



122  
20j

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

**" CORROSION EN CONCRETO ARMADO EN  
PRESENCIA DE CLORUROS: EFECTO DEL TIPO DE  
CEMENTO Y DE LA RELACION AGUA - CEMENTO "**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERA QUIMICA**

**P R E S E N T A :**

**NORMAN RUIZ GARCIA**



MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

PRESIDENTE: Prof. Joan Genescá Llongeras.  
VOCAL: Prof. Aurora de los Angeles Ramos Mejía.  
SECRETARIO: Prof. Tezozomoc Pérez López.  
1º SUPLENTE: Prof. Francisco Javier Rodríguez Gómez.  
2º SUPLENTE: Prof. Carlos Rodríguez Rivera.

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

Laboratorio de Corrosión (L-211),  
Edificio "D".  
Facultad de Química, U.N.A.M.

**ASESOR DEL TEMA:**

  
\_\_\_\_\_  
M. en C. Tezozomoc Pérez López.

**SUSTENTANTE:**

  
\_\_\_\_\_  
Norman Ruiz García.



**DEDICATORIAS  
Y  
AGRADECIMIENTOS.**

- ❖ **À MI MAMÀ CATHY, A MI PAPÀ JULIÁN Y A MIS HERMANOS PAUL ARTURO Y M<sup>ª</sup> DE LOS ANGELES:**

**"SABIENDO QUE JAMÁS EXISTIRÁ UNA FORMA DE AGRADECER TODA UNA VIDA DE LUCHA, SACRIFICIO Y ESFUERZOS CONSTANTES SÓLO QUIERO QUE SIENTAN QUE EL OBJETIVO LOGRADO TAMBIÉN ES SUYO Y QUE LA FUERZA QUE ME AYUDO A CONSEGUIRLO FUE SU INCONDICIONAL APOYO.**

**SU FORMA DE LUCHA FUE MI IDEAL, SU SACRIFICIO MI ALIENTO Y SU ESFUERZO CONSTANTE LA FUERZA DE MI VOLUNTAD"**

- ❖ **À MIS ABUELITOS, POR TODO EL CARIÑO QUE DE ELLOS RECIBÍ, OBTENIENDO ASÍ UNA NIÑEZ FELIZ Y UN EJEMPLO A SEGUIR.**
- ❖ **À "TODOS" MIS TÍOS Y MIS PRIMOS, POR QUE JUNTOS SOMOS EL MEJOR EQUIPO, Y MUY EN ESPECIAL A MI TÍO ALFREDO, YA QUE CON SU EJEMPLO ME INCULCÓ EL DESEO DE SUPERACIÓN.**
- ❖ **À ELIABETH RODRÍGUEZ G., AMALIA TAPIA R. Y FAMILIA, POR SER UN APOYO IMPORTANTE EN MI VIDA Y POR QUE GRACIAS A SUS PALABRAS DE ALIENTO HE LOGRADO ALCANZAR MI OBJETIVO.**
- ❖ **À "TODOS" MIS AMIGOS DE LA FACULTAD DE QUÍMICA, DEL CELE, DEL CUC Y DEL CCH, LES DOY LAS GRACIAS POR TODOS LOS MOMENTOS QUE COMPARTIMOS, DENTRO Y FUERA DE LA ESCUELA.**

**"JUNTOS FUERON MÁS LLEVADEROS LOS MOMENTOS CRÍTICOS Y EXTREMADAMENTE DIVERTIDOS MUCHOS OTROS. PUEDO DECIR QUE SIEMPRE HEMOS LUCHADO Y OBTENIDO LO QUE MÁS ANHELAMOS, A PESAR DE LO QUE NOS TOQUE VIVIR."**

**SE QUE NO ES NECESARIO PONER SUS NOMBRES YA QUE CADA UNO DE USTEDES SABEN LO IMPORTANTE Y VALIOSO QUE SON PARA MI.  
GRACIAS POR EXISTIR.**



- ❖ A TODOS LOS PROFESORES QUE HE TENIDO A LO LARGO DE MI EXISTIR, Y EN ESPECIAL A AQUELLOS QUE CON SU ENSEÑANZA ME MOTIVARON PARA ESTUDIAR LA CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA.
- ❖ A LA UNAM Y A LA FACULTAD DE QUÍMICA, POR EL LUGAR QUE ME RESERVÓ EN SUS AULAS, LABORATORIOS Y BIBLIOTECA, ENSEÑÁNDOME EL VALOR QUE POSEE EL CONOCIMIENTO. ADEMÁS LE DOY MIL GRACIAS POR HABER SIDO UNA SEGUNDA CASA PARA MÍ.
- ❖ AL M. EN C. TEZOMOC PÉREZ LÓPEZ, POR ASESORARME DURANTE LA PRESENTE TESIS Y POR ENSEÑARME A APLICAR LOS CONOCIMIENTOS ADQUIRIDOS DE UNA MANERA PRÁCTICA Y ÚTIL A LA HUMANIDAD.
- ❖ A TODOS LOS INTEGRANTES DEL GRUPO DE CORROSIÓN POR APOYARME EN LA PRESENTE TESIS, EN ESPECIAL A:  
DR. JOAN GENESCÀ LLONGUERAS  
I. Q. M. CARLOS RODRÍGUEZ RIVERA.
- ❖ A LA PROFESORA AURORA DE LOS ÁNGELES RAMOS MEJÍA, POR SUS COMENTARIOS Y APORTACIONES A LA PRESENTE TESIS.
- ❖ AL DR. FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ GÓMEZ POR LA AYUDA, ORIENTACIÓN Y TIEMPO DEDICADO EN LA PRESENTACIÓN DE ESTA TESIS.
- ❖ A TODOS MIS AMIGOS DEL LABORATORIO DE CORROSIÓN, POR QUE CON SU FORMA DE SER TAN ALEGRE ME HICIERON MÁS PLACENTERA LA ESTANCIA EN EL LABORATORIO.
- ❖ A LOS INGENIEROS DEL AREA DE HIDROPROCESAMIENTO DEL IMP, POR LA EXPERIENCIA PROFESIONAL PROPORCIONADA, HACIENDOME VALORAR EL TRABAJO EN EQUIPO; Y MUY EN ESPECIAL A LOS INGENIEROS PEDRO M. VEGA M. Y RICARDO AGUEDA R. YA QUE ME PROPORCIONARON VALIOSOS COMENTARIOS, CONSEJOS Y APOYO EN LA PRESENTACIÓN DE ESTE TRABAJO.



- ❖ **AGRADEZCO A BETY, POR APOYARME Y HACERME FELIZ LA ESTANCIA EN EL EDIFICIO "D" DE LA FACULTAD DE QUIMICA, Y A BRENDA POR APOYAR A MI FAMILIA.**
  
- ❖ **HAGO UN RECONOCIMIENTO A TODAS AQUELLAS PERSONAS CON LAS QUE CONVIVÍ EN LOS DIFERENTES TRABAJOS EVENTUALES QUE TUVE (DURANTE MIS ESTUDIOS), Y QUIENES ME HICIERON VALORAR Y APROVECHAR LA OPORTUNIDAD QUE SE ME PRESENTABA DE ESTUDIAR, SIEMPRE LUCHANDO POR ALCANZAR MIS METAS.**

*"PERTENECEMOS A LA ESPECIE HUMANA, CUANDO A TRAVÉS DE NUESTROS ACTOS, HEAMOS CONTRIBUIDO A ENRIQUECERLA"*

*L. STEMBERG.*

*"NO IMPORTAN LOS DISTINTOS CAMINOS POR LOS QUE BUSQUEMOS LA VERDAD; LO IMPORTANTE ES RESCATAR, DE TODAS ESAS LÍNEAS DE PENSAMIENTO, LO NECESARIO PARA ENRIQUECER LA NUESTRA."*

*L. STEMBERG.*

*"FINALMENTE, DEBERÍAMOS REFLEXIONAR DEFINITIVAMENTE EN LA BREVEDAD DE NUESTRO TIEMPO, LO TRANSITORIO DE NUESTRO EXISTIR, LA HERENCIA QUE DEJAMOS AL PARTIR, EL LEGADO QUE VAMOS A ENTREGAR Y EN QUE SOLAMENTE LOGRAREMOS CRISTALIZAR ESOS IDEALES SI VIVIMOS APASIONADAMENTE Y HASTA EL ÚLTIMO INSTANTE POR LOGRARLO"*

*CORNEJO.*

# INDICE

	<b>Página.</b>
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	<b>i</b>
<b>CAPITULO I. "FUNDAMENTOS DE MATERIALES PARA LA ELABORACION DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO".</b>	
1.1 El Concreto Armado.	2
1.1.1 Requisitos del Concreto Armado Endurecido.	4
1.2 El Cemento.	5
1.2.1 Otros Cementos.	7
1.3 La Arena.	8
1.4 La Grava.	8
1.5 El Acero de Refuerzo.	8
1.6 Relación Agua/Cemento.	9
1.7 Mezclado.	11
1.8 Fraguado.	12
1.8.1 Efecto del Aluminato Tricálcico y el Yeso con el agua sobre el Fraguado.	14
1.9 Hidratación.	15
1.10 Curado.	18
1.11 Permeabilidad y Hermeticidad.	21

## Página.

**CAPITULO II. "FUNDAMENTOS DE CORROSION".**

2.1 Tipos de óxidos presentes sobre la superficie del refuerzo metálico.	25
2.2 Aspectos generales del proceso de pasivación.	26
2.3 Corrosión.	28
2.4 Aspectos Termodinámicos de la corrosión.	34
2.5 Potencial de celda.	35
2.6 Potencial de corrosión.	35
2.7 Diagramas de Pourbaix.	36
2.8 Corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto.	41
2.9 Efecto de los iones cloruro sobre el acero de refuerzo embebido en el concreto.	43
2.10 Carbonatación.	54
2.11 Métodos electroquímicos para la inspección y análisis del estado de las estructuras de concreto reforzado.	55
2.11.1 Método de Prueba Estándar (ASTM C-876).	56
2.11.2 Método para la determinación de la resistividad.	56
2.12 Métodos de protección contra la corrosión del acero de refuerzo en el concreto.	59

**CAPITULO III. "DESARROLLO EXPERIMENTAL".**

3.1 Preparación de las muestras.	62
3.1.1 Acero de Refuerzo.	62
3.1.2 Probetas de Mortero.	63
3.2 Métodos Electroquímicos utilizados.	65
3.2.1 Medición del Potencial de Media Celda.	65
3.2.2 Medición de la Resistividad Eléctrica.	67



Página.

**CAPITULO IV. "RESULTADOS EXPERIMENTALES".**

4.1 Medición del Potencial de Media Celda.	70
4.2 Medición de la Resistividad Eléctrica.	87

**CAPITULO V. "ANALISIS DE RESULTADOS".**

5.1 Medición del Potencial de Media Celda.	96
5.1.1 Efecto del Tipo de Cemento.	96
5.1.2 Efecto de la Relación Agua/Cemento.	98
5.2 Medición de la Resistividad Eléctrica.	99
5.2.1 Efecto del Tipo de Cemento.	99
5.2.2 Efecto de la Relación Agua/Cemento.	100

**CAPITULO VI. "CONCLUSIONES".**

102

**APENDICE A.**

106

**APENDICE B.**

119

**BIBLIOGRAFÍA.**

127

## RESUMEN

El acero embebido en mortero queda protegido contra la corrosión gracias a la naturaleza altamente alcalina del mortero. El ambiente de elevado pH (normalmente mayor de 12.5) ocasiona que se forme una película protectora de óxido no corrosiva y pasiva en el acero.

No obstante, debido a su constitución, el mortero contiene poros, algunos de ellos interconectados entre sí, que son de importancia crítica en el proceso de corrosión, ya que a través de ellos los agentes agresivos externos pueden penetrar por capilaridad o difusión hasta el acero de refuerzo.

En el presente trabajo se determinó por métodos electroquímicos el nivel de corrosión provocado por un agente salino en una varilla embebida en mortero, el cual fue fabricado con diferentes tipos de cemento y relaciones agua/cemento.

Los métodos electroquímicos utilizados fueron a través de la medición de Potenciales de Media Celda y medida de la Resistividad Eléctrica.

En base a los resultados obtenidos se observó que la mayor resistencia al ataque del agente salino se presentó al trabajar con la menor relación agua/cemento, independientemente del tipo de éste.

## **ABSTRACT**

The strong alkaline nature of Portland cement mortars protects steel against corrosion. Steel is covered by a non-corrosive oxide film which is formed at elevated pH values ( $> 12.5$ ).

However, as Portland cement mortars has an interconnected porous structure, external corrosive agents can penetrate it by a capillary and/or diffusion mechanism, that may attack the steel.

In this work, saline agent attack to a steel rod absorbed on a mortar was studied by electrochemical methods. The mortars were prepared using two kinds of Portland cement and three water/cement ratios.

The electrochemical methods used were: Half Cell Potential and Electrical Resistivity.

Results show that the least aggressive corrosive attack was observed using the lowest water/cement ratio; independently of the cement type.

# **INTRODUCCIÓN**

El concreto hecho con cemento portland es un material simple en apariencia con una naturaleza interna muy compleja. En contraste con su complejidad interna, la versatilidad, durabilidad y economía del concreto lo han convertido en el material de construcción más usado en el mundo, cuyo consumo supera al de todos los materiales de construcción considerados conjuntamente. Esto se puede ver en la variedad de estructuras en que se emplean, desde carreteras, puentes, edificios y presas hasta pisos, banquetas y aún obras de arte.

El concreto proporciona a las estructuras de obra civil una resistencia a la compresión, pero baja resistencia a la flexión ; para aumentar la resistencia a la flexión se utiliza varilla de acero como refuerzo, a esto se le conoce como concreto armado. Así pues, una parte muy importante de las estructuras de hormigón está reforzada con armaduras de acero y la corrosión de estas armaduras es la causa principal del deterioro de las estructuras.

Cabe destacar la importancia del sector de vivienda y construcción, ya que en éste se concentra una parte significativa de las pérdidas generadas por la corrosión y es hacia donde está dirigida la investigación del presente trabajo de Tesis.

El acero embebido en el concreto queda protegido contra la corrosión gracias a la naturaleza altamente alcalina del concreto. El ambiente de elevado pH (normalmente mayor de 12.5) ocasiona que se forme una película protectora de óxido no corrosiva y pasiva en el acero.

No obstante, debido a su constitución, el concreto contiene poros, algunos de ellos interconectados entre sí, que son de importancia crítica en el proceso de corrosión, ya que a través de ellos los agentes agresivos externos pueden penetrar por capilaridad o difusión hasta el acero de refuerzo. Una vez que esto ha ocurrido, se forma una celda eléctrica a lo largo del acero o entre las barras de acero comienza el proceso electroquímico de la corrosión. Algunas áreas de acero a lo largo de la barra se convierten en el ánodo de descarga de corriente de la celda eléctrica y allí se disuelve el fierro. Las áreas de acero que reciben la corriente son los cátodos donde se forman los iones hidróxido. El fierro junto con los iones hidróxido forma hidróxido ferroso,  $Fe(OH)_2$ , el cual posteriormente se oxida para formar herrumbre u óxido de fierro. La formación de la herrumbre es un proceso expansivo (la herrumbre se expande hasta cuatro veces su volumen original) lo que induce esfuerzos internos y el eventual descascaramiento del concreto que recibe al acero de refuerzo. También el área transversal del acero queda reducida de manera importante. Una vez que ha comenzado, la velocidad de corrosión del acero se ve afectada por la resistividad eléctrica del concreto, el contenido de humedad y la velocidad a la que emigra el oxígeno a través del concreto para alcanzar al acero.

La investigación de la corrosión del acero embebido en el concreto comenzó por la observación del concreto sometido a la acción del agua de mar, ya que éste fue el primero en el que se pudo apreciar daño. Así pues, la investigación de la corrosión comenzó en el campo en el que la solución del problema es más difícil, dada la complejidad del proceso de corrosión. Es así, como la presencia de iones cloruro provenientes del agua de mar puede penetrar y destruir la película.

Los iones cloruro solos también pueden penetrar la película pasiva en el refuerzo y combinarse con los iones de hierro para formar un complejo cloruro de hierro soluble, que conduce al hierro dentro del concreto para quedar oxidado posteriormente y formar herrumbre.

