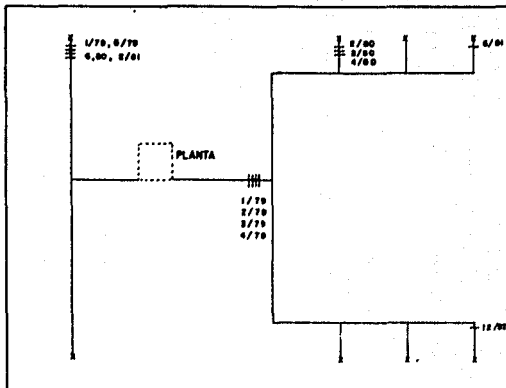


FIG. 2.1a REGISTRO ACUMULADO  
DE FUGAS



SISTEMA DE CONDUCCION DEL AGUA

FIG. 2.1b GRAFICA DE ACONTECIMIENTO DE FUGA



La lectura cuidadosa de estas graficas producen rapidamente la comprension de que son mas que banderitas o puntos que indican al administrador que accion es o no necesaria. Una vez que una grafica indica que accion es necesaria, analisis detallados deberan realizarse para determinar el proceder mas economico de accion. Tales alternativas de accion pueden ser evaluadas por proyeccion de sus beneficios en estas graficas y despues evaluar el costo por unidad de tiempo ganado contra otros cursos alternos de accion.

#### 2.2.2 Frecuencia De Monitoreo.

El tema de frecuencia de monitoreo ha generado mas discusion, que el hecho debido a la carencia de entendimiento de los principios basicos. Se presenta una aproximacion desde el punto de vista de ingenieria para frecuencia de monitoreo que disipa mucho el misterio. Los puntos claves para entender el tema son :

(a). El monitoreo es un seguro contra accidentes. Simplemente monitoreamos para descubrir el principio de problemas antes de que se conviertan agudos o criticos. De este modo el costo de no monitorear se mantendra en el riesgo de la aparicion del problema, el cual puede ser una fuga o una perdida de presion que origina un corte de suministro.

(b). El monitoreo es mas eficaz cuando es efectuado en gran parte ( o enteramente) por el operador.

(c). El monitoreo para ser eficaz en su costo, debera descubrir el acontecimiento del problema con suficiente

anticipación, que permita una acción correctiva antes que el daño o la pérdida ocurrida se vuelva importante.

(d). El control eficaz de un sistema requiere trabajo de equipo (operador, personal de monitoreo, supervisor y personal de mantenimiento).

(e). El secreto para entender la frecuencia de monitoreo es el reconocer que el daño para un sistema, cuenta desde el momento del inicio del mecanismo causal, hasta mas alla del tiempo de detección por monitoreo, ya que este no se para hasta que una eficaz acción corregida es ejecutada por mantenimiento.

La figura 2.2 ilustra el problema de frecuencia de monitoreo con control de corrosión. Simplemente se establece que mientras mas estable es el sistema, menor es la frecuencia que necesitamos monitorear dicho sistema. La lección a ser aprendida de esta gráfica, es que cualquier cosa que el operador pueda hacer para detectar, prevenir y/o corregir problemas aumentara el intervalo de tiempo necesario entre pruebas de monitoreo, hasta el grado de que el operador sea eficaz en el control del problema.

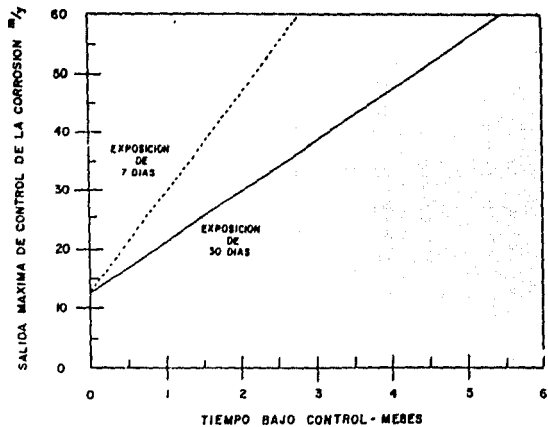


FIG. 2.2 FRECUENCIA DE MONITOREO-CORROSION

### CAPITULO.III

#### FACTORES QUE MODIFICAN EL EFECTO DEL OD.

## CONTENIDO

### CAPITULO III. FACTORES QUE MODIFICAN EL EFECTO DEL O.D.

#### 3.0 MATERIAL EMPLEADO EN TUBERIA

##### 3.0.0 COMPOSICION DEL ACERO

##### 3.0.1 CONDICION DE SUPERFICIE

##### 3.0.2 HECHOS ESTABLECIDOS DE LA CORROSION DEL ACERO

##### 3.0.3 VELOCIDADES DE CORROSION DEL FIERRO Y EL ACERO

#### 3.1 CALIDAD DEL AGUA

##### 3.1.0 PRINCIPALES COMPONENTES DEL AGUA

##### 3.1.0.0 SOLIDOS DISUELTOS TOTALES

##### 3.1.0.1 CLORUROS Y SULFATOS

##### 3.1.0.2 CARBONATOS Y BICARBONATOS

##### 3.1.0.3 COMPONENTES INORGANICOS MENORES

##### 3.1.0.4 NITROGENO

##### 3.1.0.5 OXIGENO

##### 3.1.0.6 DIOXIDO DE CARBONO

##### 3.1.0.7 MATERIA ORGANICA

##### 3.1.0.8 CONCENTRACION DE IONES HIDROGENO (pH)

##### 3.1.1 TECNICA DE LABORATORIO PARA pH EN AGUAS QUE NO SE ENCUENTRAN EN EQUILIBRIO CON LA ATMOSFERA

##### 3.1.1.0 INFLUENCIA DEL DIOXIDO DE CARBONO ATMOSFERICO

##### 3.1.1.1 INFLUENCIA DE OTROS FACTORES QUIMICOS

##### 3.1.1.2 PROCEDIMIENTO RECOMENDADO

##### 3.1.1.3 RESUMEN

##### 3.1.2 TENDENCIA CORROSIVA DEL AGUA

##### 3.1.2.0 EQUILIBRIO DEL BICARBONATO

3.1.2.1 ALCALINIDAD Y DUREZA

3.1.2.2 INDICE DE LANGELIER E INCRUSTACION

3.1.3 MECANISMO DEL PROCESO DE INCRUSTACION

3.2 CONDICIONES DE OPERACION

3.2.0 TEMPERATURA

3.2.1 VELOCIDAD DE FLUJO

3.2.2 DISEÑO

### 3.0 MATERIAL EMPLEADO EN TUBERIAS.

El hierro y el acero desnudos están sujetos a oxidación en la mayoría de los ambientes, pero la magnitud de la corrosión depende sobre un gran número de factores, siendo los más importantes : la composición y condición de la superficie metálica, el ambiente corrosivo en si y las condiciones locales.

#### 3.0.0 Composición del Acero.

Con respecto a la composición, los metales ferrosos caen dentro de tres amplias categorías :

1. Ordinarios fierros fundidos, forjados y aceros, a los cuales ningún elemento aleante se les ha agregado, y son vulnerables a la corrosión.

2. Aceros de baja aleación, los cuales contienen aproximadamente 2 a 3 % de elementos aleantes, comunmente cobre, cromo y níquel. Estos aceros aun se oxidan, pero bajo, ciertas condiciones, el óxido formado llega a ser adherente y protector de tal forma que la velocidad de corrosión llega a varias veces menor de rápida que con los aceros ordinarios mencionados anteriormente. Estos aceros son a menudo llamados aceros interperizados.

3. Aceros inoxidables, los cuales contienen altos porcentajes de elementos aleantes, como por ejemplo 18 % de cromo, 8 % de níquel y 3 % de molibdeno. Aceros de este tipo son practicamente inmunes a la corrosión en circunstancias apropiadas.

En el caso que discutimos (No. 1), es el material más bajo en resistencia a la corrosión de todos los tipos de compuestos del hierro empleados en tuberías, por lo que, se deberán tomar todas precauciones posibles para evitar el deterioro

rápido del material.

Generalmente, el proceso de manufactura no tiene apreciable efecto en las características de corrosión del acero. Ligeras variaciones en composición, que inevitablemente ocurren de lote a lote en aceros de la misma calidad, tiene poco efecto.

### 3.0.1 Condición de Superficie.

Los aceros son fabricados a partir de una mezcla de fierro de primera fundición y de la de desecho, la cual es tratada en el estado fundido para remover el exceso de carbono y otras impurezas. El acero podría ser fundido continuamente en corchones o fundirse en lingotes individuales. El producto final es entonces obtenido por laminado, templeado o forjado. Durante el laminado en caliente y forjado, la superficie del acero es oxidada por el aire y la escama producida, usualmente denominada escama de laminado, que podría tener una importante influencia en la corrosión del acero, como se discutirá enseguida.

La estructura de la escama consiste de tres capas sobrepuestas de óxidos de fierro en progresivos estados de oxidación partiendo desde el lado metálico hacia el exterior, es decir óxido ferroso ( $FeO$ ) en el interior, Magnetita ( $Fe_3O_4$ ) en la parte media y óxido férrico ( $Fe_2O_3$ ) en el lado externo. Las partes relativas de los tres óxidos varían con las temperaturas de laminado. Una escama típica en una placa de acero dulce de 9.5 mm podría ser aproximadamente de 50  $\mu$ m de espesor y puede contener 70% de óxido ferroso, 20% de magnetita y 10% de óxido férrico.

Si la escama fuera perfectamente adherente, continua e impermeable, formaría un buen recubrimiento protector, pero en la



practica la escama pronto se agrieta y se descascara. En agua, severa picadura en el acero podria Ocurrir, si grandes cantidades de escamaa están presentes en la superficie.

La condicion de la superficie del acero respecto al tiempo de exposicion, es de gran importancia de cualquier manera. Esto es debido a que muchas aguas naturales son buenos electrolitos, de modo que hay suficiente oportunidad para corrosión electrolitica cuando el acero está permanentemente en contacto con estas. La presencia de escamas de laminado en la superficie es mas peligroso, por ejemplo, cuando el acero está sumergido en agua, que cuando está expuesto al aire, por la celda galvanica formada por la escama de laminación y el acero desnudo, que puede operar mucho mas libremente bajo esta condicion.

### 3.0.2 Hechos Establecidos de la Corrosión del Fierro y el Acero.

A continuacion se enlistan algunos hechos observados en el comportamiento del fierro y el acero en medio acuoso.

1. La presencia de oxigeno es usualmente esencial para que la corrosión severa tenga lugar en agua a temperatura ambiente. El oxigeno disuelto solo acelerará grandemente la corrosión en : agua acida, neutra o ligeramente alcalina. En aguas naturales, la velocidad de corrosión es casi directamente proporcional a la concentracion de oxigeno si otros factores no cambian.

2. Los productos de corrosión consisten, principalmente, de hidróxido ferroso negro o verde junto al metal. Hidroxido ferrico (herrumbre) café rojizo, el cual forma la capa mas exterior, con mezclas graduales entre si. Cuando el fierro se corroe en la

atmosfera, la cantidad de herrumbre ferrosa producido es pequeña, pero cuando es formado bajo el agua los productos de corrosión, a menudo contienen una gran proporción de hierro ferroso.

3. En agua natural, el herrumbre precipitado usualmente lleva algunos compuestos que contienen carbonatos de calcio y magnesio además de sílice junto con otros materiales insolubles en el agua. Estas sustancias tienen considerable influencia en la estructura y densidad de el recubrimiento del herrumbre en la superficie metálica. Un flojo recubrimiento no adherente bajo condiciones no ordinarias, podría acelerar localmente la velocidad de corrosión; un recubrimiento adherente y uniformemente denso podría formar una barrera efectiva y reducir la velocidad de corrosión muy considerablemente.

4. La corrosión a temperatura normal en soluciones de sales diluidas, a menudo aumenta con incrementos de concentración de muchas sales neutras, particularmente cloruros, pero decrece de nuevo en soluciones más concentradas permaneciendo las otras especies igual.

### 3.0.3 Velocidades de Corrosión del hierro y el acero.

Todos los materiales estructurales ferrosos ordinarios, aceros templados, aceros de baja aleación y aceros forjados se corroen virtualmente a la misma velocidad, cuando se sumergen totalmente en aguas naturales. Será bastante obvio que, la utilización de velocidades de corrosión para el acero en aguas naturales puede ser peligroso, si las condiciones no son completamente apreciadas o incluídas. Muy poco acero se utiliza sin alguna protección, pero se ha apreciado corrosión entre el

periodo de rompimiento de la protección y su reparación. La velocidad usualmente cae con el tiempo, debido a la acción restrictiva del producto e incrustación depositada. En agua blanda estancada la velocidad podría ser de 15 a 20 mdd (mg/dm<sup>2</sup> día) mientras en aguas duras el valor podría ser tan bajo como 2.5 mdd. Las velocidades de corrosión aumentan con el movimiento, por ejemplo a 0.5 pies/seg (2 m/s) la velocidad promedio de corrosión es aproximadamente de 25 mpv (milesimas de pulgadas por año) y a 33 pies/seg (10 m/s) aproximadamente 70 mpv (384 mdd).

El fierro y sus aleaciones exhiben dos tipos enteramente diferentes de comportamiento corrosivo, de acuerdo a si ellos están en estado activo o pasivo. En el estado activo o corrosivo, la velocidad de ataque varia entre límites amplios de acuerdo al medio, y podría ser muy alta. En el estado pasivo la velocidad de corrosión es muy pequeña. En aguas naturales bajo condiciones prácticas, el fierro y el acero se encuentran rara vez en el estado pasivo, debido a que una gran concentración de oxígeno o un gran suministro del mismo a la superficie metálica se requiere, con el fin de mantener la tenue película de óxido en un permanente estado de reparación. En aguas naturales aeradas, la reducción de oxígeno es la reacción primaria predominante del cátodo. Como fue descrito, los productos formados son: óxidos ferricos hidratados y magnetita. Ninguno de estos productos del ataque poseen notable influencia restrictiva sobre los procesos electroquímicos; su adhesión a la superficie y su acción protectora son mucho más débiles de los ofrecidos por el carbonato de calcio. De esta manera, la corrosión del fierro en agua destilada y aguas blandas,

no decrece apreciablemente con el tiempo.

### 3.1 CALIDAD DEL AGUA.

Químicamente el término "agua" se aplica a un compuesto de hidrógeno y oxígeno el cual existe a temperatura ordinaria en estado líquido. Sin embargo, ya que esta es un excelente solvente, las aguas naturales siempre contiene varias cantidades de materiales disueltos, ya sean de la atmósfera o de la tierra a través de la cual se filtra. Los componentes en las aguas naturales o tratadas, los cuales son importantes para el Ingeniero en corrosión, difieren de aquellos que son importantes para el Ingeniero hidráulico responsable del suministro público. Las aguas convenientes para consumo humano deberán ser agradables y no tóxicas, mientras que, para propósitos de lavandería cuanto mas suave sea el agua mas favorable se le considera. De cualquier manera, las aguas utilizadas en la industria muestran una mucho mas amplia variación en composición y propiedades.

El agua utilizada en la planta industrial esta dictada por situación geografica y consideraciones economicas, y la fuente de suministro es seleccionada de aquella que da el volumen requerido al mas bajo costo. De este modo es a menudo necesario usar una agua barata, la cual es agresiva desde un punto de vista de corrosión, en preferencia a un suministro publico, el cual es mas caro. El agua de mar y las aguas salobres de estuarios contaminados son a menudo usadas cuando estan disponibles fácilmente. Aun cuando una agua dura no corrosiva esté disponible, por razones técnicas procedimientos tales como el ablandamiento o purificación, el cual aumenta la corrosividad del agua, podrían ser necesarios.

Consecuentemente el Ingeniero en corrosión deberá valorar la calidad de una agua a partir de un punto de vista enteramente diferente. La cantidad y naturaleza de los sólidos disueltos, gases y contaminantes son extremadamente importantes, pero únicamente algunas bacterias son de alguna importancia.