Los daños causados por la corrosión se derivan del incremento en los costos directos e indirectos, tales como: medidas preventivas, mantenimiento correctivo, hasta la pérdida de vidas humanas a consecuencia de fallas localizadas y el derrumbe de estructuras de concreto ocasionado por la corrosión del refuerzo metálico.

El uso al que se destina el concreto dicta la proporción de los componentes, el tipo de cemento y la dosificación de agregados finos y gruesos. Por lo tanto; teniendo en cuenta que un diseño adecuado del concreto, mediante la adecuada selección de los materiales, es un primer paso hacia la prevención del fenómeno :

El objetivo de este trabajo fue determinar por métodos electroquímicos el nivel de corrosión provocado por un agente salino en una varilla embebida en mortero, el cual fue fabricado con diferentes tipos de cemento y relaciones agua cemento.

Los morteros se fabricaron con : cemento Portland tipo I, que es el más usual, el que más se produce y existe en el mercado; y con cemento Portland Puzolana, el cual presenta mayor resistencia química. Las relaciones agua/cemento fueron 0.4, 0.5 y 0.6 respectivamente.

El agente salino al que fueron expuestos los morteros fue el  $NaCl$  y se aplicó al utilizar agua de amasado con una concentración de 0.14 % en peso de cloruros (basándose en el reglamento ACI 318 que indica para un concreto reforzado expuesto a cloruros durante su servicio, el contenido máximo de ion cloruro soluble al agua en el concreto es de 0.15 % respecto al peso de cemento), y después de un tiempo de curado de 28 días se sumergieron los morteros en una solución de 3 % en peso de cloruros (semejando agua de mar).

Los métodos electroquímicos utilizados fueron a través de la medición de potenciales de media celda, siguiendo la norma ASTM C-876; y medida de la resistividad eléctrica, esta última no está bajo normatividad, sin embargo se reportan criterios de evaluación en la práctica<sup>29,35,39</sup>, además que fue adaptada y probada por el Grupo de Corrosión (UNAM).

Finalmente, este trabajo traerá como conclusión que al emplear un adecuado tipo de cemento y una adecuada relación agua/cemento, decrecerá el contenido de ion cloruro que penetre a través del concreto, produciéndose una probabilidad de corrosión baja (5%), se ayudará a la economía del país, ya que al destruirse gran número de obras realizadas con dicho material de construcción se generan grandes costos y en sus peores consecuencias: la pérdida de vidas humanas. Además de que dará al Ingeniero Civil una herramienta más para el sector de la construcción.



# **CAPITULO**

## **I**

**“FUNDAMENTOS DE  
MATERIALES PARA LA  
ELABORACIÓN DE  
ESTRUCTURAS DE  
CONCRETO ARMADO”**

## 1.1 EL CONCRETO ARMADO.

El concreto, también llamado hormigón, es básicamente una mezcla de dos componentes; agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento, agua y algunas veces aditivos, une a los agregados (arena y grava o piedra triturada) para formar una masa semejante a una roca, pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua.

Existe también el Mortero, el cual se compone de una mezcla debidamente proporcionada de arena, cemento y agua.

Se aplica el término de concreto armado al material compuesto de concreto y acero de refuerzo o varilla de acero, asociados de modo que forman un sólido único desde el punto de vista mecánico.

La unión tiene por objeto aprovechar ventajosamente las propiedades características que presentan ambos materiales desde el punto de vista de la resistencia mecánica. El concreto ofrece una resistencia muy grande a los esfuerzos de compresión y muy escasa a los de tracción; por lo tanto, es inadecuado para formar piezas que han de resistir tracciones o flexiones, pero, si en la zona de tracción se colocan varillas de acero, se habrá suplido esta deficiencia y se tendrá una pieza resistente a la flexión, a esto se debe la excepcional importancia que el concreto armado tiene en la industria de la construcción, además de su ilimitada adaptabilidad a las formas más diversas, a la posibilidad de aplicarse acertadamente a casi todo género de construcciones y la protección que ofrece a las estructuras de acero contra la corrosión causada por el medio ambiente.

El concreto armado se puede clasificar según el grado de esfuerzo al acero de refuerzo, de la siguiente manera:

- **Concreto reforzado:** Material formado de concreto y acero de bajo carbono sin previo esfuerzo, que al momento de soportar el peso del concreto y las cargas de la estructura, desarrolla esfuerzos de tensión.

- **Concreto Preesforzado:** Material formado de concreto y acero de alta resistencia que es intencionalmente tensionado, para compensar los esfuerzos provocados por el peso del concreto y las cargas de la estructura, éste a su vez se divide en:

- ✓ **Concreto Pretensado:** Concreto en que el refuerzo de acero es puesto en tensión antes del colado del concreto, permitiendo el relajamiento del acero después del curado del concreto.

- ✓ **Concreto Postensado:** Concreto en que el refuerzo de acero es puesto en tensión después del curado del concreto.

Las primeras obras de concreto fueron construidas por empresas extranjeras, principalmente inglesas y norteamericanas, tratándose sobre todo de obras de edificación; en ellas participaron ingenieros mexicanos, que comenzaron a aprender la tecnología del material y posteriormente intervinieron en algunos proyectos que el gobierno realizó fuera del país, como fueron el Pabellón de México para la Exposición Universal de 1889 y el de la Feria Mundial de 1899, en París, Francia.

En el año de 1902, el Ing. Miguel Rebolledo introdujo en México el concreto armado, llamado en aquel entonces "Cemento Armado". La primera obra en que se empleó el concreto armado en el país fue el sótano de una pequeña casa comercial construida por el propio Ing. Rebolledo; a raíz de esto se empezó a usar más el

concreto, principalmente en la construcción de edificios y monumentos en la propia Ciudad.<sup>1</sup>

En las obras marítimas, el concreto hidráulico se emplea en la construcción de muelles, tanto en su cimentación que generalmente es a base de pilotes como en su sistema de piso; en bodegas y patios de estacionamiento. El rápido progreso de sus aplicaciones se debe en gran medida a la economía obtenida de su empleo, haciendo posible su competencia no sólo con las construcciones de piedra y madera, sino también son las de acero.

#### **1.1.1 Requisitos del Concreto Armado Endurecido.**

Los principales requisitos del concreto endurecido son: que sus elementos constituyentes estén dispersados uniformemente, que tenga la resistencia requerida, que sea impermeable y resistente al clima, al desgaste y a otros agentes destructores a los que pueda estar expuesto, y que no se contraiga excesivamente al enfriarse o secarse. Puede requerirse que el concreto endurecido tenga una apariencia o acabado arquitectónico particular, alta resistencia a la abrasión o a productos químicos agresivos y alta impermeabilidad al agua o a otros líquidos.

El uso al que se destina el concreto dicta la proporción de los componentes antes mencionados (relación agua/cemento y relación cemento/arena), como también el tipo de cemento y la dosificación de los agregados finos y gruesos.

La calidad requerida del cemento endurecido, la trabajabilidad del cemento fresco y la economía, son factores que usualmente se consideran en el diseño de la mezcla.

Si bien, el concreto es un material resistente y durable, existen factores físicos y químicos en el medio de servicio que pueden contribuir a su deterioro o falla; una falla prematura puede atribuirse a la baja calidad del concreto (alta relación agua/cemento, tipo de cemento, entre otros factores que se irán viendo al lo largo de

la presente tesis). Por otra parte, debido a su constitución, el concreto contiene poros, algunos de ellos interconectados entre sí, que son de importancia crítica en el proceso de corrosión, ya que a través de ellos los agentes agresivos externos pueden penetrar por capilaridad o difusión hasta el acero de refuerzo.

Lo anterior resalta la importancia de la selección de los materiales adecuados para la elaboración del concreto según el medio en el que se utilice, para esto; a continuación daré los conceptos necesarios para una llevar a cabo una estructura de obra civil.

## 1.2 EL CEMENTO.

El Cemento Portland, desarrollado por Aspdin en Inglaterra en el año de 1824, ya se conocía en nuestro país desde fines del siglo importado de la propia Inglaterra, Bélgica y Estados Unidos, su uso era muy limitado y se empleaba principalmente en las industrias del mosaico y piedra artificial. Las primeras fábricas de cemento con hornos rotatorios se instalaron en el país a principios del presente siglo, en los estados de Nuevo León e Hidalgo.<sup>1</sup>

El cemento está formado por una mezcla de yeso y "clinker", éste último, es producto de la fusión a unos 1500 °C, de arcillas y piedras calizas. Dicha fusión forma cuatro distintas fases, las cuales son:

Nombre.	Fórmula.	Abreviatura.
Silicato dicálcico o belita"	$2CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$
Silicato tricálcico o "alita"	$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$
Aluminato tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$
Ferrialuminato tetracálcico o Aluminoferrito Tetracálcico	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF$

El cemento además de estar constituido por estas fases, contiene:

Sulfato de calcio di hidratado (yeso)  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$

Oxido de calcio (cal libre)  $CaO$

Magnesia (periclusa)  $MgO$

Álcalis  $Na_2O$  y  $K_2O$

Todas estas fases, conforman el 90 por ciento o más del peso del cemento portland.

En función de la proporción en la cuál se encuentren estas fases y de acuerdo a la norma C 150 de la ASTM (American Society for Testing and Materials), la Especificación Federal de los Estados Unidos SS-C-192 y la norma M85 de la AASHTO (American Association of Highway and Traffic Officials) especifican que existen cinco tipos principales de cemento portland:

<b>Tipo I</b>	Cemento de uso general.
<b>Tipo II</b>	Cemento de resistencia moderada a la acción de los sulfatos y calor de hidratación inferior al cemento Tipo I
<b>Tipo III</b>	Cemento de alta resistencia a temprana edad.
<b>Tipo IV</b>	Cemento indicado cuando se necesita calor de hidratación bajo, como es el caso de construcciones de concreto masivo.
<b>Tipo V</b>	Cemento utilizable cuando se requiere resistencia a los sulfatos, por ejemplo, en estructuras que están en contacto con suelos o aguas freáticas de alto contenido de sulfatos, y en hormigones en contacto con aguas negras domésticas concentradas.

### 1.2.1 Otros cementos.

En algunas localidades se encuentran otros cementos, puros o resultantes de combinaciones, que se usan, en general, por razones económicas. Entre ellos se pueden citar: cemento de escorias, cemento portland de escorias de alto horno y cemento portland puzolánico. Ciertos materiales, no cementosos por sí mismos o tan solo ligeramente cementosos, se usan a menudo para reemplazar en la mezcla una porción del cemento portland, se los denomina puzolanas y reaccionan con la cal libre, siempre presente como producto de la hidratación del cemento portland, para formar compuestos cementosos que ganan resistencia lentamente, ya que estos cementos son de fraguado y endurecimiento lentos, dando resistencias muy bajas en los primeros días, pero aumentan notablemente a los 28 días.

Las puzolanas son rocas de origen volcánico, incluyen a la ceniza volante (la cual puede reducir de manera importante la entrada de los iones cloruro) y al humo de sílice. La ceniza volante consiste principalmente de silicatos vítreos que contienen sílice (16-25 %), alúmina (1-2 %), óxido férrico (5-8 %) y cal (60-65 %).<sup>2</sup> Otros componentes menores son el magnesio, el azufre, el sodio, el potasio y el carbono. También se encuentra presente una pequeña cantidad de compuestos cristalinos. El color de ésta es gris o tostado.<sup>3</sup>

El cemento puzolánico por lo general se obtiene mezclando 40 % de puzolana y 60 % de clinker de cemento portland. La mayoría de las puzolanas, cuando se usan como reemplazo parcial del cemento portland, producen una mezcla de concreto caracterizada por una mejora en la trabajabilidad y la plasticidad, reducen la permeabilidad y el calor de hidratación, mejoran la resistencia a los sulfatos, lo cual es muy ventajoso en la construcción de estructuras masivas; esa mezcla impide o minimiza la reacción entre los álcalis y los agregados, además el cemento portland puzolana se considera incluso de aire.<sup>4</sup>

### **1.3 LA ARENA.**

También llamada agregados finos, consiste en arenas naturales o manufacturadas, está compuesta por partículas metálicas, silicatos y óxidos metálicos de tamaño muy pequeño (0-1 mm.) y casi uniforme.

### **1.4 LA GRAVA.**

También llamada agregados gruesos, está formada, al igual que la arena por silicatos, partículas metálicas, óxidos metálicos, además de piedras, por lo que el tamaño (superior a 7 mm.) de las partículas no es uniforme.

### **1.5 EL ACERO DE REFUERZO.**

El acero es una aleación que contiene fundamentalmente a los elementos, hierro como base y carbono.

De acuerdo con las necesidades se han diseñado diferentes tipos de acero. Existen aceros para la construcción de obras civiles, para maquinaria, para herramientas, etc. El diseño de la composición de cada acero, la cual además de hierro y carbono, usualmente incluye elementos tales como Mn, Si, Cr, Ni, Mo y otros, depende del uso a que esté destinado. El tipo de acero usado en la industria de la construcción es el llamado acero estructural.<sup>3</sup>

Las características mecánicas que deben ser controladas cuidadosamente en un acero estructural son las siguientes: Alta resistencia a la tensión, ductilidad, tenacidad y soldabilidad.<sup>6</sup>

El principal parámetro que influye en la adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo es la condición superficial de las estructuras metálicas de refuerzo. La adherencia se produce principalmente por la fricción y adhesión entre el concreto y el acero, y puede resultar afectada por la contracción del concreto.



El acero de refuerzo debe ser corrugado excepto para espirales o cables en los cuales se puede utilizar alambre liso.

Una película ligera de óxido no es objetable en el acero de refuerzo ordinario (de hecho su rugosidad mejora la adherencia), pero, en cambio, debe removerse toda capa gruesa consistente de escamas o laminillas, que se caen al doblar o golpear la barra con martillo.<sup>7,8</sup>

El refuerzo ha de limpiarse de cualquier aceite o mortero no adherente que haya sido derramado sobre él.

El acero galvanizado reduce la resistencia adhesiva, probablemente debido a que en el acero tratado no existe tan buena adherencia como en una superficie oxidada. Sin embargo este hecho ha causado cierta polémica debido a que pese a lograrse un mejoramiento en las propiedades mecánicas, se introduce un serio peligro de tipo electroquímico, ya que favorece con esto la corrosión de la estructura.

## **1.6 RELACIÓN AGUA/CEMENTO.**

La relación agua cemento es el peso del agua, dividido entre el peso del cemento.

La calidad del concreto endurecido está determinada por la cantidad de agua utilizada en relación con la cantidad de cemento. A continuación se presentan algunas ventajas que se obtienen al reducir el contenido de agua:

- \* Se incrementa la resistencia a la compresión y a la flexión.
- \* Se tiene menor permeabilidad, y por ende mayor hermeticidad y menor absorción.
- \* Se incrementa la resistencia al intemperismo
- \* Se logra una mejor unión entre capas sucesivas y entre el concreto y el refuerzo.

Requisitos para condiciones de exposición especiales:<sup>4</sup>

CONDICIONES DE EXPOSICIÓN	RELACIÓN MÁXIMA DE AGUA/CEMENTO
Concreto que se pretenda tenga baja permeabilidad en exposición al agua.	0.5
Para proteger de la corrosión, concretos reforzados expuestos a sales descongelantes, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen.	0.4

La relación agua/cemento debe ser como máximo de 0.5 en los elementos constructivos de pequeña sección o armados, y de 0.6 en los elementos de grandes dimensiones. Sin embargo en los elementos constructivos expuestos a la acción de aguas fuertemente agresivas (con contenido de cloruro) se utilizará la relación de 0.55 como máximo en los elementos de grandes dimensiones.<sup>10</sup>

### 1.7 MEZCLADO.

El concreto de calidad uniforme y satisfactoria requiere que los materiales se mezclen totalmente hasta que tengan una apariencia uniforme y todos los componentes se hayan distribuido. Las muestras tomadas de distintas porciones de una mezcla deben tener en esencia el mismo peso unitario, contenido de aire, retenimiento y contenido de agregado grueso. En la norma ASTM C94 se especifican los métodos de prueba para la uniformidad del mezclado. El tiempo necesario para el mezclado dependerá de muchos factores que incluyen el volumen de la mezcla, su rigidez, tamaño y granulometría del agregado y la eficiencia de la

mezcladora. Deben evitarse tiempos de mezclado excesivamente prolongados, ya que pueden triturar los agregados.<sup>4</sup>

El concreto recién mezclado debe ser plástico o semifluido y capaz de ser moldeado a mano. En una mezcla de concreto plástico todos los granos de arena y las piezas de grava o de piedra quedan encajonados y sostenidos en suspensión. Los ingredientes no están predispuestos a segregarse durante el transporte; y cuando el concreto endurece, se transforma en una mezcla homogénea de todos los componentes. El concreto de consistencia plástica no se desmorona, sino que fluye como líquido viscoso sin segregarse.

El concreto deberá mantenerse a una temperatura arriba de 10 °C y en condiciones de humedad. Es esencial evitar la pérdida de humedad durante el proceso de curado.

Para optimizar la operación de mezclado, se usarán mecanismos ultrasónicos en combinación con el mezclado mecánico.

Para mejorar los métodos de compactación se emplearán vibradores controlados electrónicamente, que trabajarán en la frecuencia de resonancia del concreto fresco.<sup>1</sup> Es preciso aplicar una vibración efectiva para que quede bien consolidado y garantice su adherencia con la armadura.

## **1.8 FRAGUADO.**

Fraguado es la rigidez de la pasta de cemento, la cual sufre un cambio del estado plástico al estado rígido (endurecido) en cuanto el tiempo transcurre, causado por una hidratación selectiva de los componentes del cemento que va acompañado de cambios de temperatura.<sup>11</sup>

El fraguado del concreto se produce a través de una serie de reacciones químicas cuando la mezcla de cemento, arena y grava es puesta en contacto con el agua. La primera reacción química es la que se produce desde el momento mismo en

que el cemento entra en contacto con el agua y consiste en la formación de geles. La segunda reacción es la cristalización de este gel, la cual se inicia en contacto íntimo con la roca de la que están formados los agregados inertes. La tercera reacción es la formación de capas secundarias sólidas y con la continuación de este proceso se van entrelazando dichas capas de gel que envuelven a los granos del agregado inerte, dejando intersticios ocupados parcialmente por aire y agua, solidificándose de esta forma los volúmenes fabricados de concreto.<sup>12</sup>

La rigidización del concreto se puede reconocer por una pérdida de trabajabilidad que normalmente ocurre dentro de las tres primeras horas luego del mezclado, pero depende de la composición y finura del cemento, de las proporciones de la mezcla y de las condiciones de temperatura. Posteriormente el concreto comienza a endurecer.

El hidrato de silicato de calcio presente en la pasta de cemento ya endurecida, forma uniones enlazadas entre las otras fases cristalinas y los granos sobrantes de cemento sin hidratar; también se adhieren a los granos de arena y a piezas de agregado grueso, cementando todo en conjunto, dando lugar a una roca artificial. La formación de esta estructura es la acción cementante de la pasta y es responsable del fraguado, del endurecimiento y del desarrollo de resistencia. Cuando el concreto fragua, su volumen bruto permanece casi inalterado, pero el concreto endurecido contiene poros llenos de agua y aire, mismos que no tienen resistencia alguna. La resistencia está en la parte sólida de la pasta, en su mayoría en el hidrato de silicato de calcio y en las fases cristalinas.<sup>1</sup>

Para determinar si un cemento fragua de acuerdo con los tiempos especificados en la norma ASTM C 150, se efectúan pruebas usando el aparato de Vicat (ASTM C 191) o la aguja de Gillmore. Los tiempos de fraguado indican si la pasta está desarrollando sus reacciones de hidratación de manera normal. El yeso

regula el tiempo de fraguado en el cemento. También influyen sobre el tiempo de fraguado la finura del cemento, la relación agua-cemento y los aditivos usados.<sup>4</sup>

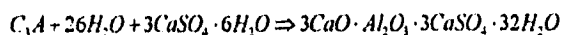
Existen: El Fraguado falso: El cual se define como el rápido desarrollo de rigidez en una pasta de cemento portland, mortero u concreto, recién amasado, sin mucho desarrollo calórico, rigidez que puede eliminarse recuperándose por tanto el estado plástico, con amasado adicional, sin adición de agua.

Fraguado instantáneo: Rápido desarrollo de rigidez en una pasta de cemento portland, mortero u concreto, recién amasado, usualmente con generación de mucho calor; rigidez que no puede ser eliminada. El fraguado instantáneo es el más inconveniente, puesto que para volver a obtener plasticidad, es necesario añadir cantidades considerables de agua, lo cual produce pérdida de resistencia y gran incremento del agrietamiento plástico por contracción de fraguado.<sup>3</sup>

La consistencia porosa del concreto se puede presentar como resultado de una compactación deficiente la cual, a su vez, puede ser causada por fraguado prematuro del concreto.

### 1.8.1 Efecto del Aluminato Tricálcico y el Yeso con el Agua sobre el Fraguado.

Esta reacción indirecta, ligada a la conducta de las estructuras metálicas de refuerzo, es la que se verifica entre el Aluminato tricálcico y el yeso, con el agua:



Por un lado, el producto llamado "etringita", cristaliza y crece agrietando el concreto, produciendo poros, por los cuales penetran agentes agresivos que destruyen la película pasiva del acero. Sumado a esto, podemos mencionar, el problema que significa el que en muchas ocasiones esta reacción, si no es retardada de algún modo, provoca un fraguado relámpago sin dar el tiempo necesario para completar el colado.

### 1.9 HIDRATACIÓN.

La propiedad de liga de la pasta de cemento portland se debe a la reacción química entre el cemento y el agua llamada; hidratación.

<b>TRANSFORMACIONES DE LOS COMPUESTOS DEL CEMENTO PORTLAND:<sup>1</sup></b>			
$2(2CaO \cdot SiO_2)$ Silicato dicálcico. $C_2S$	+ $4H_2O$ Agua	= $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ Gel de tobermorita.	+ $Ca(OH)_2$ Hidróxido de calcio.
$2(3CaO \cdot SiO_2)$ Silicato tricálcico. $C_3S$	+ $6H_2O$ Agua	= $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ Gel de tobermorita.	+ $3Ca(OH)_2$ Hidróxido de calcio.
$3CaO \cdot Al_2O_3$ Aluminato tricálcico $C_3A$	+ $12H_2O$ Agua	+ $Ca(OH)_2$ Hidróxido de calcio.	= $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Ca(OH)_2 \cdot 12H_2O$ Hidrato de Aluminato tetracálcico.
$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ Aluminoferrito tetracálcico $C_4AF$	+ $10H_2O$ Agua	+ $2Ca(OH)_2$ Hidróxido de calcio.	= $6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot 12H_2O$ Hidrato de Aluminoferrito de calcio.
$3CaO \cdot Al_2O_3$ Aluminato tricálcico $C_3A$	+ $10H_2O$ Agua	+ $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ Yeso	= $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ Hidrato monosulfo Aluminato de calcio.

El acero de refuerzo debe ser corrugado excepto para espirales o cables en los cuales se puede utilizar alambre liso.

Una película ligera de óxido no es objetable en el acero de refuerzo ordinario (de hecho su rugosidad mejora la adherencia), pero, en cambio, debe removerse toda capa gruesa consistente de escamas o laminillas, que se caen al doblar o golpear la barra con martillo.<sup>7,8</sup>

El refuerzo ha de limpiarse de cualquier aceite o mortero no adherente que haya sido derramado sobre él.

El acero galvanizado reduce la resistencia adhesiva, probablemente debido a que en el acero tratado no existe tan buena adherencia como en una superficie oxidada. Sin embargo este hecho ha causado cierta polémica debido a que pese a lograrse un mejoramiento en las propiedades mecánicas, se introduce un serio peligro de tipo electroquímico, ya que favorece con esto la corrosión de la estructura.

## 1.6 RELACIÓN AGUA/CEMENTO.

La relación agua cemento es el peso del agua, dividido entre el peso del cemento.

La calidad del concreto endurecido está determinada por la cantidad de agua utilizada en relación con la cantidad de cemento. A continuación se presentan algunas ventajas que se obtienen al reducir el contenido de agua:

- \* Se incrementa la resistencia a la compresión y a la flexión.
- \* Se tiene menor permeabilidad, y por ende mayor hermeticidad y menor absorción.
- \* Se incrementa la resistencia al intemperismo
- \* Se logra una mejor unión entre capas sucesivas y entre el concreto y el refuerzo.

**FALTA PAGINA**

No. **10**



Requisitos para condiciones de exposición especiales:<sup>4</sup>

CONDICIONES DE EXPOSICIÓN	RELACION MÁXIMA DE AGUACEMENTO
Concreto que se pretenda tenga baja permeabilidad en exposición al agua.	0.5
Para proteger de la corrosión, concretos reforzados expuestos a sales descongelantes, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen.	0.4

La relación agua/cemento debe ser como máximo de 0.5 en los elementos constructivos de pequeña sección o armados, y de 0.6 en los elementos de grandes dimensiones. Sin embargo en los elementos constructivos expuestos a la acción de aguas fuertemente agresivas (con contenido de cloruro) se utilizará la relación de 0.55 como máximo en los elementos de grandes dimensiones.<sup>10</sup>

### 1.7 MEZCLADO.

El concreto de calidad uniforme y satisfactoria requiere que los materiales se mezclen totalmente hasta que tengan una apariencia uniforme y todos los componentes se hayan distribuido. Las muestras tomadas de distintas porciones de una mezcla deben tener en esencia el mismo peso unitario, contenido de aire, retenimiento y contenido de agregado grueso. En la norma ASTM C94 se especifican los métodos de prueba para la uniformidad del mezclado. El tiempo necesario para el mezclado dependerá de muchos factores que incluyen el volumen de la mezcla, su rigidez, tamaño y granulometría del agregado y la eficiencia de la

mezcladora. Deben evitarse tiempos de mezclado excesivamente prolongados, ya que pueden triturar los agregados.<sup>4</sup>

El concreto recién mezclado debe ser plástico o semifluido y capaz de ser moldeado a mano. En una mezcla de concreto plástico todos los granos de arena y las piezas de grava o de piedra quedan encajonados y sostenidos en suspensión. Los ingredientes no están predispuestos a segregarse durante el transporte; y cuando el concreto endurece, se transforma en una mezcla homogénea de todos los componentes. El concreto de consistencia plástica no se desmorona, sino que fluye como líquido viscoso sin segregarse.

El concreto deberá mantenerse a una temperatura arriba de 10 °C y en condiciones de humedad. Es esencial evitar la pérdida de humedad durante el proceso de curado.

Para optimizar la operación de mezclado, se usarán mecanismos ultrasónicos en combinación con el mezclado mecánico.

Para mejorar los métodos de compactación se emplearán vibradores controlados electrónicamente, que trabajarán en la frecuencia de resonancia del concreto fresco.<sup>1</sup> Es preciso aplicar una vibración efectiva para que quede bien consolidado y garantice su adherencia con la armadura.

### **1.8 FRAGUADO.**

Fraguado es la rigidez de la pasta de cemento, la cual sufre un cambio del estado plástico al estado rígido (endurecido) en cuanto el tiempo transcurre, causado por una hidratación selectiva de los componentes del cemento que va acompañado de cambios de temperatura.<sup>11</sup>

El fraguado del concreto se produce a través de una serie de reacciones químicas cuando la mezcla de cemento, arena y grava es puesta en contacto con el agua. La primera reacción química es la que se produce desde el momento mismo en

que el cemento entra en contacto con el agua y consiste en la formación de geles. La segunda reacción es la cristalización de este gel, la cual se inicia en contacto íntimo con la roca de la que están formados los agregados inertes. La tercera reacción es la formación de capas secundarias sólidas y con la continuación de este proceso se van entrelazando dichas capas de gel que envuelven a los granos del agregado inerte, dejando intersticios ocupados parcialmente por aire y agua, solidificándose de esta forma los volúmenes fabricados de concreto.<sup>12</sup>

La rigidización del concreto se puede reconocer por una pérdida de trabajabilidad que normalmente ocurre dentro de las tres primeras horas luego del mezclado, pero depende de la composición y finura del cemento, de las proporciones de la mezcla y de las condiciones de temperatura. Posteriormente el concreto comienza a endurecer.

El hidrato de silicato de calcio presente en la pasta de cemento ya endurecida, forma uniones enlazadas entre las otras fases cristalinas y los granos sobrantes de cemento sin hidratar; también se adhieren a los granos de arena y a piezas de agregado grueso, cementando todo en conjunto, dando lugar a una roca artificial. La formación de esta estructura es la acción cementante de la pasta y es responsable del fraguado, del endurecimiento y del desarrollo de resistencia. Cuando el concreto fragua, su volumen bruto permanece casi inalterado, pero el concreto endurecido contiene poros llenos de agua y aire, mismos que no tienen resistencia alguna. La resistencia está en la parte sólida de la pasta, en su mayoría en el hidrato de silicato de calcio y en las fases cristalinas.<sup>4</sup>

Para determinar si un cemento fragua de acuerdo con los tiempos especificados en la norma ASTM C 150, se efectúan pruebas usando el aparato de Vicat (ASTM C 191) o la aguja de Gillmore. Los tiempos de fraguado indican si la pasta está desarrollando sus reacciones de hidratación de manera normal. El yeso

regula el tiempo de fraguado en el cemento. También influyen sobre el tiempo de fraguado la finura del cemento, la relación agua-cemento y los aditivos usados.<sup>4</sup>

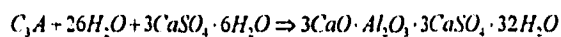
Existen: El Fraguado falso: El cual se define como el rápido desarrollo de rigidez en una pasta de cemento portland, mortero u concreto, recién amasado, sin mucho desarrollo calórico, rigidez que puede eliminarse recuperándose por tanto el estado plástico, con amasado adicional, sin adición de agua.

Fraguado instantáneo: Rápido desarrollo de rigidez en una pasta de cemento portland, mortero u concreto, recién amasado, usualmente con generación de mucho calor; rigidez que no puede ser eliminada. El fraguado instantáneo es el más inconveniente, puesto que para volver a obtener plasticidad, es necesario añadir cantidades considerables de agua, lo cual produce pérdida de resistencia y gran incremento del agrietamiento plástico por contracción de fraguado.<sup>3</sup>

La consistencia porosa del concreto se puede presentar como resultado de una compactación deficiente la cual, a su vez, puede ser causada por fraguado prematuro del concreto.

### 1.8.1 Efecto del Aluminato Tricálcico y el Yeso con el Agua sobre el Fraguado.

Esta reacción indirecta, ligada a la conducta de las estructuras metálicas de refuerzo, es la que se verifica entre el Aluminato tricálcico y el yeso, con el agua:



Por un lado, el producto llamado "etringita", cristaliza y crece agrietando el concreto, produciendo poros, por los cuales penetran agentes agresivos que destruyen la película pasiva del acero. Sumado a esto, podemos mencionar, el problema que significa el que en muchas ocasiones esta reacción, si no es retardada de algún modo, provoca un fraguado relámpago sin dar el tiempo necesario para completar el colado.

### 1.9 HIDRATACIÓN.

La propiedad de liga de la pasta de cemento portland se debe a la reacción química entre el cemento y el agua llamada; hidratación.

<b>TRANSFORMACIONES DE LOS COMPUESTOS DEL CEMENTO PORTLAND.<sup>1</sup></b>			
$2(CaO \cdot SiO_2)$ Silicato dicálcico. $C_2S$	+ $4H_2O$ Agua	= $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ Gel de tobermorita.	+ $Ca(OH)_2$ Hidróxido de calcio.
$2(3CaO \cdot SiO_2)$ Silicato tricálcico. $C_3S$	+ $6H_2O$ Agua	= $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$ Gel de tobermorita.	+ $3Ca(OH)_2$ Hidróxido de calcio.
$3CaO \cdot Al_2O_3$ Aluminato tricálcico $C_3A$	+ $12H_2O$ Agua	+ $Ca(OH)_2$ Hidróxido de calcio.	= $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Ca(OH)_2 \cdot 12H_2O$ Hidrato de Aluminato tetracálcico.
$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ Aluminoferrito tetracálcico $C_4AF$	+ $10H_2O$ Agua	+ $2Ca(OH)_2$ Hidróxido de calcio.	= $6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot 12H_2O$ Hidrato de Aluminoferrito de calcio.
$3CaO \cdot Al_2O_3$ Aluminato tricálcico $C_3A$	+ $10H_2O$ Agua	+ $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ Yeso	= $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ Hidrato monosulfato Aluminato de calcio.