Para hacer cualquier evaluación de la probable acción corrosiva de una agua en una instalación industrial, es esencial tener adecuado conocimiento de las propiedades físicas y químicas del agua. No únicamente deberán ser conocidos los factores tales como temperatura y velocidad de flujo, sino también los importantes componentes disueltos en el agua, la manera en la cual ellos están probablemente variando durante el procesamiento y, más importante, maneras posibles en las cuales la calidad del agua pueda ser económicamente mejorada para hacer reducir la corrosión a un mínimo. La posible influencia directa o secundaria de la contaminación y la presencia de varios microorganismos deberán también tomarse en cuenta.

### 3.1.0 Principales Componentes del agua.

#### Sales Disueltas.

Los principales iones presentes en aguas naturales son cationes cargados positivamente, tales como calcio,  $Ca^{++}$ , magnesio,  $Mg^{++}$ , sodio,  $Na^+$ , e hidrógeno  $H^+$  y aniones cargados negativamente tales como cloruros,  $Cl^-$ , sulfato,  $SO_4^{--}$ , bicarbonato,  $HCO_3^-$ , carbonato,  $CO_3^{--}$ , e hidróxidos,  $OH^-$ . Ya que la carga eléctrica total de los cationes está balanceada por la de los aniones, el agua no posee carga eléctrica neta y puede ser considerada como una solución de un número de sales. las sales

disueltas se subdividen en :

### 3.1.0.0 Sólidos disueltos totales.

Abreviado SDT, pueden determinarse directamente por evaporación a sequedad, el secado final usualmente es llevado a cabo a 180 C, o estimado a un grado suficiente de precisión a partir de la conductividad eléctrica del agua. Los sólidos disueltos totales, en ppm, está cercano a un quinceavo (1/15) de la conductividad, en Ohm<sup>-1</sup>.

#### 3.1.0.1 Cloruros y sulfatos.

Estas sales forman la mayor parte de las sales corrosivas presentes en el agua. En general la cantidad de cloruro disuelto es mas grande que la cantidad de sulfato y unicamente en ciertas aguas mineralizadas es el sulfato predominante. El cloruro es a menudo tomado como un indice del potencial corrosivo del agua. Varía sobre muy amplios límites realmente, desde trazas encontradas en agua de lluvia no contaminada, hasta las altas concentraciones encontradas en agua de mar.

#### 3.1.0.2 Carbonatos y bicarbonatos.

Estos constituyen la mayor parte de las sales disueltas en aguas naturales. Estan estrechamente vinculadas con el dióxido de carbono y el contenido de calcio en el agua.

Los carbonatos normales son raramente encontrados en aguas naturales, sino que bicarbonato de sodio se encuentran en algunos suministros subterráneos. El bicarbonato de calcio es el más importante, pero el bicarbonato de magnesio puede estar presente en cantidades mas pequeñas; en general puede considerarse que tiene propiedades similares a aquellas del compuesto de calcio.

excepto que en la descomposición por calor este deposita hidróxido de magnesio, mientras que el bicarbonato de calcio precipita carbonato. El carbonato de calcio tiene propiedades de inhibición que tienden a limitar el ataque corrosivo por medio de tenues capas superficiales depositadas en la superficie metálica.

### 3.1.0.3 Componentes Inorgánicos Menores.

Entre los componentes inorgánicos menores presentes tenemos, sílice y trazas de ciertos metales pesados, lo cual es indicativo de la naturaleza corrosiva del agua o de su toxicidad.

1) Sílice. Como un resultado de la desintegración de rocas y de la derivación de microorganismos, particularmente diatomeas, el sílice se encuentra a menudo en aguas como ácido metasilícico ( $H_2SiO_3$ ). La concentración varía en las aguas naturales desde trazas hasta 75 ppm de  $SiO_2$ , pero la cantidad está usualmente en el rango de 5 a 30 ppa.

Los silicatos tienen ciertas propiedades inhibitorias y son agregados a las aguas blandas para reducir la corrosión y son usados como agentes para tratamiento en calentadores a baja presión. En equipos de alta presión de vapor el sílice es indeseable debido a que, aun a pequeñas concentraciones se forman incrustaciones duras en los calentadores, y a través del arrastre en el vapor, en las hojas de la turbina.

1) Hierro. El hierro se encuentra algunas veces presente, a menudo como carbonato ferroso en concentraciones hasta de 20 ppm. Estando en contacto con el aire este se oxida y como óxido precipita. Esta agua roja causa manchas desagradables y convierte al agua en inadecuada para su uso doméstico y muchos usos



industriales. El fierro llega a convertirse en una molestia aproximadamente de 0.2 a 0.3 ppm y cantidades mas grandes generalmente se tienen que eliminar. Estas aguas ferruginosas son indicativas de una agua agresiva que contiene cantidades mas grandes de dióxido de carbono que lo usual.

iii) Cobre. El cobre normalmente no se encuentra en aguas naturales y cuando se presenta en aguas de llave de grifo es usualmente derivado de las tuberías de cobre y tanques de almacenamiento. Cantidades muy pequeñas son capaces de estimular ataque en: el aluminio, en menor intensidad en el zinc y en algun grado en el fierro.

iv) Plomo. El plomo está raramente presente en el agua cruda original, pero puede originarse de la corrosión de tuberías de plomo. Es un veneno de efecto acumulativo y no deberá estar presente en cantidades mayores a 0.1 ppm.

v) Zinc. El zinc algunas veces está presente debido a la corrosión de fierro galvanizado.

#### Gases Disueltos.

En su pasaje a través del aire, el agua disuelve nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono, y en atmósferas contaminadas, pequeñas cantidades de ácido sulfhídrico, dióxido de azufre y amoníaco, además, cantidades de gases derivados de la putrefacción de vegetación que es disuelta durante el pasaje a través de la tierra.

#### 3.1.0.4 Nitrogeno

El contenido de nitrogeno del agua tiene poco efecto directo en la reacción de corrosión, pero burbujas de

gas pueden dar origen al ataque por impaccion o cavitacion.

#### 3.1.0.5 Oxigeno.

La mayoría de los suministros publicos estan bien oxigenados, con un contenido de oxigeno de 2 a 8 ppm a temperaturas ordinarias. La solubilidad decrece con la elevacion de temperatura y es virtualmente cero en el punto de ebullicion. En un sistema cerrado, sin embarço, la solubilidad es dependiente sobre la presión parcial del oxigeno en el espacio gaseoso y sobre la temperatura. Para una cada presión parcial de oxigeno la cantidad disuelta decrece con la elevacion de la temperatura cuando esta cercana a los 100 °C, despues aumenta; la solubilidad a 200 °C es similar a la de 25 °C.

El oxigeno disuelto es probablemente el componente mas trascendente en su influencia sobre la corrosion, su importancia yace en el hecho que es el mas importante despolarizador catodico en soluciones neutras. Existen otros despolarizadores mas, pero como el oxigeno es un componente casi universal de las aguas naturales, su importancia sera facilmente entendida.

#### 3.1.0.6 Dioxido de carbono.

El dioxido de carbono afecta la acidez del agua y como se explica mas adelante, tiene influencia en la formacion de incrustacion protectora. La cantidad de dioxido de carbono libre en aguas naturales rara vez es mas grande de 10 ppm y una parte esta estrechamente relacionada con el equilibrio del carbonato.

#### 3.1.0.7 Materia Organica.

La presencia de materia organica es otro factor importante

que hay que considerar, ya que la mayoría de las aguas naturales están lejos de ser estériles. Ellas contienen cantidades más o menos grandes de materia orgánica, ya sea viva o muerta. Existen un número de cepas de bacterias, tales como las sulfato reductoras, que pueden influenciar el proceso de oxidación bajo condiciones sumergidas.

#### 3.1.0.8 Concentración de Iones Hidrógeno (pH).

El efecto de la concentración de los Iones Hidrógeno del agua sobre la corrosión del Hierro a 22 y 40 C se demuestra en la fig. 3.0. Especímenes de acero dulce fueron expuestos al agua que contenía un promedio de 5 ml de oxígeno por litro de agua. La sosa (NaOH) y el ácido clorhídrico (HCl) fueron agregados para producir las variaciones alcalinas y ácidas del pH.

A valores de pH más grandes que el necesario para el desprendimiento de hidrógeno (pH=4) los resultados de la fig. 3.0 pueden ser explicados por una capa protectora de óxido ferroso hidratado sobre la superficie del Hierro, formada por la reacción de corrosión inicial. A pesar que el pH del agua se encuentre entre 4 y 9.5, la superficie del Hierro está siempre en contacto con una solución alcalina saturada de hidróxido ferroso hidratado (pH aproximado de 9.5). La corrosión continuará tan rápidamente como el oxígeno pueda difundirse a través de la capa protectora, siendo esta continuamente renovada por el proceso de corrosión. Puesto que la película producto de la corrosión junto al Hierro, permanece esencialmente inalterada por las condiciones externas dentro de las variaciones de pH consideradas, la velocidad de corrosión no es alterada excepto por el cambio de oxígeno

diseñado.

A un pH de 9.5 (22°C) sin embargo, un aumento en alcalinidad amplía su efecto en la superficie del hierro y ya sea que disminuya la velocidad de reacción en la superficie (el hierro se vuelve pasivo) o baje la permeabilidad de la capa producto de la corrosión al oxígeno (por disminución de la solubilidad del óxido ferroso hidratado). En cualquier caso la velocidad de corrosión se espera disminuya, como es observado.

Dentro de la región ácida (0-4), por otra parte, la capa producto de la corrosión alcalina se disuelve y el ácido reacciona directamente con el hierro. Para ácidos que no están totalmente disociados en sus iones componentes (ácidos débiles), el pH al cual el hidrógeno es desprendido se desplaza a un valor más alto (menos ácido).

La fig. 3.0 indica el efecto relativo de la actividad del ion hidrógeno sobre la corrosión del acero en agua libre de sales o impurezas, las cuales forman recubrimientos protectores. En algunas aguas tales recubrimientos podrían precipitar a un pH de 8, y de esta manera causar variación en los resultados de esta gráfica (es decir, la velocidad podría no ser de constancia lineal entre pH de 5 a 10). Es evidente que el diagrama puede ser dividido en tres zonas, cada una con un rango diferente de pH; los límites por supuesto que no están fijos y podrían ser alterados por cambios de temperatura y posiblemente por otros factores.

Los principales factores, dispuestos aproximadamente en el orden de su importancia, en cada una de las tres zonas son proporcionados en la siguiente tabla.

Zona Alcalina	Zona Neutra	Zona Ácida
(pH mas grande de 10)	(pH de 4.3 a 10)	(pH menos de 4.3)
corrosion lenta	Corrosión media	corrosion rapida
Películas protectoras	Conc. de oxígeno	pH
Conc. de oxígeno	Películas protec.	Sobrepotencial de hidrogeno.
Composición del metal	pH	Comp. del metal
pH	comp. del metal	Conc. de oxígeno
sobrepotencial de H.	sobrepot. de H.	Concentración del ión metálico.
Concentración del ión metálico.	Concentración del ión metálico.	Película protec.

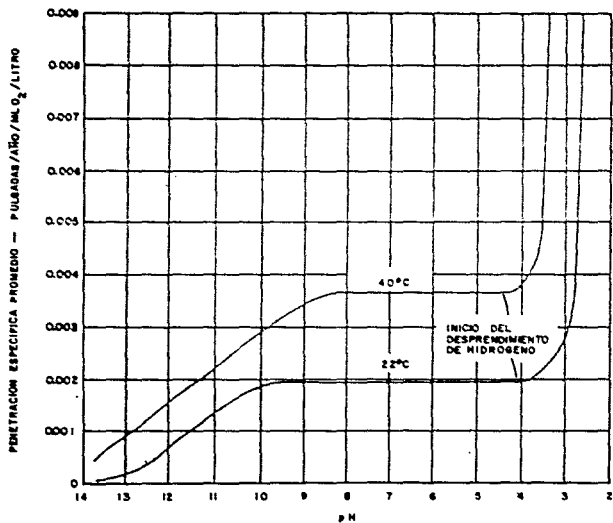


FIG. 3.0 EFECTO DEL pH EN LA CORROSION DEL ACERO

3.1.1 Técnica de Laboratorio para Medición de pH en Aguas que no se Encuentran en Equilibrio con la Atmósfera.

Los análisis de calidad de agua son muy sensitivos, y es crítico que el pH sea medido en forma precisa tanto como sea posible.

La medición y regulación del pH puede ser muy crítico en el control de la corrosión en sistemas de distribución de agua. A valores de pH abajo de 8.4, una pequeña diferencia en pH puede ser responsable de una diferencia relativamente grande en concentración de calcio o de alcalinidad, cuando esta aplicada a una condición de saturación de carbonato de calcio. Por ejemplo, una agua estaría a saturación de carbonato de calcio (como calcita) a las siguientes condiciones: 15 C, 400 mg/l de sólidos disueltos totales (SDT), pH 8, 120 mg/l de alcalinidad (como  $\text{CaCO}_3$ ), y una concentración de calcio de 120 mg/l (como  $\text{CaCO}_3$ ). Si el pH de esta solución disminuye a 7.8, la concentración de calcio requerida para retener la saturación de  $\text{CaCO}_3$  sería de 185 mg/l como  $\text{CaCO}_3$ , suponiendo que los otros factores de calidad de agua permanezcan inalterados. En este caso 0.2 de unidad de pH son equivalentes aproximadamente a 65 mg/l de calcio como  $\text{CaCO}_3$ .

Las solubilidades de muchos otros sólidos, que podrían actuar como un control sobre los niveles de solubilidad de elementos potencialmente tóxicos, o que pudieran proporcionar protección a la tubería (tales como  $\text{Pb}(\text{CO}_3)(\text{OH})$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  amorfo, o  $\text{Ca}_4(\text{F}_2)(\text{OH})_2$ ) son también muy dependientes del pH. Estas consideraciones y el caso citado indican la necesidad de obtener

precisión máxima en las mediciones de pH.

### 3.1.1.0 Influencia del Dióxido de Carbono Atmosférico.

Si el pH de una muestra de agua es más alto que el pH de su estado de equilibrio con la atmósfera, el pH observado disminuirá si la muestra permanece abierta al aire mientras está siendo medido. De otra forma, si el pH de una muestra de agua es más bajo que el de su estado de equilibrio con la atmósfera, el pH aumentará durante la medición si las precauciones pertinentes no son llevadas a cabo. Cuando se está usando sistemas experimentales que fueron sellados a la exposición a la atmósfera, el pH se encontró que difiere por 0.3 a 0.7 de unidad, de los datos obtenidos por el uso de un medidor de pH de banco de laboratorio con muestra expuesta a la atmósfera.

La siguiente tabla ilustra el problema de medición de pH de una muestra de agua de un sistema cerrado, a cuando la muestra está expuesta a la atmósfera. Las condiciones en el sistema cerrado fueron 8.5 de pH, alcalinidad total de aproximadamente 20 mg/l como  $\text{CaCO}_3$ , y temperatura ambiente.

#### Efecto de la Interacción Atmosférica sobre las Mediciones de pH.

Número de muestra	pH a condiciones abiertas
1	8.20
2	7.80
3	8.28

Los dos medidores usados en este estudio coinciden cuando se operan bajo condiciones abiertas en el banco de laboratorio, pero



no cuando el electrodo de uno de ellos fue instalado en un depósito sellado con agitación interna.

Las lecturas variables fueron en parte causadas por la selección del analista, del momento en el que el equilibrio del pH fue alcanzado. Esta variabilidad es eliminada por la ejecución de la medición del pH bajo condiciones cerradas.

Las aguas de pozo, líneas de plomería doméstica, líneas de distribución municipal y aguas de lagos hipolimnéticos a menudo caen dentro de esta categoría de sistema cerrado. Para demostrar este problema, una muestra de agua de pozo fue colectada de un sistema cerrado. Su pH fue de 4.7 cuando se determinó en forma abierta a la atmósfera. Para determinar el efecto del contacto con la atmósfera una segunda muestra fue recogida en una botella cerrada. Esta vez el pH fue de 4.1. El pH real fue posiblemente un tanto más bajo que 4.1, debido a que la prueba de pH fue aun efectuada abierta a la atmósfera.

Robertson y colaboradores encontraron que las diferencias entre algunas mediciones de pH de campo y laboratorio varían desde 0.0 hasta 2.8 unidades de pH. En general ellos observaron que las mediciones de pH son más altas en el campo que en el laboratorio. Ellos atribuyeron muchos de los aumentos y disminuciones de pH a cambios en la concentración del dióxido de carbono en el agua.

#### 3.1.1.1 Influencia de otros Factores Químicos.

Las variaciones en el pH que provienen del tiempo transcurrido entre muestreo y medición en el laboratorio, pueden también ser causado por precipitación y envejecimiento de material particulado en el recipiente (tal como  $\text{CaCO}_3$  u oxihidróxido

ferrico), crecimiento y respiración de organismos, y en forma menos frecuente, reacción con el recipiente en sí. Deberá cuidarse que al perturbar el estado natural de la muestra sea lo mínimo posible por el procedimiento de muestreo en sí, así como exposición breve al aire de muestras que provienen de sistemas cerrados, que podrían inducir reacciones redox irreversibles u otros cambios químicos que pudieran alterar el pH.

#### 3.1.1.2 Procedimiento Recomendado.

Antes de utilizar un medidor de pH para cualquier determinación analítica, el medidor deberá ser calibrado por el uso de soluciones reguladoras patrón. La calibración deberá incluir un intervalo de valores de pH de 4, 7 y 10 para determinar que tanto el medidor y el electrodo responden a cambios de pH. Un medidor y su sistema de electrodos que opera apropiadamente, medirá el intervalo de las soluciones reguladoras patrón con una precisión de aproximadamente  $\pm 0.1$  de unidad de pH sin recalibración. El manual de instrucciones del medidor o una adecuada referencia podría consultarse para detalles sobre pruebas de funcionamiento eléctrico del sistema, al menos dos soluciones reguladoras patrón deberán ser utilizadas y deberán agrupar el pH esperado de las muestras en lo posible. Las soluciones reguladoras patrón deberán estar o casi estar a la misma temperatura de la muestra.

La experiencia en el laboratorio con muchos diseños diferentes de medidores y electrodos, ha sido de que el mal funcionamiento del medidor es bastante raro comparado con el de sus electrodos. Para detectar un mal funcionamiento de electrodos,

es una practica util tener varios juegos de electrodos a la mano y comparar sus lecturas tomadas sobre replicas de varias muestras de pH y alcalinidad variados, usando diferentes combinaciones de medidores y electrodos. Aun electrodos nuevos han trabajado inapropiadamente en forma ocasional desde su primer uso. El almacenamiento de electrodos en uso en una solucion de KCl ligeramente acidificada se ha encontrado util.

Para evitar la inexactitud en las mediciones de pH causadas por exposicion al dióxido de carbono atmosferico, se ha implementado una tecnica sencilla de medicion de pH que elimine desviaciones y nos proporcione esencialmente los mismos valores de pH de sistemas cerrados, utilizando un medidor de banco de laboratorio.

El aparato necesario es presentado en la fig. 3.1. todas las veces que las mediciones de pH se realicen, el tapón debera estar en contacto con la superficie del agua.

#### Pasos del Procedimiento.

1. El medidor de pH debera calentarse y calibrarse. Las soluciones reguladoras no deberan permanecer abiertas a la atmosfera entre su utilizacion y deberan preferentemente de ser medidas en la misma configuracion cerrada que se utiliza. Las soluciones reguladoras y las muestras deberan estar a la misma temperatura, o un metodo confiable de compensacion debera emplearse. El medidor debera ser puesto en la posicion de encendido.

2. La muestra se colecta en un matraz erlenmeyer de 50 ml llenandolo completamente hasta la parte superior, permitiendo que

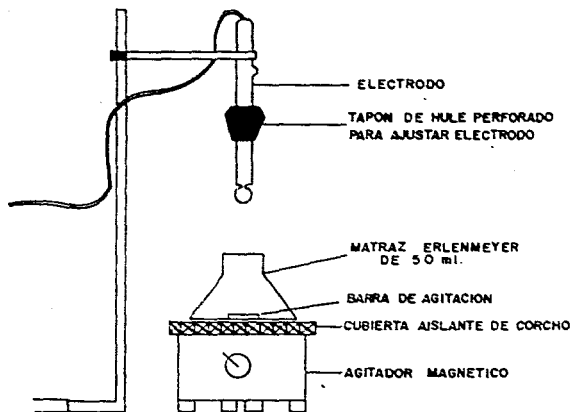


FIG. 3.1 APARATO PARA MEDICION DE P H

se derrame hasta una mitad del volumen del matraz, si la solución de muestra es abundante. Si es posible, la solución de muestra deberá introducirse bajo la superficie de la solución en el matraz para minimizar el contacto con el aire.

3. El electrodo se enjuaga con agua destilada por todas sus partes dos veces. El electrodo podría ser secado con un tejido suave, pero si no se toman cuidados extremos se rayara el bulbo o la junta de union. El secado podría volver lenta la respuesta del electrodo en algunos casos.

4. El tapón sólido es sacado del matraz erlenmeyer, la barra de agitación se coloca en el matraz y el electrodo es colocado de tal manera que la perforación del tapón lo selle en ese punto. Algo de agua será desplazada durante este paso y deberá ser recogida en un colector de agua corriente.

5. El matraz debe colocarse sobre una cubierta de espuma de estireno o de corcho (la cual sirve como un aislante) que a su vez se encuentra sobre el agitador magnético.

6. El medidor es cambiado de la posición de encendido a la de pH y se pone a funcionar el agitador magnético para que un flujo uniforme alcance al electrodo. La velocidad de agitación deberá ser constante para todas las muestras, de tal manera que un aparato de agitación con control de giro separado del interruptor de encendido-apagado es conveniente poseer. Una alta velocidad de agitación se observa que eleva la temperatura de la muestra por la fricción ejercida, atrayendo aire de las proximidades del tapón y aumentando el ruido en la lectura de pH por afectación del potencial de contacto del electrodo.

7. Una lectura estable deberá alcanzarse en aproximadamente 0.5 a 3 minutos con un electrodo que está funcionando adecuadamente, excepto en casos donde muestras sucesivas se estén midiendo y que tengan composiciones, temperaturas o pH ampliamente diferentes.

8. Se efectúa lectura de pH, se apaga el agitador magnético y el medidor es puesto en la posición de encendido.

9. Una nueva muestra se inicia desde el paso 2.

#### Resultados.

Un ejemplo del mejoramiento de la precisión y exactitud alcanzada usando el procedimiento de medición a sistema cerrado descrito, es demostrado en la tabla siguiente :

Estabilidad del Procedimiento de Medición a Sistema Cerrado en un Intervalo de 30 minutos en una muestra de baja alcalinidad.

Tiempo Transcurrido	Vaso de Precipitado abierto
Minutos	pH
1	8.12
5	7.98
10	7.79
20	7.55
30	7.39

pH de sistema cerrado  $8.16 \pm 0.002$  sobre 30 min. Intervalo; alcalinidad total del agua de abastecimiento  $3.27 \pm 0.001$  mg/l como  $\text{CaCO}_3$ ; temperatura  $25^\circ\text{C}$ .

Después de limpiar el electrodo por tres veces siguiendo los pasos 2 y 4 hasta el 8 cada medición con el agua por ser

Analizada, muestras por duplicado fueron medidas que provienen de un tanque experimental cerrado que contenia agua con una alcalinidad total de  $3.27 \pm 0.01$  eq/l como  $\text{CaCO}_3$  a  $25^\circ \text{C}$ . En ambos casos, sobre un periodo de tiempo de 30 minutos el pH fluctuaba por no mas de  $\pm 0.02$ . En forma siguiente una segunda medicion de 30 minutos, una muestra fresca fue tomada en un vaso de precipitado de 50 ml abierto, el cual fue agitado a la misma velocidad que las muestras cerradas mientras el pH se monitoreaba. Despues de 30 minutos el pH observado disminuyo por casi 0.8 de unidad y estuvo todavia disminuyendo al final de la prueba.

### 3.1.1.3 Resumen

1. Manteniendo la muestra bajo condiciones cerradas despues de la recoleccion, durante la medicion del pH, puede eliminar desviaciones del sensor causadas por la interaccion con el dióxido de carbono atmosférico.

2. Este metodo no se sugiere como necesario en todos los casos. Si la muestra ya esta en equilibrio con la atmosfera o si esta tiene una alta capacidad reguladora, este no es necesario. Al menos que una muestra sea determinada en ambas formas, de cualquier manera, ninguna decision definitiva puede efectuarse sobre si o no esta tecnica seria útil en un caso en particular.

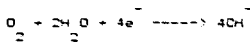
### 3.1.2 Tendencia Corrosiva del Agua.

Las especies quimicas disueltas en el agua pueden formar peliculas protectoras o ser corrosivas. Las aguas que contienen una gran cantidad de sales de calcio (aguas duras) pueden depositar una capa calcarea sobre la superficie interior de las tuberias de agua e inhibir o frenar la corrosion.

El óxido de hierro,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , asociado con el  $\text{CaCO}_3$  son los compuestos principales que constituyen la capa protectora. La formación de esta capa protectora natural sobre los materiales ferreos se basa en el equilibrio existente en las aguas potables entre el  $\text{CaCO}_3$  y el  $\text{CO}_2$ .

El carácter agresivo de las aguas naturales depende de numerosos factores, no bastando uno solo de ellos para definir su agresividad. Sin embargo, es conocido desde hace tiempo que las aguas blandas son por lo general más corrosivas que las duras, por lo que es corriente servirse de la dureza para realizar estimaciones de corrosividad. Las aguas duras se consideran poco agresivas, dado que pueden depositarse sobre la superficie metálica películas calcáreas continuas y compactas que dificultan el ataque del metal subyacente.

El calcio y el magnesio tienden a precipitar carbonatos e hidróxidos de baja solubilidad sobre las áreas catódicas, en las que como es sabido tiene lugar una alcalinización del electrolito, como consecuencia de la reacción catódica de reducción del oxígeno.



Esta precipitación dificulta el proceso catódico de reducción de oxígeno y con ello el proceso global de corrosión.

Las aguas de dureza intermedia contienen frecuentemente otros componentes y presentan a menudo tendencia a formar capas escasamente adheridas, bajo las que puede producirse un ataque de forma irregular.

En la tabla I puede verse una de las clasificaciones



existentes de las aguas en función de su dureza.

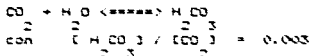
TABLA 1. Clasificación de las aguas según su Dureza.

Escala de Dureza	ppm de CaCO <sub>3</sub>
Muy blanda	< 30
Blanda	31 a 50
Dureza Media	51 a 120
Dura	120 a 180
Muy Dura	> 180

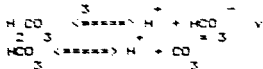
### 3.1.2.0 Equilibrio del Bicarbonato.

El dióxido de carbono se disuelve libremente en agua con una solubilidad que depende de la presión parcial, es decir su concentración en la fase gaseosa. En el aire la presión parcial del dióxido de carbono es 0.0003 atmósferas y la concentración del dióxido de carbono en agua en equilibrio con aire es aproximadamente de 0.5 ppm.

La mayoría del dióxido de carbono disuelto está presente en solución en estado molecular. Una pequeña cantidad reacciona con el agua para formar ácido carbónico



El ácido carbónico se disocia en dos pasos, primero para formar iones bicarbonato, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, y subsecuentemente iones carbonato, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, de acuerdo a las ecuaciones.



La primera y segunda constantes de disociación que

corresponden a las anteriores ecuaciones estan dadas por

$$\begin{aligned}
 & \frac{[\text{H}^+]}{K_1} \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3^*]} + \frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{K_2} = K_1 \\
 & \frac{[\text{H}^+][\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} = K_2 \\
 & \text{a } 25^\circ \text{C, } K_1 = 4.45 \times 10^{-7} \quad \text{y } K_2 = 4.69 \times 10^{-11}
 \end{aligned}$$

A partir de este dato la variación en las proporciones de los varios componentes pueden ser calculadas a partir de las ecuaciones :

$$\begin{aligned}
 & \text{Log } \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3^*]} + \frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} = \text{pH} - 6.35 \quad \text{y} \\
 & \text{Log } \frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{HCO}_3^-]} = \text{pH} - 10.33
 \end{aligned}$$

Para cualquier valor de pH

La variación en el porcentaje relativo del dióxido de carbono total disuelto en las varias formas, esta representado en gráficos, fig.3.2.a . Veremos que hasta un valor de pH de aproximadamente 8.5 tenemos unicamente que considerar el equilibrio entre dióxido de carbono libre y bicarbonato, siendo la cantidad de carbonato insignificanemente pequeña. En soluciones más alcalinas unicamente necesitamos considerar la proporción de carbonato a bicarbonato.

Las aguas naturales tienen valores de pH en el rango de 6.0 a 9.5 pero el 90 % de las aguas utilizadas tienen valores entre 6.5 y 8.0. De este modo estamos generalmente interesados con el equilibrio de dióxido de carbono-bicarbonatos.

### 3.1.2.1 Alcalinidad y Dureza

La cantidad de hidróxido, carbonato y bicarbonato presente en el agua esta considerada como alcalinidad (alc.).

$$\text{Alc.} = [\text{HCO}_3^-] + \frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{2} + [\text{OH}^-]$$

Esta es usualmente estimada por titulación en dos pasos.

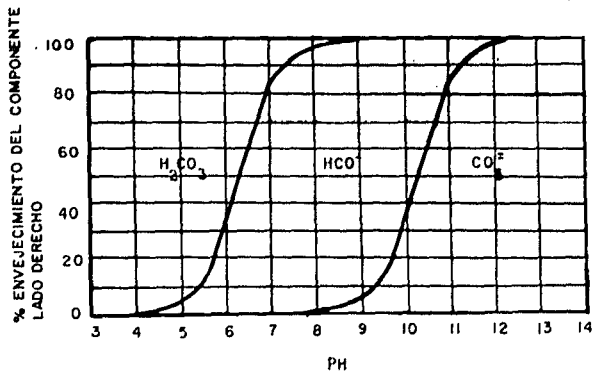


FIG. 3.2 EQUILIBRIO DEL BICARBONATO VS. PH

primero con fenolftaleína como indicador seguida por la titulación con anaranjado de metilo. La alcalinidad a la fenolftaleína, la cual nos proporciona un punto final en S.O. es una medida del hidróxido y la mitad del carbonato de la alcalinidad. La alcalinidad al anaranjado de metilo, la cual da un punto final en 4.5, corresponde al carbonato, bicarbonato e hidróxido, o alcalinidad total. Un conocimiento de estas dos cantidades permite el cálculo de los valores del bicarbonato y carbonato.

El calcio y el magnesio son los componentes que producen dureza en el agua y son capaces de destruir las propiedades detergentes del jabón. Estos metales están generalmente presentes en solución como bicarbonatos, pero podrían también existir como sulfatos o nitratos y ocasionalmente como cloruros. Su presencia es muy importante en generadores de vapor o instalaciones de agua caliente, debido a su habilidad para formar incrustación.

La dureza total es mejor determinada por estimación directa de los contenidos de calcio y magnesio. antiguamente el término dureza temporal fue aplicado a la parte de la dureza precipitada en ebullición, es decir asociada con los carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio. El valor obtenido es, no obstante, dependiente de la técnica usada y va a ser reemplazada por el término dureza de carbonatos, la cual es generalmente la misma que la alcalinidad total. La diferencia entre dureza de carbonatos y la dureza total, estimada para el calcio y magnesio, es llamada de no carbonatos y a menudo reemplaza el término más viejo de permanente. Esta parte de la dureza es producida por los sulfatos, cloruros y nitratos de calcio y de magnesio.

### 3.1.2.2 Índice de Langelier e Incrustación.

La relación matemática entre dióxido de carbono, bicarbonato y carbonato de calcio ha sido estudiada por varios investigadores, incluyendo a Langelier. La forma más simple de su ecuación es :

$$pH = pCa + pAlc + (pK_2 - pK_3)$$

donde :  $pH_s$  = Valor de pH de saturación.

$pCa$  = Logaritmo negativo de la concentración de calcio (ppm  $CaCO_3$ ).

$pAlc$  = Logaritmo negativo de la concentración de alcalinidad.

$pK_2$  = Constante de ionización de  $HCO_3^-$

$pK_3$  = Producto de solubilidad del  $CaCO_3$ .