Una de las características más importantes del cemento Portland es el de ser un cemento hidráulico, esto es, que las fases del cemento reaccionan químicamente con el agua dando lugar a productos de hidratación insolubles responsables del fraguado, del endurecimiento y del desarrollo de la resistencia mecánica aún estando sumergido en agua. El cemento es un material ávido de agua, que la toma inclusive de la que existe en la atmósfera en forma de vapor.

La hidratación comienza tan pronto como el cemento entra en contacto con el agua, para fines prácticos, se considera que los agregados finos y gruesos son inertes respecto a las reacciones de hidratación.

El silicato dicálcico,  $C_2S$ , se hidrata y endurece lentamente (se ha encontrado que después de un largo tiempo; un año; existe  $C_2S$  sin hidratar), y contribuye en gran parte al incremento de resistencia a edades mayores de una semana.

El silicato tricálcico,  $C_3S$ , se hidrata y endurece rápidamente, al hidratarse desprende gran cantidad de calor (originando menor calor de hidratación que los aluminatos), y es responsable en gran medida del fraguado inicial y de la resistencia temprana. En general la resistencia temprana del concreto de cemento portland es mayor con porcentajes superiores de  $C_3S$ .

Los dos silicatos de calcio ( $C_3S$  y  $C_2S$ ), los cuales constituyen cerca del 75% del peso del cemento portland, reaccionan con el agua para formar dos nuevos compuestos: el hidróxido de calcio y el hidrato de silicato de calcio (gel de tobermorita). El cemento hidratado contiene aproximadamente un 25% de hidróxido de calcio y un 50% de gel de tobermorita en peso. Este último es con mucho el componente cementante (en las pastas endurecidas, en los morteros y en los concretos), más importante en el concreto. Las propiedades ingenieriles del concreto, (fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional) principalmente dependen del gel del hidrato de silicato de calcio (gel de tobermorita).

La composición química del silicato de calcio hidratado es en cierto modo variable, pero contiene cal ( $CaO$ ) y sílice ( $SiO_2$ ), en una proporción sobre el orden de 3 a 2.

El Aluminato tricálcico,  $C_3A$ , libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. También contribuye levemente al desarrollo de la resistencia temprana. El yeso, que se agrega al cemento durante la molienda final, retrasa la velocidad de hidratación del  $C_3A$ . Sin el yeso, un cemento que contuviera  $C_3A$  fraguaría rápidamente, debido a que, éste causa el fraguado rápido del cemento. Los cementos con bajos porcentajes de  $C_3A$  son particularmente resistentes a los suelos y aguas que contienen sulfatos.

El Aluminoferrito tetracálcico,  $C_4AF$ , reduce la temperatura de formación del clinker, ayudando por tanto a la manufactura del cemento. Se hidrata con cierta rapidez pero contribuye mínimamente a la resistencia. La mayoría de efectos de color se debe al  $C_4AF$  y a sus hidratos.

El clinker (cemento) al mezclarse con el agua desprende gran cantidad de calor, esto se debe a la solubilidad de los álcalis, a la rápida hidratación del  $C_3A$  y  $C_4AF$ , produciéndose el fraguado relámpago que se origina por una precipitación de aluminatos cálcicos hidratados.

Además dentro de las fases del cemento, también se encuentra:

**El sulfato de calcio**; el cual, controla el tiempo de fraguado.

**La cal libre** provoca dilatación y quebramiento de la pasta de cemento.

**La magnesia** causa expansión retardada (incluso después de varios años).

**Los álcalis** causan dilatación y agrietamiento, acompañado de disminución de resistencia, elasticidad y durabilidad del concreto.

Otros factores que influyen en la velocidad de hidratación incluyen la finura de molienda, los aditivos, la cantidad de agua adicionada y la temperatura de los materiales en el momento del mezclado.

La relación mínima agua-cemento (en peso) para la hidratación total es de aproximadamente de 0.22 a 0.25.

Por otra parte: el conocimiento de la cantidad de calor liberado a medida que el cemento se hidrata puede ser útil para planear la construcción. En invierno, el calor de hidratación ayudará a proteger el concreto contra el daño provocado por temperaturas de congelación. Sin embargo, el calor puede ser nocivo en estructuras masivas, tales como presas, porque puede producir esfuerzos indeseables al enfriarse luego de endurecer.

La mayor parte de la hidratación y del desarrollo de la resistencia tiene lugar durante el primer mes del ciclo de vida del concreto, pero continúa, aunque más lentamente, durante un largo período; se ha registrado en investigaciones de laboratorio incrementos de resistencia durante un período de 50 años.<sup>4</sup>

### **1.10 CURADO.**

A fin de obtener un buen concreto, la colocación de la mezcla apropiada debe ir seguida de un curado en un ambiente adecuado durante las etapas tempranas de endurecimiento.

Curado es el proceso de mantener la humedad (HR=100%), y temperatura del concreto recién colocado, durante algún período definido posterior a su colocación, vaciado o terminación, para asegurar la hidratación satisfactoria de los materiales cementantes, y el endurecimiento apropiado del concreto.<sup>5</sup>

Más específicamente, el objeto del curado es mantener el concreto saturado, o tan saturado como sea posible, hasta que el espacio de la pasta fresca de cemento que originalmente estaba lleno de agua, se llene al tamaño deseado con los productos de la hidratación del cemento. La necesidad de curado procede de que la hidratación del cemento solamente puede tener lugar en capilares llenos de agua. Por esta razón,



debe prevenirse la pérdida de agua capilar por evaporación, más aún, el agua del exterior, es decir, debe hacerse posible el ingreso de agua en el concreto.

El producto principal de reacción del proceso de endurecimiento tiene configuración de gel, formado de agua y los constituyentes reactivos de las partículas de cemento. Si la pasta se mantiene húmeda, este proceso de hidratación del cemento y formación del gel, continúa a velocidades cada vez menores, mientras haya humedad. Si, en cambio, la pasta no se conserva húmeda, la hidratación del cemento cesa tan pronto el agua evaporable se escapa de aquella, de ahí la importancia que tiene un curado adecuado.

Para un concreto dado, con cierta cantidad de agua de amasado, mientras mayor sea la cantidad de humedad retenida dentro del concreto, mejor será la eficiencia del curado. Este resulta efectivo si es continuo.<sup>3</sup>

Además, el período de curado tiene por objeto asegurar la obtención de la resistencia potencial y prevenir la formación de grietas superficiales, causadas por la rápida pérdida de agua y la contracción del fraguado. Poco después de terminado el curado especificado, la hidratación del cemento de vigas de sección delgada, columnas y losas, que no estén en contacto con agua o tierra húmeda, se reduce en tal forma, que se vuelve insignificante en la superficie y sus proximidades.

Cuando el concreto está curado totalmente no es tan vulnerable como cuando se encuentra en estado húmedo, plástico o fresco.

Estas fallas son:

- ✗ Grietas por contracción plástica;
- ✗ Grietas por contracción al secar;
- ✗ Grietas por contracción térmica;
- ✗ Consistencia porosa o compactación inadecuada.

Generalmente, las tres primeras no reducen la capacidad estructural del elemento, pero pueden constituir una amenaza a la durabilidad de éste, ya que pueden permitir el acceso de aire y agua al acero de refuerzo, proporcionar sitios vulnerables al deterioro por congelación o provocar que la estructura no sea impermeable.<sup>15</sup>

Después de un curado inicial adecuado, la hidratación del cemento continúa durante un tiempo variable, que depende de la temperatura ambiente y de la accesibilidad a una fuente externa de agua. Cuando se cura concreto común durante un mes en condiciones de humedad de laboratorio, más del 80 por ciento del cemento alcanza a hidratarse. El porcentaje de hidratación está influido por la molienda del cemento, alcanzando los cementos más finos una hidratación más completa.

A temperatura normal, las primeras etapas de hidratación producen relativamente poca resistencia. En condiciones normales de laboratorio, en la primera semana se alcanza, aproximadamente, la mitad de la resistencia última a compresión del hormigón y al cabo del primer mes, aproximadamente tres cuartos de ella, siempre y cuando se haya usado cemento Tipo I. Puesto que la ganancia en resistencia se debe a un aumento en el grado de hidratación del cemento, el secado impide tanto el desarrollo de resistencia como el progreso de la hidratación. Sin embargo, en sitios en donde se puedan presentar temperaturas inferiores a 0 °C, es ventajoso algún secamiento antes de la exposición y después de haber sido protegido para su curado, ya que el concreto saturado se daña más fácilmente por el congelamiento.

La mayoría de las especificaciones requiere que las superficies expuestas de concreto que contenga cemento portland estándar (Tipo I) se mantengan húmedas continuamente, por lo menos durante siete días. Los concretos con cementos de alta resistencia inicial (Tipo III) requieren menos tiempo (aproximadamente, la mitad), y

los hechos con cementos de endurecimiento lento. (Tipos II, IV, V y reemplazos de cementos puzolánicos ) necesitan más tiempo que los de cemento Tipo I estándar para obtener los mejores resultados (el duplo o triple de tiempo).<sup>1</sup>

Los métodos preferidos de curado son: rociado continuo, agua corriente o empozada, o cubiertas de arena, arpillera u otro material absorbente, continuamente saturados.

Existe también el curado acelerado; el cual consiste en un curado con vapor a alta presión. vapor a presión atmosférica, calor y humedad, puede emplearse para acelerar la adquisición de resistencia y reducir el tiempo de curado.

Las reacciones de hidratación, que ocurren en el cemento durante su curado, son de gran interés e importancia para nuestro estudio, ya que uno de los productos de ésta (los iones  $OH^-$ ), se encuentra directamente relacionado con la protección que el concreto infiere a las estructuras de acero de refuerzo.

### **I.11 PERMEABILIDAD Y HERMETICIDAD.**

El concreto es un material discontinuo, duro y de alta densidad. Debido a su constitución, el concreto contiene una gran cantidad de los poros interconectados que conforman una red de gránulos sólidos. Esto es de una importancia crítica para el proceso de corrosión del acero de refuerzo, ya que tanto los elementos soporte (oxígeno por ejemplo) como los agentes iniciadores (ion cloruro generalmente) del ataque corrosivo, pueden difundir hacia el acero a través de la masa de concreto penetrando por capilaridad o difusión hasta el acero de refuerzo, dando como resultado la corrosión de éste, que a su vez causa un aumento en el volumen del acero, lo cual puede dar origen a grietas y descascaramientos del concreto.

La permeabilidad de la pasta de cemento varía con el desarrollo de la hidratación. En una pasta fresca, el flujo de agua se regula por el tamaño, la forma y la concentración de los granos originales del cemento. Con el avance de la

hidratación, la permeabilidad decrece rápidamente, ya que el volumen total del gel de tobermorita (incluidos los poros en el gel) es aproximadamente 2:1 veces mayor que el volumen del cemento no hidratado, de modo que el gel gradualmente llena parte del espacio que originalmente estaba lleno de agua. En una pasta inmadura la permeabilidad depende del tamaño, la forma y la concentración de las partículas del gel, y del hecho de que los huecos capilares sean o no discontinuos.

La severidad del ataque químico por cualquier solución agresiva gaseosa está fuertemente influenciado por la permeabilidad del concreto, la cual puede variar por un factor de  $10^6$  entre diferentes concretos.

La permeabilidad del concreto es una función directamente proporcional a la relación agua/cemento e inversamente proporcional al tiempo de curado.

Un concreto de baja permeabilidad requiere de una relación agua/cemento baja y un período de curado húmedo adecuado.

El concreto empleado en estructuras que retengan agua o que estén expuestas a mal tiempo o a otras condiciones de exposición severa debe ser virtualmente impermeable y hermético. La hermeticidad se refiere a menudo como la capacidad del concreto de refrenar o retener el agua sin escapes visibles. La permeabilidad se refiere a la cantidad de migración de agua a través del concreto cuando el agua se encuentra a presión, o a la capacidad del concreto de resistir la penetración de agua u otras sustancias (líquido, gas, iones, etc.). Generalmente las mismas propiedades que convierten al concreto menos permeable también lo vuelven más hermético.

La disminución de permeabilidad mejora la resistencia del concreto al ataque de sulfatos, a la penetración del ion cloruro y otros productos químicos.

La permeabilidad también afecta la capacidad de destrucción por congelamiento en condiciones de saturación, ya que, la permeabilidad de la pasta es de particular importancia porque recubre a todos los constituyentes del concreto.

Finalmente, la permeabilidad del concreto se ve afectada también por la relación agua/cemento, a una relación agua/cemento alta se produce una pasta de más porosidad y viceversa.

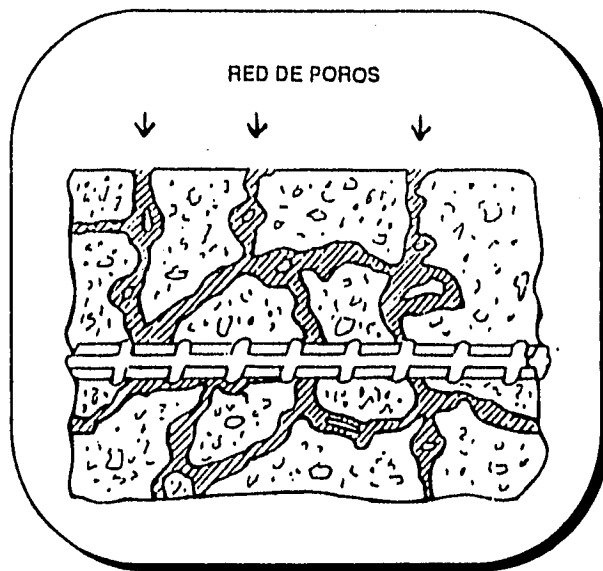


Figura 1.1 Esquema de la red de poros del concreto.

# **CAPITULO II**

## **“FUNDAMENTOS DE CORROSIÓN”**

## 2.1 TIPOS DE ÓXIDOS PRESENTES SOBRE LA SUPERFICIE DEL REFUERZO METÁLICO.

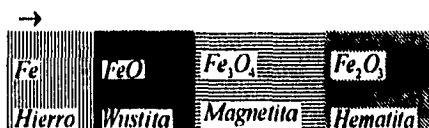
Los metales, salvo los metales nobles (oro, platino) no existen como tales en la naturaleza, sino combinados con otros elementos químicos formando los minerales, como los óxidos, sulfuros, carbonatos, etc.

Así pues, el hierro se encuentra en los yacimientos bajo la forma de óxido, como hematita ( $Fe_2O_3$ ) siendo ésta el estado más estable del hierro.

Cuando al acero se le somete a un tratamiento determinado para obtener hierro, la tendencia de éste a volver a su estado natural de óxido metálico es tanto más fuerte, cuanto que la energía necesaria para extraer el metal del mineral es mayor.<sup>14</sup>

El proceso pasa por tres etapas. Primero, la superficie del metal aparece limpia y brillante por cierto tiempo. Luego aparecen de pronto núcleos de óxido que comienzan a extenderse sobre la superficie del metal. Esta segunda etapa concluye cuando los núcleos se unen y cubren toda la superficie. La tercera etapa es la llamada de engrosamiento del óxido resultante de este conglomerado de núcleos.<sup>15</sup>

Galvele estudió la composición de las capas de óxido formadas durante la elaboración del acero, encontrando que el acomodamiento de dichas capas era:



La capa más externa tiene hierro oxidado en su estado máximo y la zona cercana al metal base posee un óxido ferroso.

Por otro lado, la fabricación de las varillas de acero para la elaboración de estructuras de concreto reforzado se lleva a cabo por un proceso de laminación en

caliente, conocido con el nombre de calamina o escama de laminación, dando una varilla con una superficie de óxido gris oscuro.

Ahora, debido a que la formación de las capas de óxido dependen de la temperatura y de la presión del oxidante; Garber y Pfeil<sup>16</sup> determinan que debajo de 570 °C la wustita ( $FeO$ ) se transforma en magnetita, por lo que de este modo la escama está compuesta sólo de hematita ( $Fe_2O_3$ ) y magnetita ( $Fe_3O_4$ ) sobre el hierro base.

La desaparición de la wustita ( $FeO$ ) se explica por la relativa facilidad que tienen los iones para difundirse durante el enfriamiento, depositándose en la base como hierro metálico, produciéndose así la magnetita.

La magnetita y la hematita presentan estructuras más densamente empaquetadas y ofrecen mayores impedimentos a la difusión iónica. A su vez, estas capas compactas de óxidos forman una película pasivante que se adhiere a la superficie de la varilla metálica.

La estructura de la película pasivante es en general la más estable desde el punto de vista termodinámico del sistema.

## 2.2 ASPECTOS GENERALES DEL PROCESO DE PASIVACIÓN.

Se dice que una superficie metálica se encuentra "pasiva" cuando permanece sin cambio visible por un periodo indefinido, debido a la presencia de una película de óxido.

La pasividad de los metales es un fenómeno conocido desde hace más de siglo y medio. En 1836 M. Faraday sugirió que la pasivación era causada por un capa de óxido invisible formada en la superficie metálica, o por un estado oxidado de la superficie que previene el contacto entre el metal y la solución. La teoría de la "capa de óxido" en su forma moderna se debe primordialmente a Evans.



Según Hoar y Schwabe<sup>15</sup>, al aumentar el potencial de un metal, la reacción de formación directa del óxido a partir del metal se hace posible desde el punto de vista termodinámico y termina por entrar en competencia con la reacción de disolución del metal. La pasivación aparece siempre a un potencial determinado (potencial de pasivación), el cual varía con el tipo de metal y medio corrosivo considerado. Franck y Vetter<sup>15</sup>, consideran que el potencial de pasivación varía con el pH de las soluciones de acuerdo a:

$$E_{pas.} = E_o - 0.058 \text{ pH}$$

apoyándose en considerar un electrodo de tipo metal-óxido y en una reacción del tipo:



La pasivación completa se alcanza cuando el material que constituye la película tenga las siguientes características:

- Conductividad iónica muy pequeña. La capa permanece delgada ( del orden de una monocapa) y se esparce lateralmente.
- Alta conductividad electrónica; La capa no puede sostener procesos anódicos en su superficie.
- Solubilidad química y velocidad de disolución muy pequeñas. No se disolverá la intercara película-solución y se formará más la intercara metal-película.
- Un amplio rango de potencial en el cual sea termodinámicamente estable.
- Buena adherencia al metal y alta resistencia a la compresión. Consecuencia de la formación de la película pasivante.

La película pasivante, además de proteger al acero contra la corrosión, aumenta la adherencia entre la varilla y el concreto.

Sin embargo, el rompimiento de la capa pasiva se lleva a cabo por cualquier factor que remueva parcial o totalmente la capa pasiva, con el consiguiente inicio de la corrosión.

### **2.3 CORROSIÓN.**

La corrosión es un fenómeno natural (espontáneo), por medio del cual los materiales metálicos se degradan debido a la reacción que se lleva a cabo con el medio ambiente, lo que provoca el consiguiente deterioro en las propiedades físicas y mecánicas del mismo, regresando en su mayoría a su estado de menor energía o de equilibrio estable, como son los compuestos (óxidos) en los que se encontraban originalmente en la naturaleza.

A la temperatura ambiente la forma de corrosión más frecuente y más seria es de índole electroquímica, ya que la destrucción química del material va acompañada de circulación de electricidad.

El origen de las corrientes eléctricas durante la corrosión son causadas por<sup>15</sup>:

1.- Dos o más metales distintos en contacto (corrosión galvánica). Tal como ocurre con el aluminio en contacto con el cobre o con el grafito.

2.- Presencia de fases diferentes en una misma aleación. Por ejemplo: aceros inoxidable sensibilizados.

3.- Presencia de capas de óxidos conductores de electrones. Por ejemplo, óxido de laminación en chapas de hierro, o capas de aceite carbonizado en el interior de tubos de cobre.

4.- Diferentes grados de aireación de una pieza metálica. Se observa que las zonas en que escasea se comportan como ánodos cuando está unidas a otras zonas con buena aireación.

5.- Corrientes inducidas por circuitos eléctricos mal aislados. Tal es el caso de la corrientes vagabundas en estructuras metálicas enterradas.

6.- Presencia de oxidantes en el medio, que causan la disolución electroquímica de un metal aun cuando éste sea puro, sin segundas fases, y aislado de otros metales.

Por otra parte, para que exista el proceso de corrosión deben cumplirse las siguientes condiciones<sup>14</sup>:

- a) Debe haber un ánodo y un cátodo.
- b) Debe existir un potencial eléctrico entre los dos electrodos (ánodo y cátodo).
- c) Debe haber un conductor metálico que conecte eléctricamente el ánodo y el cátodo (transportando los electrones generados en éstos).
- d) Tanto el ánodo como el cátodo deben estar sumergidos en un electrolito conductor de la electricidad, el cual esta ionizado; para difundir los iones y los productos de la corrosión.

Una vez cumplidas estas condiciones, puede circular una corriente eléctrica dando lugar a un consumo de metal (corrosión) en el ánodo. La circulación de electrones del ánodo al cátodo a través del metal es función de las diferencias de potencial entre las zonas anódica y catódica. La diferencia de potencial puede producirse al origen de las corrientes eléctricas mencionadas anteriormente.

La diferencia de potencial creada entre el ánodo y el cátodo hace que comience la oxidación o disolución del metal. El metal disuelto pasa a formar iones en el electrolito. los electrones liberados pasan a través del contacto eléctrico y llegan hasta el cátodo. En el cátodo los electrones producidos en el ánodo se combinan con iones presentes en el electrolito, efectuándose así una reducción.

La circulación de corrientes de corrosión entre los ánodos y cátodos que comprenden las pilas locales sobre una superficie metálica y la aparición de reacciones secundarias ocasionan, frecuentemente, un cambio en el potencial de electrodo del metal que, por tanto, alcanzará un valor distinto del reversible consignado en la serie de fuerzas electromotrices. Este nuevo valor que se observa cuando existe corrosión es el llamado potencial de corrosión o potencial mixto del metal.

Cabe mencionar que para que la corrosión se lleve a cabo, es necesario que se presenten todas las condiciones mencionadas anteriormente, ya que en caso de que falte uno de ellos, el proceso de corrosión no se presenta; o, si ya estaba presente, se detiene temporalmente para reiniciar en cuanto sea posible; es decir, en cuanto estén todas las condiciones presentes, además de que la modificación de alguna de las condiciones constituye el punto clave para poder controlar un proceso de corrosión.

Por otro lado, si los productos de corrosión son solubles en el medio corrosivo se observa un ataque muy rápido. En la mayoría de los casos, los productos de corrosión son insolubles y forman escamas poco adherentes sobre la superficie del metal o bien, películas protectoras estrechamente adheridas que sofocan el proceso de corrosión.

♣ Para nuestro estudio, el proceso de corrosión del acero comprende:

f) La destrucción de la película pasivante. Esta se da por diferentes causas, entre las principales se encuentran la disminución del pH y el ataque de iones agresivos.

Esto se da, debido a que a nivel microscópico en una sección de la pieza de acero esta formada en su mayor parte por hierro en el cual se observan dos fases: una rica en hierro (ferrita) que actúa como ánodo, y otra fase que contiene carburos

de hierro en una matriz de ferrita (perlita) que actúa como cátodo. Puesto que estas dos fases diferentes ambas son conductoras, es fácil establecer un par galvánico con la presencia de un electrolito; el electrolito lo constituirá la humedad que existe en la atmósfera, la cual forma películas muy finas y casi imperceptibles sobre la superficie metálica. Esta película de agua acumulará y concentrará ciertos elementos e impurezas que están presentes en el aire, tales como el oxígeno, bióxido de carbono, anhídrido sulfuroso, cloruros, etc., dando como resultado una solución muy conductora y específicamente agresiva. Así pues, la pila de corrosión queda constituida, la conexión eléctrica es la misma pieza metálica y el electrolito formado sobre la estructura baña a ambas fases. La ferrita es siempre más anódica (activa) que la fase perlítica (noble). La corrosión se produce a nivel de microceldas; millones de ellas están distribuidas a lo largo y a lo ancho de la pieza de acero. Por tanto, como se ve basta la presencia de heterogeneidades, aún dentro de una sola fase metálica, para que la corrosión se presente, existiendo para esto la presencia de un electrolito.

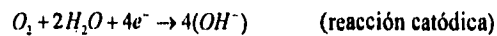
ii) El ataque del acero una vez removida la película pasivante, o corrosión está dado por:

- La disolución anódica del hierro:  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$  (reacción anódica)

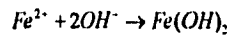
Los iones del hierro entran a la solución como iones  $Fe^{2+}$ , debido a la formación de una FEM o fuerza electromotriz generada por la diferencia de potencial al haber contacto eléctrico entre el ánodo y el cátodo.

Por cada átomo de hierro diluido quedan dos electrones en el acero, disminuyendo el potencial eléctrico del mismo sin embargo, el potencial no puede disminuir infinitamente, por lo que los electrones pasan a través del acero hasta el

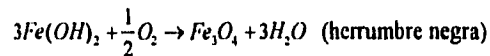
cátodo (la superficie cubierta con la película pasivante en la interfase acero/concreto; o hasta la perlita en caso de que la película pasivante esté removida), para formar iones  $OH^-$  :



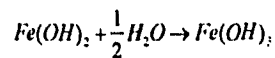
Los iones  $OH^-$  transportan la carga eléctrica a través del concreto hasta el ánodo, donde reaccionan con el  $Fe^{2+}$  para formar hidróxido ferroso:



El cual a su vez, a temperaturas comprendidas entre 303-373 K se tiene que, de acuerdo con Joshi, P.S.<sup>17</sup> puede ser convertido por el agua y oxígeno disponibles a:



y

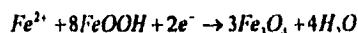


Esto último constituye la herrumbre roja hidratada ( $FeOOH + H_2O$ ), y en ausencia de oxígeno se forma  $Fe_3O_4$ , o magnetita.

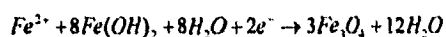
De manera general se acepta que el producto rojo que observamos en las varillas expuestas al ambiente, está formado de herrumbre férrica ( $FeOOH$ ), esto es, óxido férrico conteniendo moléculas de agua en exceso, que llega a ser hasta de 12%, del cual, la mitad es humedad libre disponible para el proceso de corrosión. Cuando la velocidad de formación de esta herrumbre es adecuada puede incluso

actuar como barrera protectora, disminuyendo así la velocidad de corrosión. Esta barrera protectora, puede dejar de serlo si con el tiempo se deshidrata cambiando ligeramente de volumen originando con esto grietas, o bien por una velocidad inicial de corrosión muy alta, lo que produce una especie de acción de cuña en la intercara metal óxido, afectándose la continuidad de la capa.

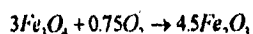
A su vez, la reacción anódica  $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$  es balanceada por la reducción catódica, bajo condiciones de humedad y cuando el acceso de oxígeno es limitado; de acuerdo con Evans:



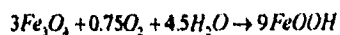
ó



Al secarse y aumentar el oxígeno disponible la magnetita  $Fe_3O_4$  se oxida a la forma férrica con una ganancia neta de  $0.5 Fe_2O_3$ , teniendo entonces:



ó



Como la reacción anódica y catódica son mutuamente dependientes es posible reducir la corrosión reduciendo la velocidad de alguna de ellas. En este caso, el hierro no se corroe en agua natural o de mar si está libre de aire porque no hay reacción catódica.

Vesikari<sup>18</sup> observó que los productos de la corrosión del acero ocupan un mayor volumen que el hierro (en relación de 6:1), por consiguiente, al formarse tales productos el concreto puede no soportar los esfuerzos de la expansión de los mismos y romperse, perdiendo sus propiedades físicas y químicas originales.

## 2.4 ASPECTOS TERMODINAMICOS DE LA CORROSION.

Todas las interacciones entre los elementos y compuestos están gobernadas por los cambios de energía libre de la que ellos disponen. Así pues, el metal se corroerá espontáneamente, si el cambio en  $\Delta G$  es negativo, ya que el metal es activo. Pero, si el  $\Delta G$  es cero o positivo, el metal no presentará corrosión.

A temperatura ambiente la mayoría de los compuestos químicos de los metales (minerales) tiene valores de  $\Delta G$  inferiores a la de los metales puros, por ello la mayoría de los metales tienen una tendencia inherente a corroerse.

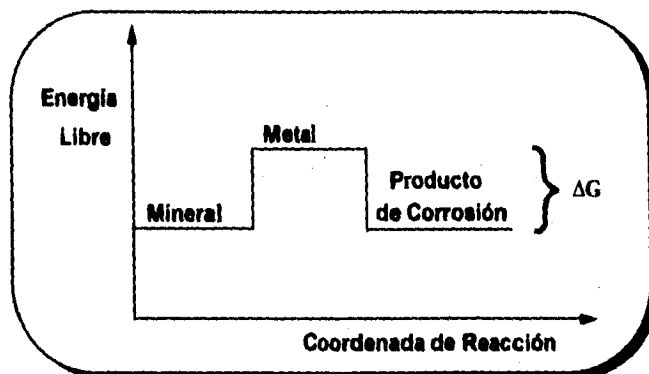


Figura 2.1 Diagrama de energía para los metales y sus compuestos.<sup>19</sup>

El cambio de energía libre que acompaña una reacción electroquímica puede calcularse mediante:

$$\Delta G = -nFE$$

donde;  $\Delta G$  es la energía libre,  $n$  es el número de electrones intercambiados en la reacción,  $F$  es la constante de Faraday y  $E$  es igual al potencial de celda. Aquí se ve la necesidad de determinar el potencial de celda.



## 2.5 POTENCIAL CELDA.

Para determinar el potencial de un sistema en el cual las actividades de los reactivos no es igual a 1 podemos utilizar la ecuación de Nernst:

$$E = E^{\circ} + 2.3 \frac{RT}{nF} \log \frac{a_{oxid}}{a_{red}}$$

donde  $E$  es el potencial de media celda.,  $E^{\circ}$  es el potencial estándar de media celda,  $R$  es la constante de los gases,  $T$  es la temperatura absoluta,  $n$  es el número de electrones intercambiados,  $F$  es la constante de Faraday,  $a_{oxid}$  y  $a_{red}$  son las actividades (concentraciones) de las especies oxidada y reducida, respectivamente.

El desarrollo de la ecuación de Nernst facilitó el estudio del fenómeno electroquímico en las celdas de corrosión, sin embargo, un pequeño inconveniente presente en ella es que se tiene que conocer el valor del potencial estándar de media celda, para así determinar la espontaneidad de un proceso dado.

$E^{\circ}$  es una diferencia de potencial, el primer paso que se dio fue referir dicha diferencia a un electrodo de potencial estable, y así poder hablar en términos de potencial absolutos. Por razones históricas, se tomó como electrodo de referencia al electrodo de hidrógeno, dándole un potencial de 0.00 V, cuando se tienen las condiciones de 1 atmósfera de presión para el gas hidrógeno y una solución de iones hidronio de una actividad unitaria.

## 2.6 POTENCIAL DE CORROSION.

Uno de los parámetros ensayados es la diferencia de potencial a través de la interfase acero-concreto. En éste caso el potencial a circuito abierto es el potencial de corrosión o potencial mixto. Este potencial es el que presenta un metal en el cual ocurren simultáneamente al menos dos reacciones, y que en estado estable su valor

es aquel para el cual la suma de las corrientes anódicas es igual a la suma de las corrientes catódicas. El valor absoluto de cualquiera de las dos corrientes proporciona la magnitud de la corriente de corrosión.

El potencial de corrosión puede ser un indicador "seguro" del estado activo o pasivo del metal, sólo en ausencia de agentes agresivos. Así entonces, se dice que cuanto más noble sea éste, menos corroído estará el acero y viceversa.

Cuando en cambio se encuentran presentes dichos iones despasivantes, un potencial de corrosión muy positivo, es decir anódico, indicará la gran probabilidad de que aparezcan picaduras, y uno muy negativo un bajo riesgo de ello, o bien, que el electrodo ya a sufrido ataque localizado. De manera general, el potencial de corrosión es un parámetro que surge de consideraciones cinéticas pero sin embargo, no proporciona información sobre la magnitud de la velocidad de corrosión.

## 2.7 DIAGRAMAS DE POURBAIX (*E vs. pH*).

Estableciendo equilibrios entre las diferentes especies químicas que se obtienen al tener un metal en contacto con agua (sean óxidos, hidróxidos y sus iones) se ve que en algunos de esos equilibrios hay dependencia del *pH* en que se trabaja para determinar el potencial correspondiente, otros no dependen del *pH* sino del potencial y aún, algunos equilibrios dependen del potencial y del *pH*.