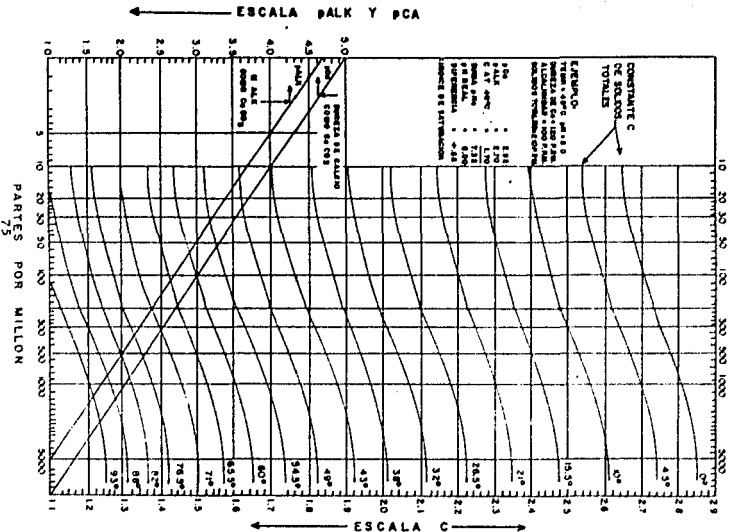
Esta forma simple no tiene aplicación para valores de pH más allá de 9.0 y la alta salinidad afecta su precisión. El término  $(pK_2 - pK_3)$  es una función de la temperatura y la fuerza iónica (sólidos disueltos).

El índice de saturación o de Langelier del agua se define como

$$I.S. = pH - pH_s$$

donde  $pH$  es el pH real del agua. Si el índice de saturación es positivo el agua estará sobresaturada con carbonato de calcio y será incrustante ; si el valor es 0 hay saturación pero no es incrustante o agresiva y por último si es negativo el agua será agresiva para el carbonato de calcio y lo va a disolver de la capa incrustante protectora causando problemas de corrosión en el sistema de tubería. Otra forma de obtener el valor del índice de Langelier es a través de gráficas como la de la fig. 3.2 b.

### 3.2b GRAFICA INDICE DE LANGELIER



75 PARTES POR MILLON

Una distinción deberá efectuarse entre una tenue capa de depósito, ya sea de carbonato de calcio u otro material, y una capa protectora. La protección ideal, en efecto consiste de capas de espesor insignificante, las cuales no dificultan el flujo de agua y calor y las cuales son autorenovables. Esto es difícil de alcanzar con aguas naturales. Una agua la cual se encuentra exactamente en equilibrio con respecto al carbonato de calcio es normalmente corrosiva al acero, debido a que no tiene fuerza para formar un depósito de carbonato de calcio. Las aguas sobresaturadas por otra parte, al no ser adecuadamente tratadas, formarán una incrustación importante, si esto inhibe o no la corrosión depende sobre la adherencia de la capa al metal y su porosidad.

### 3.1.3 Mecanismo del Proceso de Incrustación.

La formación de incrustación en tuberías de acero que transportan agua potable es el resultado de dos procesos: (1) la corrosión del sustrato metálico, y (2) el depósito de carbonato de calcio. Esto puede describirse como sigue: Durante la etapa temprana de contacto entre metal y agua, el proceso dominante es la corrosión del metal con formación de  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , subsecuentemente oxidado a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y a  $\frac{1}{2}\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , y en aguas con alto contenido de  $\text{HCO}_3^-$ , también es formado  $\text{FeCO}_3$ . El crecimiento de la capa de compuestos de hierro retarda la reacción corrosiva por una parte e intensifica el depósito de calcio al proveer un núcleo de cristalización. El ulterior crecimiento de la capa de incrustación es controlado en la zona exterior por la tendencia del agua a depositar  $\text{CaCO}_3$  y en la zona interna por la velocidad de difusión.

del oxígeno a través de los poros hacia la superficie metálica.

Las capas de incrustación son estructuralmente homogéneas. Una característica común a todos los especímenes de incrustación es el aumento en porosidad como la interfase metal-incrustación está cercana. Los detalles morfológicos, aunque, son específicos para cada tipo de incrustación, su variedad viene siendo particularmente pronunciada en la zona porosa junto al metal.

Los análisis fluorescentes con rayos x mostraron que las capas de incrustación contienen principalmente compuestos de hierro y calcio.

La capa consiste de tres zonas, a saber : (1) una zona interna rica en hierro y baja en calcio, (2) una zona externa que es lo contrario, y (3) una zona intermedia en la cual el contenido de hierro cae bruscamente con un correspondiente aumento excesivo en calcio. La localización del excesivo gradiente varía de incrustación a incrustación.



### 3.2 CONDICIONES DE OPERACION.

Las condiciones de operacion tienen una influencia importante. Generalmente los factores implicados son complejos, como lo son la temperatura, velocidad de flujo, características de diseño y las corrientes parasitas.

#### 3.2.0 Temperatura.

La temperatura del agua afecta la velocidad de oxidacion en varias formas. Primero, los procesos de corrosion participan de la tendencia general de las reacciones químicas a aumentar en velocidad con la elevacion de la temperatura. Mas importante, aun, son los efectos de la temperatura en la naturaleza y solubilidad de los productos de corrosion. Por ejemplo, una elevacion de temperatura a menudo tiraria abajo una incrustacion de carbonato y aumentaria la velocidad de difusion del oxigeno a través del agua, aunque tambien disminuye la solubilidad de este gas. Algunos de estos efectos son contrarios. Con el resultado que bajo ciertas condiciones de laboratorio, por lo menos, la tasa de la curva de oxidacion-temperatura para el acero sumergido en agua pasa a través de un maximo antes que el punto de ebullicion sea alcanzado aproximadamente a 80°C.

#### 3.2.1 Velocidad de flujo.

La velocidad de flujo del agua es tambien muy importante. El usual efecto inicial del flujo en aguas naturales es aumentar la corrosion. La aceleracion de la corrosion ha sido notable en una investigacion que estuvo compuesta de tubos de acero de varios tamaños con velocidades del agua que alcanzaron un maximo de 2.4 m/s. Las velocidades de corrosion a las velocidades de flujo mas

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

altas fueron de cuatro a treinta veces o más de aquellas a bajas velocidades: la corrosión mas alta se aplica para las aguas de mas alta temperatura y diametros mas pequeños de tubería (1/4 de pulgada).

Otros investigadores han reportado que, sobre un valor critico de velocidad de flujo, la velocidad de corrosión del fierro en agua disminuye con aumentos en este valor. En estas pruebas se considera probable que la alta velocidad lleve suficiente oxígeno a la superficie del fierro para causar pasivación, en la misma manera como la alta concentración del oxígeno disuelto en agua pasiva el fierro. Este punto de vista se hace aparente al presentarse potencial menos activo del fierro en agua en movimiento (aproximadamente -0.02 volt, escala de hidrogeno) comparado con un potencial activo en agua estancada (-0.04 volt).

En agua natural, como la velocidad se aproxima a valores muy altos, se espera que la corrosión al principio aumente, despues decrezca, pudiendo aumentar de nueva cuenta. Esto puede ocurrir debido a que la acción erosiva sirve para romper el estado pasivo.

Bajo las condiciones de flujo, experimentalmente se encuentra que la dependencia funcional de rapidez de flujo ( $u$ ) a velocidad de corrosión ( $r$ ) es de la forma  $r \propto V^n$  donde  $n$  es una constante. Para el flujo a través de tubería  $n = 1/3 = 0.33$  para flujo laminar y  $n = 0.5$  a  $0.8$  para flujo turbulento.

La fig 3.3 muestra en forma gráfica la dependencia de la velocidad de corrosión con la rapidez de flujo. Notandose de que se trata de una gráfica log-lineal. El cambio de pendiente refleja

un cambio en el exponente al pasar de flujo laminar a turbulento. La meseta ocurre cuando la corrosión deja de estar bajo control catódico, es decir el oxígeno que se reduce es el que está llegando a la superficie. La curva A es obtenida cuando existen condiciones para la pasivación del metal (alta concentración de oxígeno). El aumento de velocidad de corrosión sobre el rango 5 a 10 m/s se debe a la cavitación.

### 3.2.2 Diseño.

El diseño también debe ser considerado. Cambios repentinos en la dirección del flujo, como por ejemplo una caja de agua mal diseñada, podría guiar a severo daño local por ataque por impactación. Mala selección de diámetro de tubería origina altas velocidades en la misma, así como también lo contrario, zonas donde exista poco movimiento o zonas muertas. La mala aplicación del material de tubería o la falta de un recubrimiento adecuado puede complicar el problema de la corrosión en el sistema

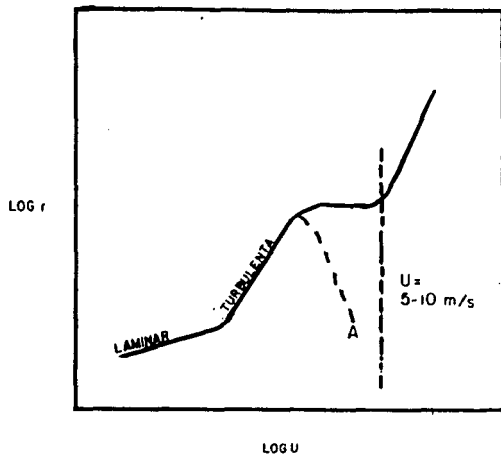


FIG. 33 DEPENDENCIA DE LA VELOCIDAD DE CORROSION ( $r$ )  
CON LA RAPIDEZ DE FLUJO ( $U$ )

#### CAPITULO. IV

#### CORROSION EN SISTEMAS DE TUBERIA DE AGUA POTABLE

## CONTENIDO

### CAPITULO IV. CORROSION EN SISTEMAS DE TUBERIA

- 4.0 METODOS DE EVALUACION DE LA CORROSION
  - 4.0.0 METODO DE PERDIDA DE PESO
  - 4.0.1 TECNICAS VISUALES
  - 4.0.2 SONDAS DE RESISTENCIA ELECTRICA
  - 4.0.3 TECNICAS ELECTROQUIMICAS
  - 4.0.4 MEDICIONES pH-POTENCIAL
  - 4.0.5 PRODUCTOS DE LA REACCION DE LA CORROSION
  - 4.0.6 MEDICIONES DE ESPESORES
  - 4.0.7 ESTUDIOS DE CORROSION EN SISTEMAS DINAMICOS
    - 4.0.7.0 MONTAJE DEL MEDIDOR DE CORROSION
    - 4.0.7.1 CONSTRUCCION DEL CIRCUITO CERRADO
    - 4.0.7.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL
    - 4.0.7.3 RESULTADOS
    - 4.0.7.4 RESUMEN
- 4.1 IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE MONITOREO
  - 4.1.0 EVALUACION INICIAL DE LAS CARACTERISTICAS DEL AGUA DE SUMINISTRO
  - 4.1.1 EVALUACION DE LA CORROSIVIDAD
    - 4.1.1.0 ESTUDIO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION
    - 4.1.1.1 ANALISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA
    - 4.1.1.2 COMPARACION DE INDICES DE CORROSION
    - 4.1.1.3 COMPARACION CON ABASTECIMIENTOS SIMILARES
- 4.2 SISTEMAS DE CONDUCCION Y DISTRIBUCION
  - 4.2.0 DETERMINACION INICIAL DE LA POTENCIALIDAD DE LA CORROSION

4.2.1 ANALISIS DE LABORATORIO E INVESTIGACION DE CAMPO

4.2.2 TUBERIA Y PROGRAMA DE CUPONES FREIERA

4.2.3 REGISTRO DE FUGAS

4.2.4 PROGRAMA DE MUÉSTREO DE CAMPO

#### 4.0 METODOS DE EVALUACION DE LA CORROSION

Aunque han habido muchos estudios que relacionan la calidad del agua con sus efectos sobre varios materiales, no existe hasta el momento bases claras para predecir el efecto para un caso en específico. Muchas generalizaciones se han desarrollado, pero existen muchos casos que se oponen resueltamente a la predicción.

Debido a que uno de los mayores problemas asociados con el envío de agua potable al consumidor, es la degradación de su calidad en su tránsito a través del sistema de distribución de la planta, es particularmente importante que los efectos de la corrosión sean cuantificados.

##### 4.0.0 Método de la pérdida de peso.

La forma más común de medir la corrosión, es la determinación de la pérdida de peso de un cupón, a través de su exposición al ambiente corrosivo en cuestión.

La velocidad de corrosión, de un metal inmerso en agua, es una función de la tendencia de ese metal a corroerse, y del agua y componentes que contiene a promoverla (o inhibirla). Debido a que estas dos tendencias son inseparables, La resistencia a la corrosión de un material o la corrosividad del agua, deberán ser determinadas en términos relativos más bien que en absolutos. La tendencia de un material a corroerse, es normalmente determinada por medición de su velocidad de corrosión y comparación con las velocidades de corrosión de otros materiales en el mismo ambiente. En forma contraria, la corrosividad relativa del agua puede ser determinada, comparando las velocidades de corrosión de un material en aguas de diferentes calidades.



El método de pérdida de peso, tiene ciertas ventajas en la comparación del ataque uniforme bajo condiciones diferentes o en aleaciones diferentes. Las muestras son cuidadosamente limpiadas e instaladas en el medio corrosivo, de tal forma que el ataque no este influenciado por el recipiente que lo contiene. Esto es frecuentemente realizado, por el uso de aislantes electricos que aseguran el aislamiento de las muestras metalicas, evitando cualquier acoplamiento bimetalico indeseado. Enseguida de un periodo deseado de exposicion a las condiciones ambientales, la muestra se remueve. Los productos de corrosion son cuidadosamente limpiados, y la perdida de peso determinada con una balanza analitica sensible. La velocidad de corrosion es entonces calculada por :

$$\text{Mils/año} = 534 W / DAT = \text{milesimas de pulgada/año}$$

donde W = pérdida de peso (mg)

D = densidad de metal (g/cm<sup>3</sup>)

A = area del espécimen de prueba (pulg<sup>2</sup>)

T = tiempo de exposicion (h)

$$\text{g/m}^2 \text{ /año} = 87600 W / AT$$

donde W = pérdida de peso (mg)

A = area de espécimen de prueba (cm<sup>2</sup>)

T = tiempo de exposicion (h)

La american society for testing and materials (ASTM) adopto cuatro metodos diferentes de perdida de peso, como normas. Entre estos metodos, unicamente la prueba de la bobina de alambre y la prueba del niple maquinado de la Illinois State Water Survey

(ISWS), se han usado para determinar la corrosividad del agua en sistemas de distribución. La prueba de la bobina de alambre, emplea especímenes metálicos en el centro del flujo de la tubería de agua, donde la velocidad del flujo y la disponibilidad de químicos en el agua, podría no ser la misma que en la superficie de la tubería. La prueba del niple maquinado de la ISWS desarrollado por su personal, ha sido utilizado por muchas empresas públicas, incluyendo la City of Seattle Water Department para estudios de corrosión interna. Este método emplea especímenes de paredes delgadas del metal de la tubería real, que están aislados y pintados por la parte externa, para eliminar la corrosión galvánica y la de celda de concentración de oxígeno. Con el servicio en operación, se encuentra más realmente aproximado que en otros métodos de pérdida de peso, ya que la corrosión es medida en la pared de la tubería y el flujo no es distorsionado por el espécimen.

#### 4.0.1 Técnicas Visuales.

El ojo humano, la cámara y el microscopio son herramientas invaluableles para la observación de la corrosión. Un análisis visual completo, siempre puede realizarse en cualquier tipo de equipo o espécimen de prueba, que estuvo expuesto a un ambiente corrosivo. Materiales extraños tales como películas y depósitos, pueden ser también examinados.

El examen visual a menudo permitirá la clasificación del tipo de corrosión que está sucediendo, tales como picaduras contra corrosión total. El uso de un microscopio llevaría el análisis dentro de la microestructura del metal. Una cámara puede registrar

para referencias futuras, las observaciones realizadas durante el examen; por lo tanto pueden ser clasificadas como instrumentos para investigaciones de la corrosión.