La manera de resumir y hacer manejable esta información es graficarla en un diagrama *E vs. pH*.

La principal limitante es que como parte de datos termodinámicos no podemos hacer predicciones sobre la velocidad de corrosión, ya que la termodinámica sólo nos hable de la factibilidad de un fenómeno pero no nos dice en qué momento ocurrirá, es decir; no habla de velocidades y cualquier intento de predecir cinéticamente una reacción basado exclusivamente en los diagramas de Pourbaix resultará erróneo.

A continuación se muestran los diagramas de Pourbaix para el hierro<sup>20</sup>, en los cuales se muestran las zonas de equilibrio entre las diferentes especies presentes en el sistema, así como las condiciones teóricas para los estados de pasividad, inmunidad y corrosión en función del potencial y el pH del sistema a una temperatura de 25 °C.

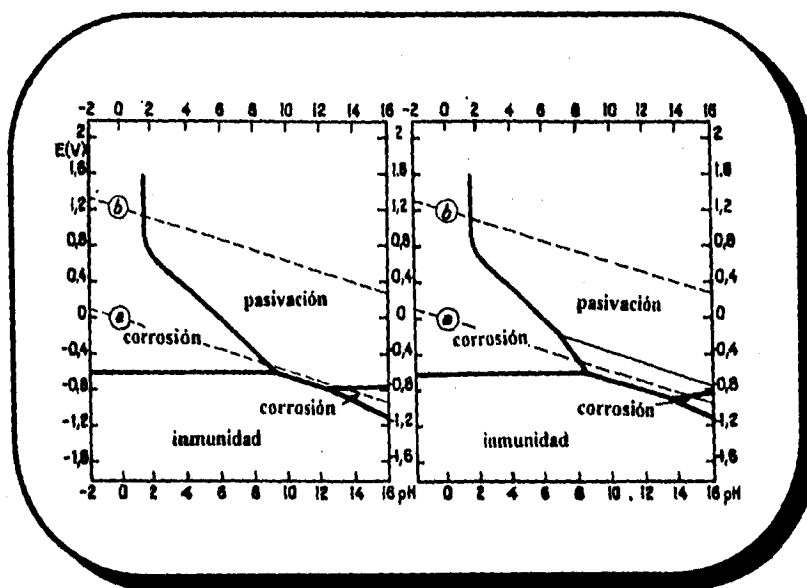


Figura 2.2<sup>20</sup>

- a) Suponiendo pasivación por la formación de una película de  $Fe_2O_3$ .  
 b) Suponiendo pasivación por la formación de las películas de  $Fe_2O_3$  y  $Fe_3O_4$ .

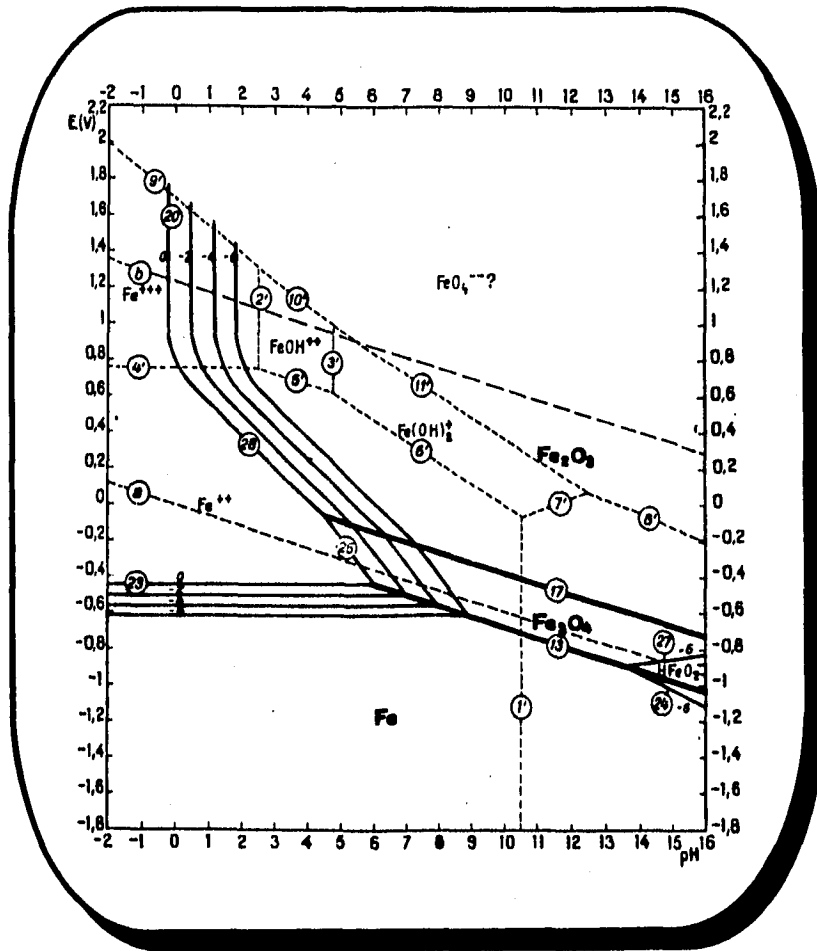


Figura 2.3 Diagrama de equilibrio Potencial vs.  $\text{pH}$  para el sistema hierro-agua, a  $25^\circ\text{C}$  (considerando como sustancias sólidas sólo  $\text{Fe}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )<sup>20</sup>

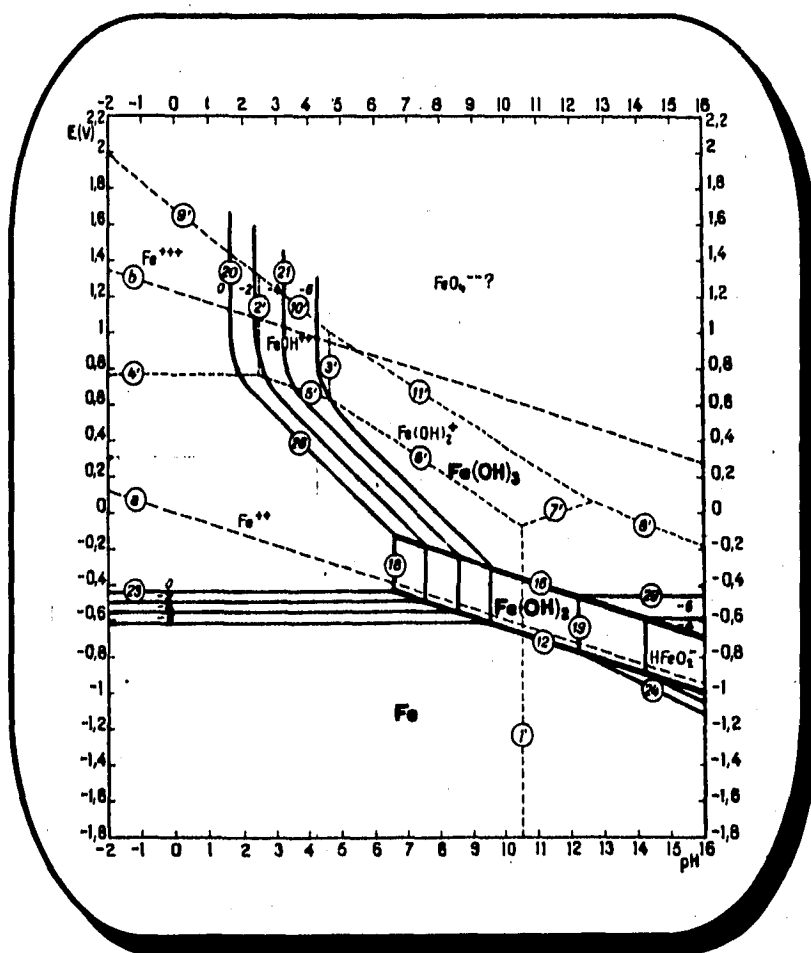


Figura 2.4 Diagrama de equilibrio Potencial vs. pH para el sistema hierro-agua, a 25 °C [considerando como sustancias sólidas sólo Fe, Fe(OH)<sub>2</sub>, y Fe(OH)<sub>3</sub>]

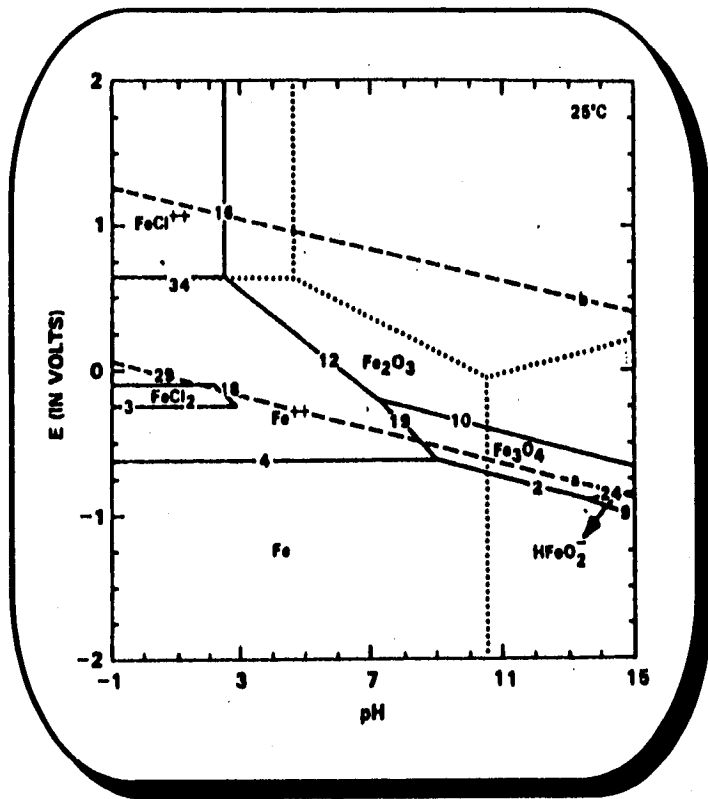


Figura 2. 5 Diagrama de Pourbaix para el sistema Fe-Cl<sup>-</sup>-H<sub>2</sub>O a 25 °C.

$[Cl^-] = 0.1 M.$ <sup>21, 22</sup>

## 2.8 CORROSION DEL ACERO DE REFUERZO EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO.

Las primeras observaciones sobre la corrosión del acero en el concreto fueron hechas a principios de este siglo principalmente en ambientes marinos y plantas químicas.<sup>23</sup>

En el concreto armado, existe un flujo de corriente directa desde el área anódica al concreto y a través del concreto a la zona catódica, regresando por la varilla de acero para cerrar el circuito.

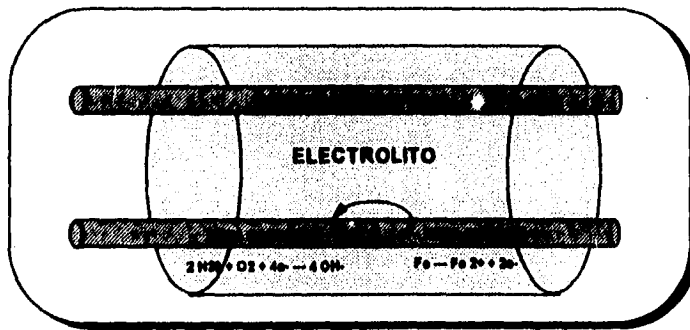


Figura 2.6 Representación gráfica.

El proceso de corrosión de los refuerzos metálicos en estructuras de concreto está fuertemente influenciado por :

- ◆ Factores dependientes del concreto ,como son: La permeabilidad ( la cual, a su vez, depende de la relación agua/cemento, cemento/arena, compactación y curado), la porosidad, el tipo de cemento, los agregados , los aditivos y la puesta en obra.

♦ Factores dependientes del refuerzo metálico: Naturaleza química del refuerzo (composición), naturaleza física del refuerzo (microestructura), condición superficial del refuerzo (tipo de óxido superficial) y sollicitaciones mecánicas en el refuerzo (tensión, compresión y torsión).

♦ Factores dependientes del medio de Servicio: Humedad relativa, degradación biológica, acción de diversas sustancias como:  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  y corrientes parásitas. Todos estos factores son electrolitos o soluciones iónicas que conducen la corriente eléctrica.

Normalmente la alta alcalinidad del concreto ( $pH > 12.5$ ), inhibe la corrosión del acero embebido en él, como puede verse en el siguiente diagrama de Pourbaix para el hierro.

En las estructuras de concreto armado, donde los refuerzos se encuentran previamente pasivados, el tipo de corrosión que se puede presentar es el localizado, ya sea por picaduras o bajo tensión.

La corrosión se inicia cuando la alcalinidad del concreto se reduce, por ejemplo a través del  $CO_2$ , o en la presencia de iones  $Cl^-$ , aún cuando la alcalinidad se mantenga relativamente alta.

El deterioro de las estructuras de concreto reforzadas debido a la corrosión, resulta del hecho de que los productos de corrosión (herrumbre), ocupan un volumen mayor que el del acero, lo cual provoca la generación de esfuerzos considerables sobre el concreto que le circunda, causando su agrietamiento; consecuentemente, la sección transversal del acero se reduce y posteriormente, se pierde la unión entre el acero y el concreto.



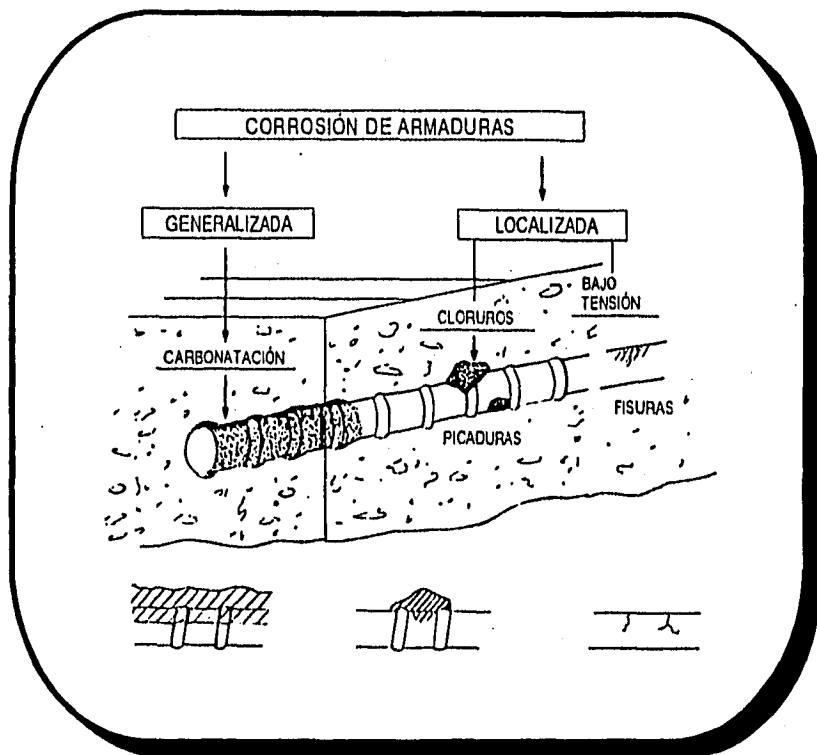


Figura 2.7 Tipos de corrosión de armaduras. Factores que las provocan.

## 2.9 EFECTOS DE LOS IONES CLORURO EN EL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDO EN EL CONCRETO.

Para una evaluación adecuada de la agresividad de una zona geográfica determinada, es necesario conocer los contaminantes y sus características. Así pues, la salinidad es un factor determinante en la aceleración de la corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto.

Los iones cloruro,  $Cl^-$ , pueden introducirse al concreto de varias maneras:

1. Como aditivo del concreto, ya que es uno de los más conocidos acelerantes del fraguado y generalmente es agregado en forma de  $CaCl_2$  hasta un porcentaje del 2% en peso de cemento. Los cloruros también pueden estar presentes en otros tipos de aditivos como los reductores de agua.

2. Como contaminante del agua de amasado, ya que unos tipos de agua pueden contener gran cantidad de cloruros. En algunos lugares se utiliza el agua de mar para amasar el concreto.

3. Como resultado de emplear arenas de playa no lavadas.

4. Los cloruros pueden provenir de las sales de deshielo usadas en los caminos y carreteras, salmueras industriales, brisa marina, agua de mar, niebla o vapores y difundir desde el exterior a través del sistema capilar del concreto.