#### 4.0.2 Sondas de Resistencia Electricas.

Los metales y las aleaciones presentan resistencia electrica al flujo de la energia electrica. La relacion esta definida en la siguiente ecuacion :

$$R = r L/A$$

Donde : R = resistencia

r = resistividad

L = longitud de muestra

A = área de seccion transversal de la muestra.

Las sondas pueden estar hechas de diferentes metales y aleaciones. Las sondas son insertadas dentro del medio que existe en la tubería, y la pérdida de área de sección transversal de la sonda, es detectada por el aumento en la resistencia electrica conforme el tiempo transcurre. Los datos nos dan una historia grafica, de una velocidad de corrosión tal y como esta sucediendo. No obstante, la inspección visual es necesaria para diferenciar entre corrosión por picadura y la uniforme.

La sonda podría no ser equiparable a la estructura real en operación, debido a la posición de la sonda, a la velocidad del agua en la proximidad de la misma y otros factores que podrían tener un efecto pronunciado sobre los resultados obtenidos. Este instrumento, puede ser una herramienta util para monitoreo continuo de la corrosividad de un medio, o en la evaluación de la resistencia a la corrosión de varios metales expuestos a un

ambiente.

#### 4.0.3 Técnicas Electroquímicas.

Las técnicas electroquímicas, pueden ser utilizadas para evaluar la velocidad de corrosión uniforme en hendiduras y la bimetalica. Con ciertas aleaciones, pueden ser determinadas la susceptibilidad a picadura y la corrosión fatiga.

Los instrumentos, en la que esta incluida una sonda, que es introducida en el medio, monitorean la velocidad de corrosión instantanea para la mayoría de los metales y aleaciones.

Las desventajas de esta técnica, se encuentra en los muchos factores que tienen influencia en los resultados, y en la interpretación de los datos de la prueba.

#### 4.0.4 Mediciones pH - Potencial.

El diagrama pH - potencial de Pourbaix, define la posibilidad termodinamica de la corrosión, y puede frecuentemente ayudar en el entendimiento de las razones para cierto comportamiento que, puede ser observado sobre las muestras que están sufriendo corrosión.

#### 4.0.5 Productos De Las Reacciones De Corrosión.

Comunmente, el desprendimiento de hidrogeno o la adsorción de oxígeno son analizados en los estudios de corrosión. El sistema debere ser controlado cuidadosamente, para obtener datos significativos en el uso de esta técnica. Es tambien posible, medir la cantidad de un componente soluble en especifico, que resulte de una reacción de corrosión.

#### 4.0.6 Medicion de Espesores.

Existe una variedad de aparatos ultrasonicos, que miden el espesor de un material cuando la medición directa es imposible.

Debido a la configuración del material, y cuando es deseable preservar la estructura de la muestra. Los resultados de las mediciones realizadas a intervalos regulares, pueden dar una historia gráfica, del ataque corrosivo que puede estar ocurriendo en la superficie interior.

#### 4.0.7 Estudios De Corrosión En Sistemas Dinámicos.

Estudios en circuito cerrado de tubería.

El sistema de circuito cerrado, es una herramienta efectiva para simular pruebas en el interior de la línea, para evaluar la efectividad de inhibidores de corrosión y el efecto de los parámetros de calidad de agua sobre la velocidad de corrosión de la tubería metálica.

Con algunas modificaciones, el diseño básico de los circuitos cerrados de tubería en el estudio aquí reportado, sigue la denominación ASTM D 2688-70, métodos de prueba patrón para la corrosividad del agua en ausencia de transferencia de calor (métodos de pérdida de peso) y método C-ISWS (Illinois State Water) prueba niple maquinado.

Los circuitos cerrados fueron construidos de tubos y accesorios de PVC, así que pudieran reutilizarse. El sistema completo era no metálico, excepto por los injertos metálicos a ser probados. Dichos injertos removibles, son sostenidos por la armadura de la muestra y son hechos parte del sistema de circuito cerrado. La utilización de tuberías de diferentes tamaños da la variación de velocidad dentro del mismo circuito cerrado.

Un instrumento especial (corrater) midió las velocidades de corrosión y picadura, electroquímicamente, por sondas introducidas

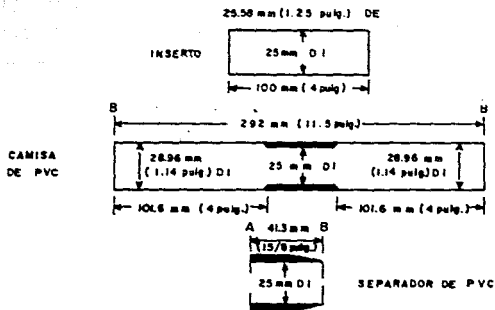
dentro del sistema.

#### 4.0.7.0 Montaje del Medidor de Corrosion

El juego de piezas para la prueba de medición de la corrosion, fueron puestas en la seccion de tuberia del circuito cerrado, que puede ser removida del mismo despues del tiempo de exposicion asignado.

Cada juego de piezas para la prueba de corrosion, consiste de cuatro inserciones de prueba, construidos de tuberia metalica de longitud representativa. Estas inserciones fueron instaladas dentro de un niple de PVC de 12 pulgadas (300mm.). Cada insercion fue de 50 mm (2 pulg.) de longitud. El diametro interno de los niples de PVC fueron aumentados por rebaje del suficiente plastico en un torno para alcanzar el diametro externo del inserto de metal, asi que este pudiera deslizarse facilmente dentro del niple, pero adaptado ajustadamente. No obstante, cuando tuberia de cobre fue estudiada usando el mismo especimen de contenedor, una camisa o manguito de PVC fue necesario, ya que los diametros externos de los tubos de cobre fueron mas pequeños que los de los tubos de acero. En el ensamblaje del medidor, fueron utilizadas uniones y reducciones de PVC. Tambien, se utilizaron separadores y empaques de anillo-O, para mantener los insertos en su posicion interna dentro del montaje. Los separadores fueron construidos de tubos de PVC del mismo diametro que el inserto metalico. La longitud de los separadores varian de montaje a montaje, dependiendo sobre la diferencia en el encuadrado de la union reductora sobre el tubo. Cada componente puede ser reutilizado con el conjunto original de separadores, asi como la longitud de los

insertos se mantengan constantes. Figs. 4.1 y 4.2.



26.7 m (10.5 m) EN TUBERIA DE ACERO GALVANIZADO Y DE PVC  
 ADEMAS DE 26 mm (1.025) DE TUBERIA DE COBRE

FIG. 4.1 INSERTO, CAMISA Y SEPARADOR DEL ELEMENTO DE MEDICION DE CORROSION ISWS



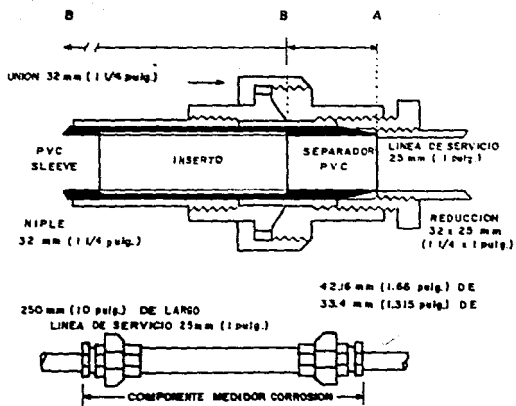


FIG. 4.2 CORTE TRANSVERSAL DE INSERTO, SEPARADOR, UNION  
 Y EL MONTAJE DEL COMPONENTE MEDIDOR DE CORROSION  
 I S W S

#### 4.0.7.1 Construcción del Circuito Cerrado de Tubería.

Los circuitos cerrados de tubería fueron construidos de tubería de PVC cedula 40. Tres diferentes diámetros de tubería fueron escogidos, con la finalidad de variar la velocidad. Estos fueron de 25 mm (1 pulgada), 20 mm (3/4 pulg.) y 15 mm (1/2 pulg.). Tres secciones de circuitos de tubería con estos diámetros fueron conectados en serie. Todos los accesorios y válvulas son de PVC. Las dimensiones apropiadas fueron escogidas en concordancia con el diámetro de tubería de cada una de las secciones, con el objeto de mantener flujo laminar a través del circuito. Válvulas para derivación y arreglos de tubería fueron incluidos, con el propósito de permitir la remoción del conjunto de muestra mientras el sistema se encuentre en operación. Un mínimo de tubería para flujo recto de 0.9 m (3 pies) antes del conjunto medidor, es una medida para evitar indebidas distorsiones de flujo, de acuerdo a los señalamientos de las normas ASTM.

Una sección fue diseñada para el empleo de sondas electroquímicas para medición de la velocidad de corrosión. Debido a que la posición de la sonda afecta la validez del dato, los electrodos fueron puestos paralelos al flujo, para reflejar la corrosión de la pared de la tubería.

Una bomba peristáltica con una capacidad de 15-4500 ml/min fue utilizada para circular el agua. Un recipiente de 2 litros instalado antes del circuito cerrado de tubería sirve como un recipiente para eliminar pulsaciones en el flujo. (En el campo, la presión del sistema daría el flujo, con el control efectuado con las válvulas) un tanque de polietileno de 208 litros (55 galones)

se utiliza como recipiente y tanque de recirculación.

El gas fue distribuido uniformemente dentro del recipiente a través de una tubería de polietileno que se ramifica en cuatro partes en el fondo del tanque, cada ramificación tiene conectada un difusor de piedra.

En el caso de un estudio en sistema cerrado, el tanque podría ser sellado con una junta de hule bajo la tapa, la cual podría ser sujeta con abrazaderas.

Las muestras de agua fueron tomadas del grifo lateral del tanque. Un rotámetro con un flotador de tantalio inerte fue utilizado para medir la velocidad de flujo.

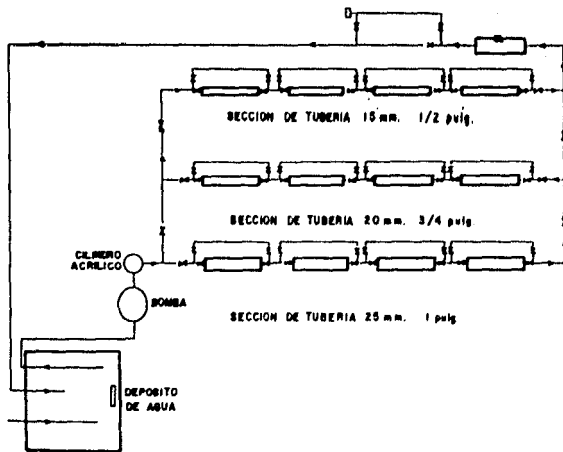
El diagrama esquemático del sistema completo de circuito cerrado, como el utilizado en el estudio de laboratorio, es mostrado en la fig. 4.3 b.

#### 4.0.7.2 Procedimiento Experimental.

##### Recolección de Datos

Los insertos metálicos fueron cortados de longitudes representativas de tubería de acero negro. Los insertos fueron de 15 mm (1/2 pulg.), 20 mm (3/4 pulg.) y 25 mm (1 pulg.) en diámetro y 50 mm (2 pulg.) en longitud. Un corte transversal del elemento medidor de corrosión es mostrado en la fig 4.3a.

Los insertos fueron numerados para propósitos de identificación por estampado con un dado metálico, seguido con desengrase metálico en tetracloruro. Los insertos fueron sacados del solvente, escurridos y después limpiados con un polvo de pulido libre de cloro, para remover toda la materia extraña de la superficie expuesta. Estos fueron enjuagados completamente con



**FIG. 4.3b ESQUEMA DEL ENSAMBLE DEL CIRCUITO CERRADO DE TUBERIA PARA PRUEBAS DE CORROSION**

agua y despues con acetona para eliminar exceso de agua. Los insertos limpios fueron secados en un horno a 105 °C por una hora, sacados y enfriados en un desecador por una hora, despues pesados en una balanza analitica hasta una exactitud de 0.001 g. Se pusieron 4 insertos en cada componente de circuito.

Con el objeto de evitar la corrosión por hendidura de la superficie exterior de los insertos, un recubrimiento primario de epóxico se aplico en esta superficie. Los remates de los insertos fueron sumergidos 1.58 mm (0.06 pulg.) dentro del primario para recubrir y proteger los remates de la corrosión en filos u orillas. Los recubrimientos epóxicos fueron curados por dos semanas a temperatura ambiente.

El agua sintetica (ISF 1.150 gal.) fue preparada para dar la composición mostrada en la tabla 1. Esta composición fue seleccionada, de los datos sobre velocidad de corrosión obtenidos en estudios batch o por lote, sobre aguas de calidad variante. Esta agua produce la velocidad de corrosión mas grande y fue escogida para esta parte del estudio.

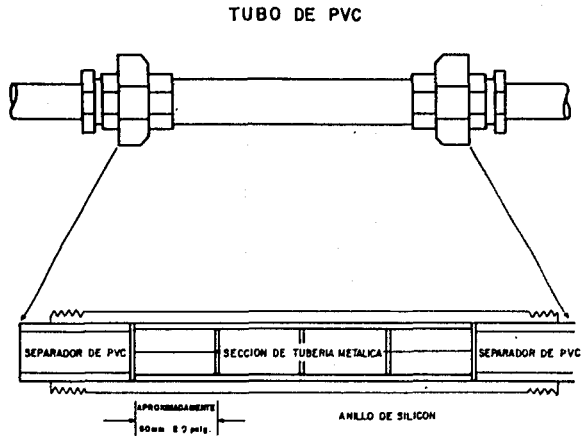


FIG. 4.3a CORTE TRANSVERSAL DE UN ELEMENTO MEDIDOR DE CORROSION

TABLA 1.

## COMPOSICION DEL AGUA SINTETICA

Parametro	Conc. mg/l
Calcio-como Ca <sup>2+</sup>	20
Magnesio-como Mg <sup>+</sup>	6
Sodio-como Na <sup>-</sup>	23
Cloruro-como Cl <sup>2-</sup>	36
Sulfato-como SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	24
Bicarbonato-como HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	61
alcalinidad-como CaCO <sub>3</sub>	50
dureza total-como CaCO <sub>3</sub>	75

El agua se almacena en un tanque de polietileno de 208 l (55 gal.), el cual sirve como un recipiente y tanque de recirculación. El agua fue saturada con oxígeno y agitada en todo el experimento por burbujeo de aire en forma continua a través del recipiente.

Las velocidades de flujo varían entre 0.076 y 0.305 m/s (0.25 y 1.0 pies/s), con la finalidad de simular el flujo en los sistemas de distribución. La velocidad en cada tamaño de tubería es mostrado en la tabla 2. La velocidad de flujo fue regulada por una bomba de flujo variable y medida con el rotámetro.

TABLA 2.

## VELOCIDAD A TRAVES DE DIFERENTES TUBERIAS

Diam. de tub.		Flujo de Diseño	Veloc. de Diseño
mm	pulg.	l/min	m/s
15	1/2	2.3	0.305
20	3/4	2.3	0.134
25	1	2.3	0.076

Debido a que hubo cuatro montajes de muestra en cada una de las secciones de circuito cerrado de tubería, el tiempo de exposición fue escogido que fuera 1, 5, 11 y 21 días, con el objeto de caracterizar la corrosión como función del tiempo.

Tres de los insertos de cada uno de los montajes, fueron utilizados para determinar pérdidas de peso y un inserto para inspección visual. Aquellos insertos usados para pérdidas de peso fueron secados en un horno a  $105^{\circ}\text{C}$  por 25 horas. Los extremos de los insertos fueron cubiertos con tapones de hule y después sumergidos en un removedor de epoxico para perder la pintura de la superficie del exterior. La pintura fue removida, después los tapones fueron removidos, los insertos fueron secados nuevamente en el horno a  $105^{\circ}\text{C}$  por una hora, seguido por una hora de enfriamiento en un desecador y el peso seco determinado y registrado con una exactitud de 0.001 g. Las superficies internas de los insertos fueron raspadas suavemente con una espátula para eliminar depósitos sueltos y cepilladas con cepillo de cerda tiesa hasta que se eliminó el polvo fino de los depósitos. Los insertos fueron secados en un horno a  $105^{\circ}\text{C}$  y pesados, como previamente se describió. Los depósitos dejados en los insertos fueron raspados suavemente con una espátula y cepillados con una solución acuosa de polvo para pulir, hasta que los insertos estuvieran libres de depósitos. Los insertos fueron enjuagados con agua y acetona y secados, para posteriormente pesar como se describe anteriormente.

La pérdida de peso fue calculada y convertida a una velocidad de corrosión en  $\mu\text{m/año}$  y milésimas de pulgada, en lo cual se supone remoción uniforme de material de la superficie. Aunque esta



suposición podría no ser válida para un caso en específico, los datos son útiles para propósitos comparativos.

Los insertos utilizados para inspección visual fueron secados a 105 °C por una hora y seccionados en formas longitudinal. Las superficies metálicas fueron observadas visualmente y tomadas fotografías para futuras referencias. En este punto fue posible medir la profundidad de las picaduras para la corrosión localizada.

Los productos de corrosión provenientes de los insertos fueron recogidos en forma separada y se le efectuaron espectroscopia por difracción de rayos x, para análisis de su composición.

La calidad del agua fue monitoreada periódicamente para correlacionar el cambio en calidad del agua con la corrosión metálica.

#### 4.0.7.3 Resultados

Las velocidades de corrosión obtenidas por el método de pérdida de peso se muestran en la siguiente tabla y en la figura 4.4.

### Velocidades De Corrosion

Tiempo de exposicion dias	Tamaño de tuberia		veloc. de corrosion	
	mm	ulg	mils/año	ua/año
1	15	1/2	46.7	1186
	20	3/4	30.8	782
	25	1	27.6	701
5	15	1/2	29.4	746
	20	3/4	21.3	541
	25	1	16.2	411
11	15	1/2	26.1	662
	20	3/4	20.2	513
	25	1	14.8	375
21	15	1/2	25.3	642
	20	3/4	18.4	467
	25	1	14.5	368

Las velocidades de corrosion fueron inversamente proporcionales al tamaño de la tuberia, y de esta manera directamente proporcional a la velocidad de flujo dentro del rango de velocidad medido.

Las velocidades de corrosion no varian mucho despues de un día de exposicion. Debido a que las velocidades de corrosion obtenidas en los estudios de laboratorio son unicamente valores relativos, las pruebas podrian ser acortadas entre 5 y 10 días para casos en los cuales el acero negro es el metal en estudio.

La observacion visual de los insertos despues de diferentes tiempos de exposicion mostraban una tenue pelicula de corrosion café rojiza formada sobre la superficie despues de un día de

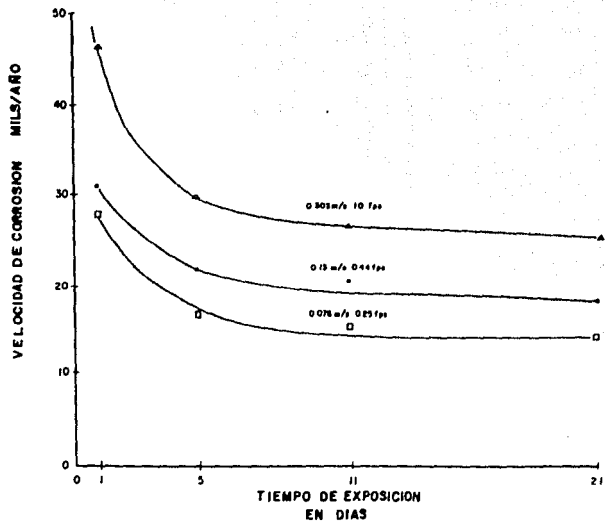


FIG. 4.4 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO EN LA INTENSIDAD DE CORROSION DEL ACERO NEGRO A TEMPERATURA AMBIENTE

exposicion. Como el tiempo de exposicion aumenta, esta pelicula se incrementa de grosor y de oscurecimiento de la capa interior, mientras que la capa mas externa permanece de un color cafe rojizo.

Despues de la eliminacion de los productos de corrosion sueltos de la superficie, una pelicula parcialmente dura, tenue, de material blanco, permanece, la cual no fue facilmente eliminada. La superficie metalica debajo de esta pelicula blanca no presentaba corrosion. La superficie limpia del inserto mostraba que la corrosion del metal no fue uniforme.

Los principales productos de corrosion identificados con los patrones de rayos x fueron: lepidocrocita ( $Fe(OH)_3$ ) y magnetita ( $Fe_3O_4$ ). La formacion de carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) tambien estaba indicada. Los resultados obtenidos de los patrones de difraccion de rayos x tambien demostraron que  $Fe_3O_4$  aumentaba con el incremento del tiempo de exposicion.

Los datos de calidad del agua a traves del experimento se muestran en la tabla siguiente y en la grafica No.4.5. Ningun quimico se agrego a la solucion de prueba para ajuste de los parametros despues de iniciado el experimento.

Analisis De Calidad Del Agua

Parametro	Tiempo De Exposicion-Dias				
	0	1	5	11	21
mg/L					
Calcio-Ca <sup>2+</sup>	19	19	16.3	16.3	14.7
Magnesio-Mg <sup>2+</sup>	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
Sodio-Na <sup>+</sup>	22	22	22	22	22
Cloruro-Cl <sup>-</sup>	35.5	35.5	35.5	35.5	35.5
Sulfato-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	22	22	22	22	22
Bicarbonato-HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	58.6	48.8	48.8	43.9	43.9
Hierro (disuelto) Fe <sup>3+</sup>	0	3.4	3.4	6.9	2.8
pH	7.93	7.97	7.97	7.92	7.85
Alcalinidad-CaCO <sub>3</sub>	48	40	40	36	36

Las concentraciones de los iones sodio, magnesio, cloruros y sulfatos no varían durante la prueba, mientras que los de calcio y bicarbonatos disminuyen con el aumento del tiempo de exposición. La concentración de hierro disuelto aumenta de 0.00 a 6.9 mg/L y posteriormente decae a 2.8 mg/L al final del experimento, seguida de considerable precipitación de óxido de hierro.

#### 4.0.7.4 Resumen

Aunque las condiciones de prueba y los insertos metálicos usados en estudios de planta piloto o laboratorio pueden no ser exactamente las mismas que las de los sistemas de distribución reales, las velocidades de corrosión obtenidas de las pruebas son significativas cuando se emplean, ya sea para medir las velocidades de corrosión de diferentes materiales en el mismo medio o para determinar la relativa corrosividad del agua por comparación de las velocidades de corrosión del mismo metal en

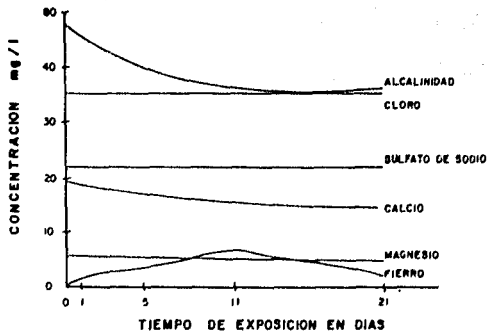


FIG. 4.5 EFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICION SOBRE LOS CAMBIOS EN LA CALIDAD DEL AGUA DURANTE EL ESTUDIO

aguas de diferente composición. En suma, esta técnica puede ser usada en estudios de campo por inserción de componentes dentro del sistema.

Las pruebas de circuito cerrado de tuberías, corresponde a condiciones de campo mejor que las pruebas estáticas o electroquímicas. Por lo tanto, los datos obtenidos son más útiles. El circuito cerrado en la tubería es una herramienta necesaria para estudios de corrosión, todas las veces que la velocidad sea el factor a ser considerado.

Al comparar los datos de pruebas de corrosión obtenidos de pruebas dinámicas en circuitos cerrados en tuberías, con aquellos obtenidos de pruebas estáticas o de métodos electroquímicos, un coeficiente de correlación podría ser determinado estadísticamente. Si los datos obtenidos de métodos electroquímicos se demuestran que son confiables entonces su uso podría ser recomendado, dado que el dato puede ser obtenido mucho más rápido por esta técnica.

En los estudios de laboratorio y a escala de planta piloto, los circuitos cerrados de tubería de PVC permiten al sistema completo ser reutilizado. Esto no puede ser hecho con los sistemas ISWS, los cuales usan tubería de metal.

#### 4.1 IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE MONITOREO.

La meta u objetivo de toda empresa publica que maneja agua potable, es producir una agua de la mejor calidad posible a un costo mínimo. Aunque la mayoría de las plantas de tratamiento suministran la calidad de agua deseada al consumidor, existen reportes de deterioro de la calidad del agua en los sistemas de distribución. En la mayoría de los casos de tales fallas de calidad del agua, pueden ser encontradas en un inadecuado tratamiento a la misma.

Los efectos de la deterioración son numerosos. El agua puede estar coloreada, puede tener una amplia variedad de olores y puede exhibir crecimientos biológicos. El tipo de deterioro depende sobre la calidad del agua tratada, modo de transportación y las características hidráulicas del sistema de transportación. En la búsqueda de medidas para aliviar el problema, llega a ser necesario evaluar el tipo de deterioro.

Un cambio en el contenido mineral del agua puede resultar de : tubos que están pobremente protegidos contra la corrosión, tratamiento inapropiado del agua, o inadecuada circulación de la misma a través de sistema.

Frecuentemente, la corrosión esta asociada con aguas blandas que contienen oxígeno disuelto. Las aguas con bajas alcalinidades tiene bajas capacidades reguladoras y tales aguas sirven como excelentes electrolitos para inducir o propagar la corrosión en un sistema de distribución. En comparación, con la dureza y la alcalinidad ocurre lo contrario, el pH parece ser menos importante en el control de la corrosión electrolítica. Una agua químicamente



estable con alta dureza de calcio y alta alcalinidad podría no ser corrosiva, aun si el pH se encontrara bajo y la concentración de oxígeno disuelto alta.

Se ha demostrado que la influencia acelerante del oxígeno disuelto en la corrosión, puede llegar a ser insignificante en aguas que tienen índice de saturación o de Langlier positivo, debido a que la velocidad de formación de las películas protectoras de calcita es también aumentada conforme se incrementa la concentración del oxígeno disuelto.

Las causas de falla de la calidad del agua son numerosas y variadas. En general, tales fallas depende sobre las características fisicoquímicas del agua tratada, los regímenes de flujo en las líneas de tubería y el tipo de material de tubería empleado en el sistema.

#### 4.1.0 Evaluación inicial de las características del agua de suministro.

Algunos terminos utilizados cuando se encuentra uno en la discusión del agua corrosiva son :

pH - Un pH bajo generalmente acelera la corrosión.

Oxígeno disuelto - El oxígeno en agua podría acelerar la corrosión particularmente de materiales ferrosos.

Capacidad reguladora reducida - Insuficiente alcalinidad para proporcionar capacidad reguladora para que el agua permita la formación de películas protectoras.

Elevada proporción de halógeno y sulfato a alcalinidad - una proporción de ácidos minerales fuertes mas grandes que la proporción de 1 : 2 resulta en condiciones favorables para

#### picaduras

Solidos disueltos (SDT) - Elevada concentracion de SDT aumenta la conductividad y puede aumentar la corrosion.

Silice - Peliculas protectoras con este material cubren superficies metalicas bajo condiciones favorables a estas.

Calcio - Peliculas protectoras se forman con suficiente alcalinidad y bajo condiciones favorables (dureza de calcio).

Fosfatos - Ortofosfatos y polifosfatos se utilizan en algunos casos para formar peliculas protectoras o para evitar la corrosion por otros mecanismos.

Temperatura - temperatura elevada puede aumentar la corrosion.

Velocidades de flujo - Las velocidades del agua a proporciones de flujo elevado permiten al oxigeno o al dióxido de carbono interactuar mas facilmente con la superficie del conducto, elimina peliculas protectoras y causa aumentos en la velocidad de corrosion.

Una agua de suministro que presenta caracteristicas corrosivas puede causar problemas en las lineas de tuberia de distribucion y en las lineas de tuberia de la instalacion domestica. Estos problemas pueden ser agrupados dentro de tres categorias : (1) Problemas de salud que resulten de la disolucion de ciertos metales u otras sustancias en el agua potable, ya sea de las tuberias de distribucion o de las de la instalacion domestica. (2) Problemas esteticos causados por la disolucion de ciertos metales en el suministro del agua potable y (3) Problemas economicos que resulten de una reduccion de la vida de servicio de

los materiales del sistema de conducción, ya sea de los sistemas de distribución o de la instalación doméstica.

#### 4.1.1 Evaluación de la corrosividad.

Las reglamentaciones existentes deberán presentar las siguientes características :

Exigir sistemas o métodos para determinar la presencia de materiales específicos de construcción de la tubería, en los sistemas de distribución.

Exigir monitoreo para los parámetros que tienen influencia sobre las características corrosivas del agua en los sistemas comunitarios.

Estimular la implementación de medidas de control de la corrosión para sistemas de distribución de aguas corrosivas.

Exigir a sistemas con aguas corrosivas y a materiales en sistemas de distribución propensos a la contaminación por corrosión, a aumentar la frecuencia de monitoreo para corrosión en los productos como el plomo, cadmio, zinc, cobre y hierro.

#### 4.1.1.0 Estudio de los Materiales de Construcción Empleados en los Sistemas de Tubería.

De los sistemas de agua comunitarios, deberán ser reportados al sector gubernamental encargado, los materiales empleados en los servicios de distribución y en las instalaciones domésticas.

Después de que los materiales de construcción son identificados, un programa de monitoreo debe ser establecido para ciertas características corrosivas. Esta información es útil para la selección de los sitios de monitoreo, para determinar donde el potencial de corrosión podría causar problemas de salud.

economicos o esteticos. Mas consideraciones se podrian otorgar tambien para sitios de flujo elevado o reducido, edad de la seccion y otros hechos pertinentes.

#### 4.1.1.1 Analisis de Calidad del agua.

Es importante efectuar analisis de calidad del agua de la fuente de suministro. Muestras para estos analisis deberan tomarse en un punto representativo a la entrada del sistema de distribucion, por lo tanto reflejara todos los ajustes del tratamiento final. Para sistemas con mas de una planta, las muestras deberan ser tomadas en cada planta en un punto representativo de la entrada. (la evaluacion de un abastecimiento de agua cruda, podria estar sujeto al mismo criterio). El monitoreo y reporte de la alcalinidad, pH, dureza, temperatura, solidos disueltos totales y el indice de langelier(IL) se requieren por lo menos dos veces al año para aguas superficiales y una vez al año para sistemas que conducen aguas de origen subterraneo. Las muestras deberan ser tomadas a temperaturas extremas del año (verano e invierno).

Es altamente recomendable que analisis adicionales sean corridos al menos sobre una base anual en : Calcio, conductividad, fierro, cloruros, sulfatos, fluoruros, color, zinc, cobre, plomo, cadmio, oxígeno disuelto y dióxido de carbono.

#### 4.1.1.2 Comparación De Indices De Corrosión.

Una vez que los parametros de calidad del agua han sido fijados, los siguientes indices potenciales de corrosion pueden ser determinados.

Indice de Langelier. Este es una expresion de la tendencia a

depositar o disolver incrustación de carbonato de calcio en una tubería.

Valores negativos son frecuentemente interpretados como señalamiento o indicación de un caso potencial de corrosión a través de una tendencia a disolver la incrustación.

El IL y otros cálculos asociados con la estabilidad del carbonato de calcio, podrían ser indicadores del potencial de corrosión de una agua, únicamente cuando la estabilidad del carbonato de calcio es el único mecanismo que controla la corrosión.

Índice de Ryznar. Este índice es calculado del pH de saturación del carbonato de calcio por la fórmula  $2 \text{pH} - \text{pH}_s$  y nos da una indicación de la tendencia relativa de incrustación o agresividad del agua. El depósito de incrustación de carbonato de calcio aumenta proporcionalmente como el índice cae abajo de 6, y aumenta la corrosión como se eleva sobre 6, con condiciones extremadamente agresivas para valores de 10 y más.

Proporción halógeno-alcalinidad. Las investigaciones hechas sobre la proporción de iones halógeno a alcalinidad, indican una relación entre cloruros y alcalinidad por bicarbonatos, determinada en una base molar, con notable aumento en corrosividad cuando la proporción excede 1:2 para aguas de abastecimiento.