5. Finalmente porque se hallen en el medio de servicio de las estructuras, como sucede en ambientes marinos, al estar en contacto con el aire cargado de sales cerca de las costas.

En el agua de mar, aproximadamente el 78 % de la sal el cloruro de sodio y el 15 % es cloruro y sulfato de magnesio; esto agrava un poco más el problema, puesto que el  $NaCl$  produce % mayores de cloruro libre y valores menores de pH, que otras sales de este anión, esto se debe a que, al parecer, los niveles de cloruro libre están afectados por el catión asociado.

Aún cuando un concreto hecho con agua de mar puede tener una resistencia temprana mayor que un concreto normal, sus resistencias a edades mayores (después de 28 días) pueden ser inferiores. Esta reducción de resistencia puede ser compensada reduciendo la relación agua/cemento. El sodio y el potasio de las sales presentes en el agua de mar que se utilice para fabricar concreto, se puede combinar con agregados reactivos a los álcalis de la misma manera que los álcalis en el cemento (aún cuando el contenido de álcalis en el cemento sea bajo).

El agua de mar que se utiliza para producir concreto, también tiende a causar fluorescencia y humedad en superficies de concreto expuestas al aire y al agua.<sup>4</sup>

La presencia del ion cloruro reduce la naturaleza protectora de la película de óxido, y no solamente puede generar altas velocidades de corrosión, sino que induce la formación de celdas macroscópicas provocadas por las diferencias de concentración del cloruro. Realmente el proceso de corrosión se inicia cuando la película de pasivación se rompe por primera vez y la concentración de cloruros se incrementa autocatalíticamente, lo cual produce un ataque localizado que se manifiesta en forma de picaduras en todos los puntos de rompimiento inicial.

Los iones cloruro atacan la capa de óxido protectora formada en el acero por el medio químico altamente alcalino (pH 12.5) presente en el concreto. Del contenido total de ion cloruro en el concreto, sólo es soluble en el agua aproximadamente del 50% al 85%; el resto se combina químicamente en reacciones del cemento, por lo tanto, el mayor problema que se tiene en la corrosión de la varilla de acero de refuerzo es el ingreso de iones cloruro hacia la estructura de concreto a través del medio ambiente. REF. ACI 201.2 R-77

En tales casos estas sales, por una desigual distribución atribuible a causas diversas, pueden dar lugar a pilas de concentración. Al mismo tiempo aumentan la conductividad del concreto y contribuye con ello a producir o a acelerar la corrosión.

Cuando un ion cloruro alcanza la capa pasiva que protege al acero rompe el enlace entre el fierro y el oxígeno, formándose una cavidad. Sin embargo esta capa tiende a regenerarse cubriendo otra vez esta cavidad por acción de iones  $OH^-$  de la solución que rodea la varilla, formando de nuevo el enlace. Este proceso ocurre cada vez que alguna cantidad de iones cloruro llega a la varilla, pero cuando la reserva de  $OH^-$  se agota, entonces los cloruros crean cavidades en la capa pasiva hasta llegar a la superficie de la varilla propiciando que el acero quede expuesto y se inicie la corrosión.

Estos productos o sus mezclas en diversas proporciones según las circunstancias, constituyen la llamada herrumbre que es insoluble.

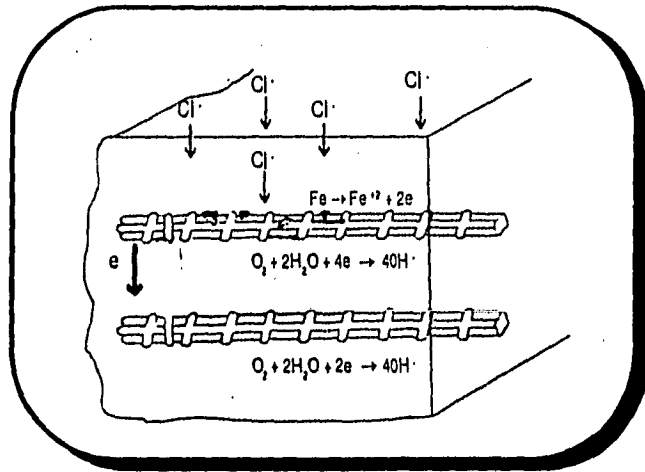


Figura 2.8 Penetración de los cloruros desde el exterior del concreto.

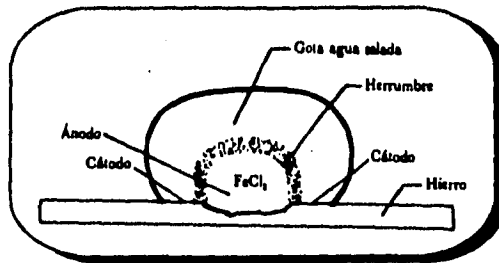


Figura 2.9 Ataque producido por una gota de agua salada.

Estos productos o sus mezclas en diversas proporciones según las circunstancias, constituyen la llamada herrumbre que es insoluble.

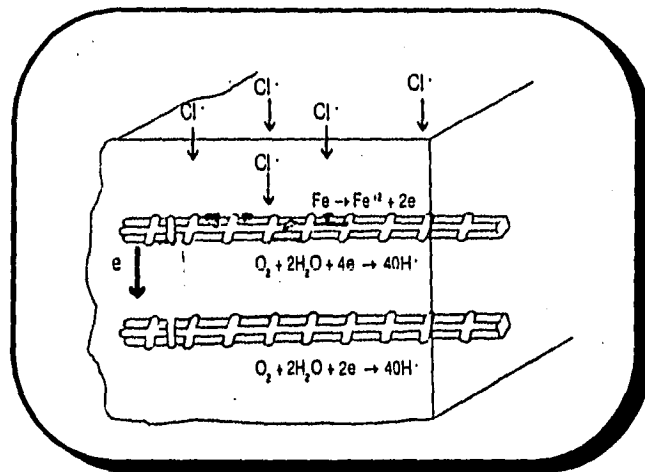


Figura 2.8 Penetración de los cloruros desde el exterior del concreto.

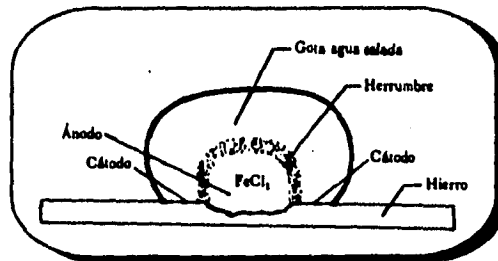
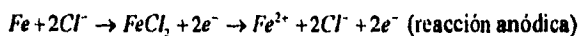


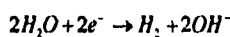
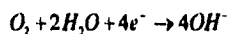
Figura 2.9 Ataque producido por una gota de agua salada.

Las reacciones llevadas a cabo están puestas de manifiesto en la figura 2.10 b), que representa el mecanismo de la acción corrosiva de una gota de disolución salina (cloruro) sobre una lámina de hierro, en este caso la acción corrosiva se debe a una aireación diferencial entre la zona periférica y la parte central de la gota, sumando además el efecto salino, por lo que la corrosión es mucho mayor.

En presencia de iones cloruro, oxígeno y agua en concreto las reacciones anódica y catódica se pueden representar como <sup>25</sup>:



reacciones catódicas:



La reacción anódica no implica necesariamente que se forme el  $FeCl_2$ , ya que éste es inestable, sino tan sólo como producto intermedio para poder entender el mecanismo de ataque de los cloruros al hierro.

La reacción catódica depende de la disponibilidad de oxígeno y del pH cercano a la superficie. En general la reducción de oxígeno es la reacción catódica principal, porque el concreto tiene un pH alto y el oxígeno es termodinámicamente un aceptor de electrones más poderoso que el  $H^+$  del agua.

El oxígeno en los poros del concreto reacciona con la llegada de electrones a partir del ánodo y causa la reducción de oxígeno en presencia de agua.

En presencia de cloruro sódico o de cloruro cálcico la reacción catódica que supone un aumento del pH, va acompañada de un alejamiento de los iones  $Cl^-$  que se desplazan hacia la región anódica; por el contrario, en la zona catódica se acumulan cationes sodio  $Na^+$  o calcio  $Ca^{2+}$ . Así pues, los productos de corrosión serán en la zona anódica cloruro ferroso y en la catódica hidróxido sódico (o de calcio), ambos solubles, ninguno de los cuales puede, en consecuencia, impedir ni retardar el proceso anódico ni el catódico, ni proteger el hierro de la corrosión.

Los productos que forman la herrumbre son muy voluminosos y porosos, ya que su volumen es mayor que la suma de los volúmenes de las sustancias a partir de las cuales resultan, por lo cual su formación tiene lugar con carácter expansivo y no pueden constituir un recubrimiento impenetrable para los iones, éstos se difunden a través de la herrumbre con gran facilidad, por lo que el proceso corrosivo continúa.

La herrumbre sale a través de microfisuras que después se hacen perceptibles, las cuales son ocasionadas por la fuerza expansiva del óxido hidratado formado y coinciden en posición, bien sea con las propias armaduras, o bien con los estribos de éstas. Las fisuras pueden continuar agrandándose hasta provocar la rotura del concreto y dejar las armaduras al descubierto.

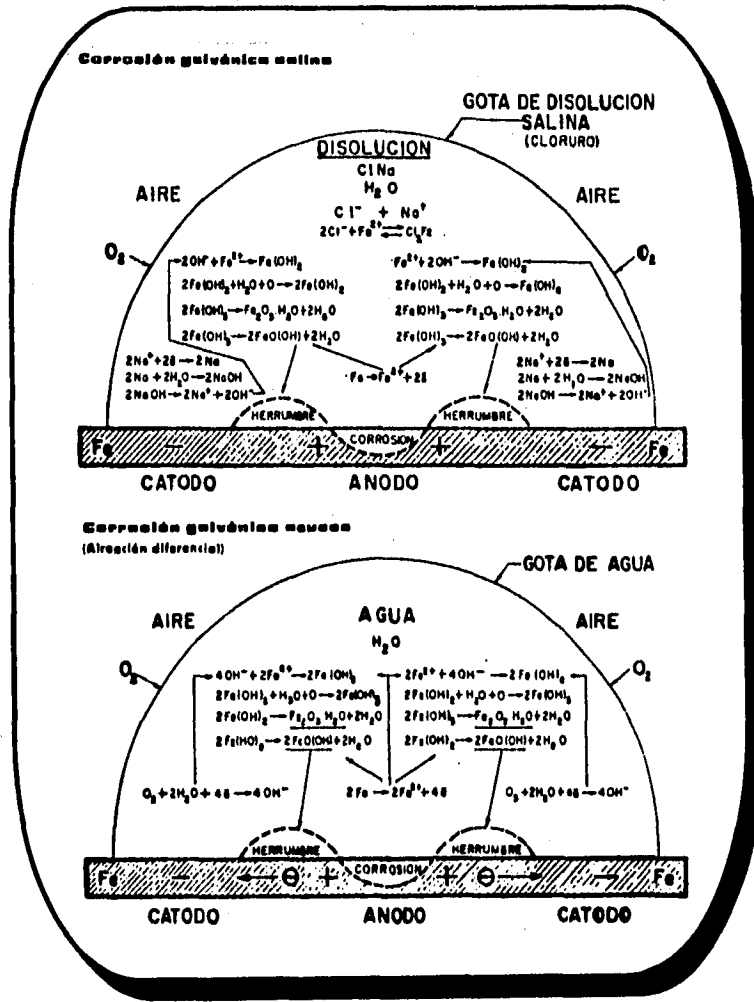


Figura 2.10 Reacciones que se llevan a cabo por el contacto de una gota de agua salada con el acero de refuerzo<sup>21</sup>. a) Corrosión Galvánica Salina. b) Corrosión Galvánica Acuosa.



\* Por lo que respecta al efecto de los iones cloruro sobre la capa pasivante de la superficie del acero de refuerzo se han propuesto algunas teorías<sup>26</sup>:

❖ **Teoría de capa de óxido.**

Algunos investigadores suponen que la pasividad de un metal se debe a una capa de óxido compacto formada en su superficie. Esta teoría postula que los iones cloruro penetran la capa de óxido a través de poros o defectos de la misma, de una manera más sencilla de lo que lo hacen otros iones (por ejemplo, los sulfatos). De esta manera, los iones cloruro deben dispersar coloidalmente la capa de óxido, con lo cual la hacen más fácil de penetrar.

❖ **Teoría de adsorción.**

En esta teoría se propone que los iones cloruro son absorbidos en la superficie metálica, compitiendo con el oxígeno disuelto o con los iones hidroxilos. El ion cloruro promueve la hidratación de los iones metálicos facilitando así la disolución del metal.

❖ **Teoría del complejo transitorio.**

Esta teoría considera una competencia entre los iones cloruro y los iones  $OH^-$  por los iones  $Fe^{2+}$  producidos por la reacción anódica de disolución de hierro, posteriormente, se forma un complejo soluble del cloruro de hierro. Este complejo puede difundir lejos del ánodo, destruyendo la capa pasivante de  $Fe(OH)_2$  y permitiendo que continúe la corrosión.

A cierta distancia del electrodo, el complejo se rompe, el hidróxido de hierro precipita y el ion cloruro se libera, con lo cual, queda en condiciones de transportar más iones ferrosos del ánodo. Si la corrosión no es controlada, más iones ferrosos emigrarán del sitio de corrosión y reaccionarán con el oxígeno para formar óxidos mayores de gran volumen, hasta 4 veces el volumen del metal disuelto, provocando esfuerzos internos que eventualmente fracturan al concreto.

Se han observado evidencias de este proceso cuando se rompe el concreto que presenta corrosión activa; un producto de reacción semisólido de color verde claro se encuentra cercano al acero, el cual, con la exposición a la atmósfera se vuelve negro y subsecuentemente, rojo herrumbre.

- Por otro lado, después de que el concreto es vaciado (también conocido como hidratación, el proceso de curado comienza inmediatamente. Durante este periodo de curado, se forman los poros de diferentes tamaños. El número y tamaño de los poros influye fuertemente en la difusión del cloruro. Por consiguiente, el coeficiente de difusión del cloruro es generalmente función del tiempo, debido a que cuando el concreto es vaciado, su concentración de cloruro es muy baja, a medida que el concreto es expuesto a ambientes marinos, la concentración en la superficie se incrementa.

Así pues, existen teorías que describen el proceso que se lleva a cabo a referirse específicamente a los iones cloruro que penetran desde el exterior de las estructuras por difusión:

1.-Por "difusión" a través del electrolito los iones ferrosos  $Fe^{2+}$  y los iones hidroxilo  $OH^-$  pueden reaccionar lejos de las respectivas zonas anódica y catódica, dando lugar a la formación de hidróxido ferrosos  $Fe(OH)_2$ , el cual, por la acción del oxígeno del aire, puede transformarse en hidróxido férrico  $Fe(OH)_3$ , en óxido férrico hidratado  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ , o bien en un oxihidróxido de hierro también hidratado  $FeO(OH) \cdot H_2O$ .

2.-Según el modelo del Defecto Puntual, está previsto que la ruptura de la pasividad es causada por difusión de cationes vacantes de la interfase película-solución a la interfase metal-película. La absorción de iones cloruro hacia las vacantes de oxígeno en la interfase película-solución eleva esta difusión. Si la velocidad de difusión del catión excede aquella a la cual los cationes vacantes están siendo consumidos en la interfase metal-película, entonces los iones vacantes en

exceso condensan para formar un condensado de iones vacantes. Una vez que excede un tamaño crítico, la película llega a ser inestable y sufre colapso local. Esto además postulando que los iones cloruro se incorporan al interior de la película ocupando lugares de iones vacantes. Esto conduce a una disminución en la concentración de anión vacante y un acompañamiento de incremento en la concentración del catión vacante.<sup>27</sup>

3.- Con todo rigor, la ley de Fick (aún a nivel de armaduras) aplica a una penetración de materia sin reacción química en un sólido homogéneo.<sup>16</sup> Si consideramos que el ion cloruro reacciona, aunque no de manera completa con el  $C_3A$ , la ley de Fick sólo podrá emplearse sin tomar en cuenta dicha reacción (esto significa una poca proporción de  $C_3A$  en el concreto). De igual manera la ley de Fick no se aplica en un concreto de poca porosidad. La difusividad (coeficiente de difusión) aparente, es decir, la obtenida aplicando la ley de Fick, de los cloruros en el concreto es del orden de  $10^{-7}$  a  $10^{-10}$   $\text{cm}^2/\text{seg}$ .