#### 4.1.1.3 Comparación con Abastecimientos Similares.

Una medida prudente en la evaluación de la corrosividad de cualquier agua, es comparar su calidad con las de otros abastecimientos de naturaleza similar, particularmente para casos en los cuales estos han sido identificados como

corrosivos o no corrosivos.

Estos datos pueden ser suficientes para demostrar que una agua puede ser corrosiva o no corrosiva. Tambien debera conocerse si los materiales de construccion estan sujetos a corrosion o plantean problemas de salud. En pocas palabras, esta informacion puede resultar del todo necesaria para convencer que una agua no planteara un problema desde el punto de vista de corrosion.

Pero, si una agua es determinada que sera corrosiva, o si los materiales utilizados en la construccion pueden plantear problemas, un monitoreo ulterior probablemente sera requerido.

#### 4.2 SISTEMAS DE CONDUCCION Y DISTRIBUCION

Un número de lugares clave a través del sistema de agua pueden ser seleccionados y análisis de calidad de aguas, previamente descritos pueden ser efectuados. Una comparación debe realizarse entre la calidad del agua dentro del sistema de distribución y la de la fuente de suministro para determinar si cualquier cambio importante ha ocurrido.

Una revisión histórica debe realizarse en el pasado de las fugas de la tubería principal y de las fallas de equipo, para determinar si el daño fue por corrosión. Un programa deberá ser establecido para documentar problemas de corrosión, que incluyan observaciones visuales de cupones utilizados en la tubería principal, inspección de las paredes interiores de la línea de tubería cuando el sistema está fuera de operación, inspección de válvulas viejas removidas del sistema y documentación de roturas y fugas en el sistema.

##### 4.2.0 Determinación Inicial de la Potencialidad de la Corrosión

Una vez que los datos han sido analizados y revisados, una determinación deberá realizarse, de si existe o no un problema potencial de corrosión interna en el sistema de distribución. Esto puede ser efectuado comparando los resultados de los análisis con los valores de las tablas 1 y 2 las cuales enlistan los niveles máximos permitidos de contaminantes para sustancias inorgánicas especificados por la reglamentación de EPA.

Si un número importante de los parámetros y características listadas indican que el agua posee tendencias corrosivas, entonces

sería apropiado empezar un programa de investigación de campo y más análisis.

#### 4.2.1 Análisis de Laboratorio e Investigación de Campo.

Si la evaluación conducida previamente, indica importante corrosión interna en el sistema, se deberá proceder con un detallado programa de muestreo de calidad del agua y una investigación de campo, para determinar el tipo y la amplitud de

muestreo de calidad de agua. Se debe determinar si la corrosión está afectando la calidad del agua en el sistema de conducción y distribución. Una vez que se realice el análisis de calidad de agua en el punto donde la corrosión se está produciendo, los resultados de conducción deben de ser comparados con los resultados obtenidos en otros puntos, entonces comparados con los resultados obtenidos en varios lugares dentro del sistema. El programa de muestreo debe incluir variables tales como: zonas de suministro diferentes, zonas de presión diferentes, zonas de tratamiento dentro del sistema, zonas de almacenamiento, contenedores abiertos y de almacenamiento. Los parámetros apropiados deben de ser seleccionados basándose en la composición del material que está siendo usado. Por ejemplo, si la línea de conducción es de concreto y los recipientes de almacenamiento también son de concreto, los parámetros lógicos son: pH, alcalinidad y dureza. En la tabla 3 existe los parámetros sugeridos para el análisis de agua de diferentes tipos de material de tubería. Este es un listado completo de todos los componentes



sería apropiado empezar un programa de investigación de campo y más análisis.

#### 4.2.1 Análisis de Laboratorio e Investigación de Campo.

Si la evaluación conducida previamente, indica importante corrosión interna en el sistema, se deberá proceder con un detallado programa de muestreo de calidad del agua y una investigación de campo, para determinar el tipo y la amplitud de la corrosión.

Programa de muestreo de calidad de agua.

Debe de determinarse si la corrosión está afectando la calidad del agua en el sistema de conducción y distribución. Una línea base de análisis de calidad de agua en el punto donde la fuente de suministro entra a la línea de conducción deben de ser llevados a cabo. Los resultados son entonces comparados con análisis de muestras colectadas en varios lugares dentro del sistema de distribución. Este examen debe incluir variables tales como fuentes de suministro diferentes, zonas de presión diferentes, formas secundarias de tratamiento dentro del sistema de distribución, recipientes contenedores abiertos y de diferentes tipos de líneas de tubería. Parámetros apropiados deben analizarse basandose en la composición del material que están siendo usado, por ejemplo, si la línea de conducción es de cilindros de concreto y los recipientes de almacenamiento también son de concreto, los parámetros lógicos son : pH, alcalinidad y dureza de calcio. La tabla 3 enlista los parámetros sugeridos para análisis de calidad de agua de diferentes tipos de material de tubería. Esta no es una lista completa de todos los componentes

que necesitan ser analizados bajo condiciones potenciales de corrosión, pero esta nos indica la razón a ser seguida en la selección de los parámetros para análisis.

TABLA 1

Niveles Máximos Permisibles	
De Contaminantes Inorgánicos	
Contaminante	µg/L
Arsénico	0.05
Bario	1.0
Cadmio	0.01
Cromo	0.05
Plomo	0.05
Mercurio	0.002
Selenio	0.01
Plata	0.05

TABLA 2

Niveles Máximos Permisibles	
De Contaminantes Secundarios	
Parámetro	Nivel
Color	15 unidades
Fierro	0.3 mg/L
Manganeso	0.05 mg/L
cobre	1.0 mg/L
Zinc	5.0 mg/L

TABLA. 3

Parámetros Recomendados Para Analisis De Calidad De Agua

Material De Tubería	Parámetros
Fierro Ductil y Fierro Fundido	Fierro, Manganeso, Color Conductividad , Oxígeno disuelto.
Tubería revestida	pH, Alcalinidad, Calcio, Plomo.
Acero	Fierro, Manganeso, Color, pH Conductividad , Oxígeno Disuelto.
Cilindro De Concreto	pH, Alcalinidad, Calcio, Conductividad.
Asbesto Cemento	pH, Alcalinidad, Calcio, Fibras de asbesto, Conductividad.
Acero Galvanizado	Zinc, Cadmio, Plomo, Fierro, Oxígeno disuelto, pH, Color, Conductividad.

4.2.2 Tubería y Programa de Cupones Prueba.

Despues que el programa de muestreo de calidad del agua se ha llevado a cabo. Un siguiente paso que se sugiere es desarrollar un programa de investigación de campo, para reunir especímenes de tubería para su evaluación. Normalmente, la recolección de secciones de tubería o de válvulas es una tarea relativamente simple, pero la evaluación es mucho mas difícil.

La sociedad americana de pruebas y materiales (ASTM) ha desarrollado procedimientos de norma para cupones de prueba en tubería. Las metodologías que han sido exitosamente utilizadas en el pasado, para el desarrollo del muestreo en tuberías y programas de prueba en plantas piloto son las siguientes : Inspección visual, microfotografías, pérdida de peso, sondas de corrosión, que ya fueron revisadas en el anterior apartado, contándose además con :

#### Potencial de picadura.

La corrosión por picaduras (corrosión en la cual las profundidades de picadura son  $> 25\%$  del ancho de picadura) puede causar falla en la tubería por penetración de la pared de la misma. La profundidad de la picadura del espécimen de prueba y de secciones de tubería, pueden usualmente ser medidas con un micrómetro. El cálculo de velocidad de picado es útil en la predicción de la vida de la tubería para varios materiales y condiciones de agua.

#### Análisis De Incrustación.

El análisis del recubrimiento o incrustación encontrado en una pared de tubería es importante debido a que puede dar una indicación de porque la tubería está protegida o esta deteriorándose.

El análisis de incrustación puede también ser utilizado para determinar la efectividad de un método de tratamiento diseñado para precipitar un recubrimiento específico.

#### Pérdida de cabeza.

Un método común de indicación de la condición del interior de una tubería es la medición de la pérdida de cabeza a través de una

longitud específica de tubería y comparar la lectura con la de una tubería en buenas condiciones. Este método indicará si la tubería se está obstruyendo con tubérculos u otro tipo de incrustaciones, pero no determinará penetración o velocidad de adelgazamiento.

#### 4.2.3 Registro de fugas

La revisión del registro de fugas puede indicar problemas en un sistema de distribución de la empresa, incluyendo su severidad. Existen muchas causas de fuga: instalación inapropiada de la tubería, movimiento de tierra por temblores o por uso de equipo pesado. Muchas fugas no están relacionadas a corrosión interna; a pesar de eso, el registro de fugas son una de las herramientas más fácilmente disponible que no podría ser pasada por alto en una evaluación de corrosión.

#### 4.2.4 Programa De Muestreo De Carbón.

Varios métodos son útiles para muestreo y evaluación de la condición del sistema de captación y distribución. Si las líneas de transmisión son largas, una inspección a pie de ciertas secciones podría ser valioso. Recipientes de distribución y tanques pueden también ser investigados en esta manera. En el sistema de distribución, llaves de grifo de la tubería y secciones de la misma que van a ser removidas o reparadas nos dan un excelente registro de las condiciones del sistema, si los especímenes son almacenados apropiadamente y exactamente etiquetados. La información deberá incluir quien removió el tubo, de donde fue removido, porqué fue removido, su condición hasta que se removió, su edad y otras notas pertinentes. Los accedores y las válvulas pueden también ser inspeccionadas como parte de la rutina

del programa de mantenimiento. Usando metodos tales como inspeccion visual, determinacion de perdida de peso, profundidad y velocidad de picadura, analisis de incrustacion, lecturas de perdida de cabeza y revision del registro de fugas, la amplitud de la corrosion puede ser documentada y la magnitud cuantificada.

**CAPITULO.V**

**NORMAS PARA LA PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CORROSIÓN**

## CONTENIDO

### CAPITULO V. NORMAS PARA LA PREVENCION Y CONTROL DE LA CORROSION

#### 5.0 NORMAS PREVENTIVAS

##### 5.0.0 NORMAS DE CALIDAD

5.0.0.0 NORMA OFICIAL MEXICANA 8-70

##### 5.0.1 NORMAS TECNICAS DE PROYECTO

5.0.1.0 NORMAS DE PROYECTO PARA OBRAS DE  
APROVISIONAMIENTO DE AGUA POTABLE EN  
LOCALIDADES URBANAS DE LA REPUBLICA. SARH

5.0.1.1 NORMAS TECNICAS PARA PROYECTOS DE PLANTAS  
POTABILIZADORAS DE SAHOP

5.0.1.2 NORMAS PARA PROYECTOS DE OBRAS. PEMEX

5.0.1.3 NORMAS GENERALES DE CONSTRUCCION. D.D.F

#### 5.1 NORMAS DE CONTROL

5.1.0 NORMAS DE PROYECTO PARA OBRAS DE APROVISIONAMIENTO  
DE AGUA POTABLE EN LOCALIDADES URBANAS DE LA  
REPUBLICA MEXICANA. SARH

5.1.0.0 EVALUACION DE LA CONSERVACION DEL SERVICIO  
DE AGUA POTABLE



## 5.0 NORMAS PREVENTIVAS.

### Normas para el Material de Tubería.

A través de los años, las especificaciones de norma han sido desarrolladas en México por la participación de : las autoridades de la secretaria de comercio y fomento industrial (SECOFI), usuarios (Departamento del Distrito Federal, Secretaría de Recursos Hidráulicos y Petróleos Mexicanos) y fabricantes de tubería, a través de comités consultivos de normalización; estandarizando tipos y tamaños de tubo, accesorios, métodos de fabricación, dimensiones, resistencia a la tensión, clasificación, métodos de prueba y criterios para la aceptación.

#### 5.0.0 Normas de Calidad

De esta manera se están obteniendo las normas de calidad, cuyo principal objetivo es el establecimiento de las características que deben satisfacer un material, artículo o producto, para garantizar la aptitud para el uso al que está destinado.

Las especificaciones de norma actualmente cubren tuberías de: fierro fundido, fierro ductil, concreto, acero y asbesto cemento, los cuales son los materiales ordinariamente usados para líneas de tubería de agua.

##### 5.0.0.0 Norma Oficial Mexicana B-70.

Tubos sin costura o soldados de acero al carbón para pozos de agua.

Esta norma oficial mexicana establece los requisitos que deben cumplir los cuatro tipos de tubo de acero al carbón, roscados y con cople, para emplearse en pozos de agua y

conduccion.

No establece ninguna prueba de corrosion solamente señala Factores que afectan la resistencia a la corrosion como lo son : composicion quimica (fosforo max. 0.05% y azufre max. 0.05%), acabado de superficie (libre de fallas o defectos en la superficies de los tubos) y recubrimiento de galvanizado para casos en que sea requerido).

Se deja a criterio del comprador determinar las caracteristicas necesarias que deban tomarse en cuenta para la seleccion del material.

#### 5.0.1 Normas Tecnicas de Proyecto

Las normas de calidad se complementan en su aplicacion con los instructivos de ejecucion de proyectos de obra de agua potable (instalacion, fijacion de las condiciones : hidraulicas, de trazo, de resistencia, de conservacion y proteccion) que son elaborados por los usuarios, que les denominan Normas de proyecto o de sistema. Estas normas comprenden tres aspectos tecnicos que hay que cumplir: que son los de las ingenierias : sanitaria, hidraulica y constructiva o de obra civil.

Dentro de estos aspectos, los que se encontraron que están relacionados a la corrosion fueron los siguientes :

5.0.1.0 Normas de proyecto para obras de aprovisionamiento de agua potable en localidades urbanas de la república. SARH.

### Capitulo III. Obras de Captacion.

#### 3.1 Tomas en aguas superficiales.

C). La estructura inmediata a la transicion se proyectara

para que la velocidad sea en esta parte de la obra de toma de 0.6 m/s o mayor, a fin de evitar azolves. El límite máximo de velocidad permisible estará fijado por las características del agua y el material del conducto.

Nota. no se encontro el criterio para aplicarlo al límite máximo de velocidad.

#### Capitulo V. Obras de Conduccion.

##### 5.1 conduccion por gravedad.

2. Tuberías. El empleo de tuberías en conducciones permite hacer el análisis hidráulico de los conductos trabajando como canal o a presión, dependiendo de las características topográficas que se tengan. En cualquier caso, la velocidad mínima de escurrimiento será de 0.5 m/s, para evitar el asentamiento de partículas que arrastra el agua. La velocidad máxima permisible para evitar erosión será la que se indica en la siguiente tabla :

Tubería	m/s
De concreto simple hasta 0.45 m de diámetro .....	3.0
De concreto reforzado de 0.6 m de diámetro o mayores...	3.5
De asbesto cemento .....	5.0
De acero galvanizado .....	5.0
De fierro fundido .....	5.0
De acero sin revestimiento .....	5.0
De acero con revestimiento .....	5.0
De polietileno .....	5.0
De PVC (cloruro de polivinilo) .....	5.0

##### 5.3 Consideraciones Generales.

2. Es de desearse que las tuberías de cualquier material que

sean, queden alojadas en canjas para obtener la máxima protección. Sin embargo, tuberías de acero o fierro fundido se podrán instalar superficialmente garantizando su protección y seguridad. En el caso de tuberías de acero, se deberán proteger interior y exteriormente contra la corrosión.

5.0.1.1 Normas técnicas para proyectos de plantas potabilizadoras de SANOP.

4. Procesos de potabilización de las aguas.

4.1 Clarificación.

4.2 Desinfección.

4.3 Acondicionamiento Químico.

4.4 Acondicionamiento organoleptico.

4.3 Acondicionamiento Químico.

Tiene por objeto, por lo general, la eliminación de sustancias o iones químicos, ya sea por dos razones: catárticas (sulfato o cloruro de sodio), Económicas (sales de calcio, fierro y manganeso), de salud (flúor), de estabilización (pH).

4.3.1. Ablandamiento.

Eliminación de dureza originada por sales de calcio que provocan incrustación, que con el tiempo resultará en un problema económico al afectar las redes de distribución.

4.3.2. Desmineralización.

Se utiliza para reducir el contenido de sulfatos y cloruros.

4.3.3. Desferrización y desmanganización.

Se remueven fierro y manganeso para aguas de origen subterráneo (pozos).

#### 4.3.4. Estabilización.

Cuando las aguas son poco mineralizadas, o su pH de saturación es negativo, para evitar los efectos corrosivos del agua se estabiliza, adicionando cal (hidróxido de sodio) o polifosfatos dependiendo del caso o estudio económico.

#### 5.0.1.2 Normas para proyectos de obra. FENEX.

##### Norma 2.132.01

Sistema de protección anticorrosiva a base de recubrimientos.

Esta norma establece los requisitos mínimos de selección de sistemas de protección anticorrosiva a base de recubrimientos para superficies de hierro y acero expuestas a diferentes condiciones de exposición. No incluye la protección externa de tuberías y estructuras enterradas.

##### A.02 Terminología

A.02.a El término "recubrimientos anticorrosivos" se refiere a todas las pinturas y productos que se usan para prevenir la corrosión de tuberías, estructuras metálicas por aislamiento del medio.

A.02.b Por "condiciones de exposición" se entiende el medio ambiente a que están expuestas las instalaciones.

A.03 Los recubrimientos anticorrosivos se denominan en general: primarios, enlaces, acabados y especiales. Llevan en particular el nombre específico relativo a su composición como: cromato de zinc, zinc inorgánico, etc. En otros casos se denominan de acuerdo a su uso tal como: antivegetativo, asfalto para tanques, etc.

##### C Condiciones de Exposición

### C.01 Generalidades

A continuación se describen los ambientes y exposiciones comunes en las instalaciones de Petróleos Mexicanos. Para el caso de tuberías únicamente se expone el apropiado.

#### C.09 Exposición al agua potable

Son las condiciones existentes en interiores de tanques y recipientes para agua potable.

### D Sistemas para cada tipo de exposición

#### D.01 Generalidades

En una tabla se describen las características de los sistemas para cada condición de exposición. Se incluyen los requisitos de preparación de superficie, tipo de primario y acabado, número de manos y espesor en mils (milésimas de pulgada) de película seca de cada uno de ellos, así como el sistema de aplicación recomendado.

#### Norma 3.132.01

Preparación de Superficies, Aplicación e Inspección de Recubrimientos para protección anticorrosiva

### A Definiciones

#### A.01 Alcance

Esta norma establece los requisitos mínimos para la preparación de superficies, aplicación e inspección de recubrimientos para la protección anticorrosiva de las instalaciones de Petróleos Mexicanos de acuerdo a la norma FOMEX

#### 3.132.01

### D Requisitos de Ejecución

#### D.01 Preparación de superficies

#### D.01.a Generalidades

Para el buen comportamiento de un recubrimiento es indispensable la correcta preparación de la superficie por cubrir. Los métodos que se emplearán según lo indique el proyecto, son los siguientes :

- 1) Limpieza química: Femex LQ-80
- 2) Limpieza manual: Femex LM-80
- 3) Limpieza con abrasivos: Femex LA-80

#### D.02 Aplicación

##### D.02.a Generalidades

Una vez cumplidos los requisitos de preparación de la superficie, la aplicación de los recubrimientos se efectúa por aspersión, brocha o rodillo. En algunos casos se emplean los procedimientos de inmersión o manual.

#### D.03 Fallas de Recubrimiento

##### D.03.a Generalidades

Quando la protección no ha sido efectiva durante el plazo esperado, puede atribuirse a fallas originadas por mala preparación de la superficie, selección inadecuada del material, deficiente calidad del mismo, incorrecta aplicación del recubrimiento, condiciones atmosféricas inapropiadas durante la aplicación, inspección deficiente, o por la combinación de algunas de estas causas.

#### E Criterios de Medición

E.01 Los trabajos de preparación de superficies y protección anticorrosiva se medirán en el lugar de ejecución tomando como base el proyecto y con las unidades que se indican a

continuación:

E.01.a En los trabajos antes mencionados efectuados en tanques, recipientes y similares, la unidad será el metro cuadrado.

E.01.b La unidad de medición para los trabajos efectuados en líneas de conducción, tuberías y similares será el metro lineal.

Norma 4.132.01

Requisitos de Calidad

A Definiciones

A.01 Alcance

Esta norma establece las características, los requisitos mínimos de calidad, de composición, así como las pruebas físicas y químicas de los recubrimientos para la protección anticorrosiva de las instalaciones de Petróleos Mexicanos.

C Requisitos de Aceptación

C.01 Especificación: Del recubrimiento recomendado

Contiene: Denominación, generalidades, características, usos, aplicación, acabado, tablas de características y pruebas físicas, de composición y de pruebas químicas.

D Requisitos de manejo e identificación.

contiene: envasado, transporte, almacenamiento e identificación de los recubrimientos.

Norma 5.132.01

Muestreo y Pruebas.

A Definiciones

A.01 Alcance

Esta norma establece los procedimientos para el muestreo



y pruebas que deberán efectuarse a los recubrimientos empleados en la protección anticorrosiva de las instalaciones de Petróleos Mexicanos.

#### C Control de Calidad Durante la Fabricación

Quando se requiera efectuar algún control de calidad durante la fabricación de los recubrimientos, en tal caso, Petróleos Mexicanos especificará las pruebas a realizar y las normas en que se basarán dichas pruebas.

#### D Obtención de muestras

De cada lote de 400 lit o fracción, se realizará un muestreo al azar para obtener una muestra de un litro, la que será representativa del lote. Dichas muestras serán sometidas a todas las pruebas y análisis indicados en la especificación correspondiente. En caso de tener alguna falla en cualquiera de las pruebas, el lote será rechazado.

#### E Métodos de prueba

En cada uno de los métodos de prueba que aparecen a continuación, se indica la preparación de las muestras, los aparatos requeridos para la prueba, los procedimientos para efectuar la prueba y los resultados e interpretación de las mismas.

Contiene los siguientes métodos :

tiempo de secado, estabilidad, flexibilidad, adherencia, interpenetración acelerada, prueba salina, densidad, viscosidad, finura, retenido en malla U.S. 200, aplicación y apariencia, poder cubriente, prueba de curado, resistencia a la alta temperatura, compatibilidad, pruebas de inmersión, contenido

de pigmento, bixido de titanio, negro carbon, amarillo y naranja croco, rojo toluidino, naranja molibdato, azul de hierro, amarillo, cafe, y rojo oxido de hierro, verde croco, azul de ftalocianina, polvo de aluminio, nio, polvo de zinc, pigmentos crocoato de zinc-oxido ferrico, oxido de cobre, materia volatil, agua libre, brea, grasa extraible con acetona, resina alquidolica, anhido ftalico, aceites secantes, polialcoholes, resina vinilica, resina epoxica, resinas amida y poliamicida, resina acrilica, resina fenolica, silicatos, resina de silicon, acido rosferico, resina vinil alquidolica, hule clorado, poliuretanos, abollamiento por presion, resistencia a la abrasion, resistencia al impacto, coeficiente de friccion, desprendimiento (cohesion), dureza de lapiz y porosidad.

5.0.1.3 Normas Generales de Construccion Vol. 5 . D.D.F

Tuberia de acero y conexiones	5.39
tuberia para instalaciones hidraulicas	5.39.1

	Indice	Contenido
5.39.1.01	Definicion	Terminos empleados en sistemas de tuberia de acero.
5.39.1.02	Clasificacion	Diversas clasificaciones existentes en tuberia de acero.
5.39.1.03	Referencia	Normas de otras instituciones que sirven de referencia.
5.39.1.04	Requisitos	Entre los requisitos de

		fabricacion, composicion quimica, caracteristicas fisicas.
5.39.1.05	Muestreo	Especificaciones de muestra.
5.39.1.06	Metodos de prueba	Pruebas de calidad efectuadas a las muestras.
5.39.1.07	Bases de aceptacion	Requisitos para cumplir y tolerancias.
5.39.1.08	Rechazos	Criterio aplicado para el rechazo del material.

Los capitulos que se consideran que tienen que ver con los aspectos preventivos de problemas de corrosion son : Requisitos y Rechazos, debido a que establecen la composicion quimica y la condicion de superficie respectivamente.

Se tienen como referencia a las normas de calidad, muestreo y pruebas de la Direccion General de Normas de SECOFI.

## 5.1 NORMAS DE CONTROL

Se podría decir que tales normas de proyecto deben contener normas o procedimientos para el control de la corrosión, sin embargo no son específicas en cuanto a la instrumentación de dicho control.

5.1.0 Normas de proyecto para obras de aprovisionamiento de agua potable en localidades urbanas de la Republica Mexicana. SARH.

5.1.0.1 Evaluación de la conservación del servicio de agua potable

Capítulo. I Información Básica para Elaboración Proyecto

1.2 Servicio Actual de Agua Potable

6. Distribución. Plano de red indicando

C) longitud, diámetros y clase de tubería

G) estado de conservación

Nota. No se establece que clase de pruebas se efectúan, como se interpretan y frecuencia con que se aplican para evaluar la conservación.

**CAPITULO. VI**  
**CONCLUSIONES**

1. El oxígeno, que es el gas disuelto predominante en las aguas potables (10 ppm en algunas), es necesario para que se efectúe la corrosión del hierro a temperatura ambiente en aguas con un pH próximo a la neutralidad, pero sin embargo, también es necesario para la formación y mantenimiento de la capa protectora calcárea formada en aguas duras. Por lo anteriormente expuesto, el dato de concentración de oxígeno disuelto en una agua potable, no es concluyente para los resultados del proceso de corrosión, sino que habrá que tomar en cuenta otros factores que alteran su efecto.

2. Para propósitos prácticos, el oxígeno disuelto se considera un estimulador e intensificador de la corrosión en todos los ambientes, excepto en los siguientes: en donde exista altos valores de pH (9 a 12) y en presencia de inhibidores que funcionen en concordancia con el oxígeno.

3. Los efectos de la corrosión en las líneas de tubería son los siguientes:

- a. Agua roja que mancha accesorios y todo lo que sea lavado con ella.
- b. Productos de corrosión que obstruyen medidores y líneas de servicio.
- c. Pérdidas en la capacidad de conducción de tuberías distribución debido a la tuberculación.
- d. Fugas en tuberías principales de distribución y líneas de servicio.
- e. Reducción de la vida útil del sistema de distribución.
- f. Deterioro de la calidad del agua potable.

4. La corrosión es un proceso dinámico. Cambia con el tiempo o, dicho de otra manera, la velocidad de corrosión cambia con el tiempo. El control de la corrosión esencialmente significa reducción de la velocidad de corrosión a límites aceptables (0.05 mm/año, esto es, al cabo de 25 años de vida económica la reducción tolerada del espesor del componente no es mayor de 1 o 2 mil). Con el fin de realizar esto las técnicas de control de la corrosión deberán también ser dinámicas. Por ejemplo, los inhibidores de corrosión deben ser agregados frecuentemente para mantener la protección. Esto significa que el sistema de distribución debe de ser monitoreado y efectuar cambios en los procedimientos de control de acuerdo a los cambios de la corrosión.

5. En lo que respecta al efecto del material de tubería en la velocidad de corrosión interna de la misma, no existe diferencia apreciable entre las de las tuberías de fierro ductil, de fundición y la de acero, por lo que la selección está dictada por los problemas de corrosión externa.

La velocidad de corrosión en los sistemas de tubería de agua potable tienden aumentar por :

- . Conexión directa entre diferentes metales o aleaciones.
- . Áreas sujetas a esfuerzos estructurales debido al soldado o trabajo en frío.
- . Electrolito de alta conductividad.
- . Aereación, oxígeno disuelto y diferencias en concentración del oxígeno disuelto.
- . Alta concentración de cloruros y sulfatos contra la de carbonatos.

- . Condiciones que tengan tendencia a acidificar el medio.
- . Elevación de temperatura.
- . Altas velocidades de flujo y turbulencia.
- . Presencia de la bacteria reductora del sulfato.

6. La química del agua es increíblemente compleja. El contenido mineral del agua y de ahí su efecto corrosivo, varía de pozo a pozo, de lago a río y de ciudad a ciudad. En muchos lugares esto también varía de acuerdo a la estación del año; y las propiedades de una agua en verano podrían ser muy diferentes de aquellas del agua que provienen de la misma fuente de suministro en invierno. La naturaleza del tratamiento dado a una agua también cambian su efecto sobre los metales. El tratamiento o almacenamiento podría exponer al agua al aire, así que sino estaba saturada con oxígeno originalmente, lo puede estar al final del tratamiento. Todo esto podría acelerar las tendencias corrosivas del agua y los compuestos agregados o eliminados durante el tratamiento podrían ulteriormente cambiar las propiedades del agua cruda original. El problema es complicado por el hecho de que la corrosividad de una agua es difícil de examinar. Una muestra se extrae de un sistema y se envía a un laboratorio para su análisis, pero las propiedades de la muestra podrían haber cambiado antes de llegar al laboratorio. Las pruebas de corrosividad del agua hechas en un laboratorio a partir de la muestra de agua son, por lo tanto, de muy poco valor. La muestra en un laboratorio no es completamente representativa del agua en el sistema de tubería.

7. Las aguas blandas, dureza media y con altos contenidos de sales de sulfatos y cloruros son problemáticas para los sistemas



de tubería de agua potable, ya que producen desde corrosión uniforme en aguas blandas hasta picaduras en las de dureza media y de alta concentración de sulfatos y cloruros. Deberá ser tomada en cuenta la posible influencia directa o en forma secundaria de la contaminación del agua y la presencia de varios organismos.

8. La dependencia entre la velocidad de corrosión y el flujo del electrolito es complicada. No obstante, desde el punto de vista del diseño, esto generalmente no importa.

De este modo, suponiendo que el material empleado en la tubería resiste adecuadamente la corrosión, la duplicación o triplicación de la rapidez de flujo que se produce debido a la ligera turbulencia localizada en accidentes de la superficie, tales como juntas, no es perjudicial. La rapidez de flujo se vuelve importante cuando se sobrepasa el límite de 5 m/s en cualquier punto, puesto que la cavitación puede conducir a un rápido ataque.

Sin embargo, se recomienda no sobrepasar la velocidad de flujo de 2.4 m/s, porque de acuerdo a estudios realizados tenemos la conclusión de que, a valores más altos se cuadruplican y hasta veces se multiplican por 30 veces los valores de corrosión.

9. La documentación de fallas, las pruebas de laboratorio o a nivel planta piloto y el monitoreo continuo del sistema de tubería de agua potable son una herramienta eficaz para el control de la corrosión en dichos sistemas. Esto ha quedado patente a través de la experiencia obtenida en la operación de dichos sistemas.

## BIBLIOGRAFIA

1. CORROSION AND ITS PREVENTION IN WATERS  
BUTLER GEORGE Y H.C.K. ISON  
NEW YORK REINHOLD, 1966
2. CORROSION AND CORROSION CONTROL  
H.H. UHLIG  
WILEY & SONS, 1972
3. CORROSION : CAUSES AND PREVENTION  
SPELLER, FRANK N.  
MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC. 1935
4. HANDBOOK OF METALIC CORROSION  
SHEIR  
PERGAMON, PRESS
5. CORROSION Y OXIDACION  
JOHN M. WEST  
EDIT. LIMUSA SA, DE CV. 1986
6. CORROSION  
REV. WATER AND WASTEWATER ENGINEERING VOL. 12, No. 3, 1975  
ROBERT CHAPLIN
7. THE PIPING CORROSION CONTROL  
RESEARCH AND TECHNOLOGY. REV JAWWA, AGOSTO 1984  
J.E. SINGLEY & T. LEE
8. CORROSION Y TRATAMIENTO DE AGUA  
REV. SOC. QUIM. MEX. VOL. 32 No. 1, 1988  
JOSEFINA DE GYVES M - JOAN GENESCA LLONGUERAS
9. LABORATORY TECHNIQUE FOR MEASUREMENT OF pH FOR CORROSION  
CONTROL STUDIES

REV. JANNA, RESEARCH AND TECHNOLOGY

MICHAEL R. SHOCK, WILLIAM MUELLER AND RALPH W. BUELOW

10 CORROSION: INDUSTRIAL PROBLEMS, TREATMENT AND CONTROL TECHNIQUES

PERGAMON PRESS, 1987

WATER QUALITY AND CORROSION CONTROL FOR MANAGEMENT

C.C. WRIGHT