La porosidad del concreto es un factor que afecta al coeficiente de difusión de cloruros en los poros del concreto. Es por eso que, se ha realizado un modelo para la obtención de coeficientes de difusión de cloruros en estructuras de concreto.<sup>28</sup>, que considera: que el agua contenida en los poros del concreto está a temperatura constante, que la difusión del ion puede producirse en el volumen del líquido intersticial o en las paredes de los poros, admite la existencia de "lugares" donde se pueden encontrar el ion. En ciertos sitios el ion puede quedar atrapado interrumpiéndose su difusión. Este cepto correspondería, por ejemplo, a elementos que pueden reaccionar con el ion agresivo difusor. El gradiente de concentración de iones agresivos, origen de la difusión, se debe a que el concreto está en contacto con un medio acuoso cuyo contenido en dicho ion es mayor que la concentración en el concreto.

Se dice que, para niveles de cloruro por debajo de 1%, las reacciones que ocurren sobre el acero 1020 en solución saturada de  $Ca(OH)_2$  son inicialmente de transferencia de carga controlada y la película pasiva es estable. Cuando la concentración de cloruro aumenta de 1% a aproximadamente 6%, las reacciones interfaciales llegan a ser de difusión controlada y el ataque del cloruro empieza a romper la película pasiva. A niveles de cloruro por arriba del 6%, ocurre el rompimiento completo de la película pasiva, aumenta la velocidad de corrosión y la transferencia de carga gobierna nuevamente las reacciones electroquímicas.<sup>27</sup>

Considerando a las reacciones en el cátodo y en el ánodo, los factores primarios que controlan la corrosión del acero en concreto son la disponibilidad de oxígeno en los poros o disponibilidad de agua, pH y el grado de despasivación del acero por los iones  $Cl^-$ .

Investigaciones al respecto, indican que aún en presencia de iones cloruro, la velocidad de corrosión del acero será muy lenta si el concreto está continuamente saturado de agua.

Para prevenir riesgos, se considera importante conocer la cantidad de iones hidróxido que hay en el concreto, un parámetro de suma importancia en el estudio de la corrosión de la varilla de refuerzo es la relación  $[Cl^-]/[OH^-]$ , la cual es la mejor manera de evaluar los riesgos de por corrosión.

Un cociente de 0.6 a pH entre 11.6 y 12.4, según reportan Andrade y Page, es a menudo considerado como el parámetro aproximado arriba del cual la despasivación del acero empieza a ocurrir.<sup>28</sup>

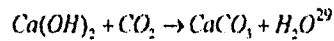
Por otra parte, el reglamento de Construcción del American Concrete Institute, ACI 318, limita el contenido de ión cloruro soluble al agua en el concreto, a los siguientes porcentajes en peso del cemento:

<b>CONTENIDO MAXIMO DE ION CLORURO (Cl<sup>-</sup>) SOLUBLE AL AGUA EN EL CONCRETO.</b>	
<b>Tipo de Elemento.</b>	<b>% respecto al peso de cemento.</b>
Concreto presforzado.	0.06
Concreto reforzado expuesto a cloruros durante su servicio.	0.15
Concreto reforzado que estará seco o protegido de la humedad durante su servicio.	1.00
Otras construcciones de concreto reforzado.	0.30

## 2.10 CARBONATACIÓN.

Debido a la alcalinidad del cemento Portland hidratado, el concreto puede reaccionar con el CO<sub>2</sub> atmosférico y reducir su pH hasta valores cercanos a 9, donde el acero no se encuentra totalmente pasivado, pudiendo ocurrir la corrosión de éste.

La reacción que se lleva a cabo es:



La carbonatación no es un problema si el concreto se encuentra totalmente seco, o bien, saturado completamente con agua.

La carbonatación no se presenta cuando el concreto armado se encuentra expuesto a cloruros.<sup>30</sup>

## **2.11 METODOS ELECTROQUIMICOS PARA LA INSPECCION Y ANALISIS DEL ESTADO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO.**

Al determinar el grado de corrosión que presenta una estructura de concreto en cualquier medio, se busca aplicar pruebas no destructivas y obtener un análisis confiable del estado que guarda dicha estructura.

Los métodos que cumplen con los anteriores requisitos y que se aplican en el presente trabajo son:

- Determinación de Potenciales de Media Celda de la Estructura.
- Determinación de la Resistividad Eléctrica de la Estructura.

Cabe hacer notar que la detección de la corrosión en estructuras de concreto haciendo uso del método del potencial de media celda está muy extendido en la ingeniería civil, ya que este método permite la localización de áreas donde está presente la corrosión activa, más no determina la magnitud del problema. No obstante, las mediciones in situ de la resistividad del concreto adyacente al refuerzo puede ser usado junto con el método del potencial de media celda para evaluar la probable velocidad de corrosión.

En seguida se describe cada uno de los métodos electroquímicos utilizados.

**2.11.1 Método de Prueba Estándar para potencial de media celda del acero de refuerzo en concreto.**

En las estructuras de concreto, la alta resistividad de éste, aunado con el hecho de que la acción de las macroceldas de corrosión involucra una respuesta eléctrica, permite que las mediciones del potencial sobre la superficie del concreto tiendan a la localización de áreas anódicas y catódicas en el acero de refuerzo, pudiéndose construir mapas de potenciales para el acero embebido en el concreto. Esta técnica es la más usada en el campo por su facilidad de manejo, pero la medida de un potencial electroquímico no da información cuantitativa sobre la velocidad con que se lleva a cabo el proceso de corrosión.

La normatividad relacionada con la evaluación de corrosión de acero de refuerzo en concreto está contenida en una norma de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM), la cual describe una metodología para evaluar la actividad de corrosión de la varilla de refuerzo en concreto<sup>31</sup>. [APENDICE A]

**2.11.2 Método para la determinación de la resistividad eléctrica del concreto reforzado.**

La resistividad de un material determinado es igual (numéricamente) a la resistencia que ofrece el material contenido en un cubo de 1 cm. de arista. Dada por la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

*Ecuación 2.1*

donde:  $R$  = resistencia del material. ( $\Omega$ ),  $A$  = área de cubo contenedor. (cm.) y  $L$  = longitud del cubo contenedor. (cm.)

Para una sección cilíndrica se tiene que:

$$A = 2\pi ha$$

donde:  $h$  = altura del cilindro. (cm.) y  $a$  = radio del cilindro. (cm.)

∴ sustituyendo el área en la ec. 2.1 y haciendo los arreglos correspondientes, se tiene que la resistividad  $\rho$  obtenida es:

$$\rho = 2\pi aR$$

ó (aplicando la ley de Ohm)

$$\rho = 2\pi a \left( \frac{V}{I} \right)$$

donde:  $V$  = Voltaje (Volts.),  $I$  = Intensidad de corriente (Amper) y  $a$  = Espaciado entre electrodos.

El método para determinar la resistividad es propuesto por Wenner, dándosele también el nombre de método de los cuatro electrodos.<sup>32</sup>

Se mide la resistencia entre las dos varillas internas o electrodos de potencial; las dos varillas externas sirven para introducir corriente en el concreto. El valor obtenido corresponde a la resistividad promedio a una profundidad aproximadamente igual al espaciamiento entre los electrodos.

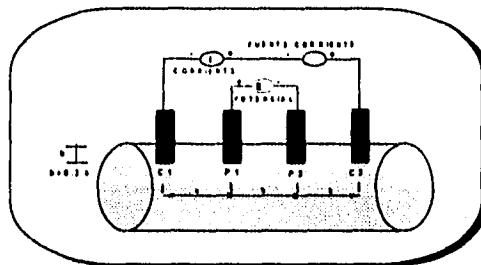


Figura 2.11 Medición de la resistividad del suelo por el método de Wenner o de los cuatro electrodos.



C. Alonso y González<sup>33</sup> observaron un incremento en la resistencia eléctrica en muestras de concreto elaboradas con diferentes tipos de cemento, el cual, es atribuido a la precipitación del carbonato de calcio, la sílica, la alúmina y los óxidos férricos; esto trae como consecuencia que disminuya la permeabilidad del concreto, así como una desaparición de diferentes iones de la solución poro.

La resistividad eléctrica en el concreto se debe principalmente al transporte iónico a través de la red de poros por un electrolito acuoso. Por eso, la humedad, que disuelve las sustancias iónicas del concreto es el parámetro básico en la conducción eléctrica. El nivel de saturación de agua del poro depende de la permeabilidad total (cantidad total de espacios vacíos que pueden ser ocupados por el agua) y de la humedad relativa del medio ambiente.

Así pues:

- La resistividad del concreto aumenta al pasar el tiempo.
- La resistividad del concreto saturado aumenta con el descenso de la relación agua/cemento.
- La resistividad del concreto parcialmente saturado aumenta con el aumento de la relación agua/cemento.
- La resistividad del concreto aumenta con la disminución de la humedad.
- La resistividad del concreto aumenta con la disminución de la temperatura.

La ley de Hinrichson-Rash<sup>32</sup> para el concreto, nos muestra la influencia de la temperatura sobre la resistividad:  $\rho_1 = \rho_2 e^{\frac{a}{T_1 - T_2}}$  donde  $\rho_1$  y  $\rho_2$  son las resistividades a las temperaturas absolutas  $T_1$  y  $T_2$ ;  $a$  es una constante cuyo valor es 2889 para el intervalo 6-26 °C.

Aún no existe un método establecido como norma oficial para la determinación de la resistividad en el concreto. Sin embargo se ha utilizado el método basado en el artículo de Millard, S.G., et. al.<sup>35</sup> [APENDICE B]

## 2.12 METODOS DE PROTECCION CONTRA LA CORROSION DEL ACERO DE REFUERZO EN EL CONCRETO.

En el caso particular de las estructuras de concreto armado, los métodos de protección pueden clasificarse de la siguiente manera:

1. Aquellos que actúan sobre el concreto, impidiendo la difusión de  $O_2$  y de los agentes agresivos del exterior a través de los poros del concreto. Para este fin se han utilizado aditivos reductores de agua, fluidificantes, inclusores de aire, hidrófobos y materiales finamente divididos. También se han aplicado sobre la superficie del concreto membranas impermeables y polímeros.

2. Aquellos que modifican la superficie del refuerzo metálico, aumentando su resistencia a la corrosión. Se han empleado recubrimientos metálicos de zinc y níquel y en algunos casos se ha empleado acero inoxidable como refuerzo. También se usan recubrimientos no metálicos, principalmente resinas epóxicas con buenos resultados.

3. Aquellos que actúan sobre la corrosión misma. Para este fin se emplean inhibidores de la corrosión y sistemas de protección catódica. La protección catódica es el método más versátil para el control de la corrosión ya que es aplicable a cualquier estructura eléctricamente continua y es casi el único recurso disponible para controlar el problema, una vez que se ha detectado en una estructura de servicio. Los métodos de protección catódica invierten el flujo de la corriente de corrosión a través del concreto y el acero de refuerzo. Esto se logra insertando un ánodo no estructural en el concreto y forzando el acero para que sea el cátodo por medio de la carga eléctrica del sistema. El ánodo se conecta al polo positivo de un rectificador. Puesto que la corrosión ocurre donde la corriente abandona al acero, el acero no puede corroerse si está recibiendo la corriente inducida.

Si se quiere lograr una reparación satisfactoria se debe eliminar la causa fundamental de la falla. Si la grieta ha sido causada por una sobrecarga, el remedio

inyectando resinas epóxicas es fácil, pero si la presión viene desde el interior debido a la corrosión de las varillas de refuerzo, puede ser inevitable la acumulación posterior de ese esfuerzo interno.

Aunque la demolición puede ser indiscutiblemente un consejo acertado, por lo general no se debe poner en práctica, algunas razones son comerciales y económicas.<sup>13</sup>

La filosofía que está detrás de este enfoque, es la de reconocer que el concreto no es capaz de proporcionar por mucho tiempo el medio alcalino en el cual el acero permanece inactivo y que, por lo mismo, se deben tomar medidas para reducir al mínimo la capacidad corrosiva de aquellos agentes químicos ante los cuales el acero de refuerzo es altamente vulnerable; estos son el agua y el oxígeno. También se puede recurrir al concreto reforzado con fibras; es decir; en la pasta de concreto se pueden utilizar fibras de acero, de polipropileno, de vidrio, de acrílico o de algún otro plástico.<sup>36</sup>

#### **INHIBIDORES DE LA CORROSIÓN.**

Los aditivos inhibidores de la corrosión detienen químicamente la reacción de la corrosión. El inhibidor de corrosión líquido más comúnmente empleado, el nitrito de calcio, bloquea la reacción de corrosión de los iones cloruro reforzando químicamente y estabilizando la película pasiva. El ion nitrito provoca que los óxidos de fierro se vuelvan insolubles. En efecto, se evita que los iones cloruro penetren la película pasiva y que entren en contacto con el acero. Una cierta cantidad de nitrito de calcio puede parar la corrosión hasta un cierto nivel de penetración del ion cloruro. En consecuencia, mayores niveles de penetración de cloruros requieren de mayores niveles de nitrito de calcio para detener la corrosión.<sup>10</sup>

# **CAPITULO III**

**“DESARROLLO  
EXPERIMENTAL”**

En el presente trabajo se estudió el efecto que, en la corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto, tienen los siguientes factores:

- \* El tipo de cemento.
- \* La relación agua/cemento.
- \* El efecto del ion cloruro desde el interior del mortero en el agua de amasado.
- \* El efecto del ion cloruro desde el exterior del mortero mediante la inmersión de éste en cloruros, después de un curado de 28 días.

El seguimiento del efecto de estos factores se realizó a través de la medición de potenciales de media celda y de la medida de la resistividad eléctrica por el método de Millard el cual depende de la técnica de Wenner o de los cuatro puntos.

### **3.1 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS.**

#### **3.1.1 Acero de Refuerzo.**

El acero seleccionado fue un acero al carbono denominación AISI 1020, de composición porcentual<sup>37</sup>: C = 0.18-0.23, Mn = 0.30-0.60, P = 0.04 y S = 0.05; con una dureza HRB 86. Este acero se empleó en forma de varillas corrugadas de 4 mm. de diámetro nominal y 10 cm. de altura.

Con el fin de establecer condiciones reales, utilizadas al realizar cualquier obra civil, se emplearon las varillas presentando una superficie cubierta con óxido rojo (herrumbre) provocada por la exposición al medio ambiente. El ataque atmosférico no se puede saber con precisión, ya que las superficies metálicas al adquirirse, ya presentaban herrumbre roja uniforme y adherente. Sólo se procedió a cepillarlas para quitar las escamas.

### 3.1.2 Probetas de Mortero.

Las probetas se fabricaron en moldes de PVC, con dimensiones de 8 cm. de altura y 7.2 cm. de diámetro interno.

Se utilizó una relación cemento/arena de 1/3.

La arena fue estándar (utilizada en construcciones de obras civil realizadas en nuestro país); ésta se tamizó en la malla número 18 (abertura nominal = 0.0394 in), con el fin de disminuir la porosidad y permeabilidad en el mortero.

Se emplearon los dos tipos de cemento de mayor producción y uso en nuestro país ;

- El Cemento Portland Tipo I y el Cemento Portland Puzolánico, marca Tolteca, con el análisis químico siguiente<sup>38</sup>:

COMPOSICIÓN (%)								
TIPO DE CEMENTO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
PORTLAND TIPO I	20.05	4.62	3.05	63.91	2.04	4.09	0.45	0.50
PORTLAND PUZOLANA	28.10	6.39	4.70	54.38	1.93	5.20	0.98	0.60

El contenido de puzolana en el cemento puzolánico es de 14.82 %.

La relación agua/cemento utilizada en cada mortero fue de; 0.4, 0.5 y 0.6.

Se utilizaron estas relaciones agua/cemento para analizar el comportamiento de la corrosión del concreto reforzado.

El agua se utilizó con una concentración de 0.14 % en peso de cloruros (dato recomendado por ACI 318 para un concreto reforzado expuesto a cloruros) con respecto a cada volumen de agua ocupado para cada relación agua/cemento, utilizando NaCl, con el fin de observar el efecto sobre la varilla de refuerzo metálico, tanto al agregarse como aditivo para el aceleramiento del fraguado como al

simular una situación que se presenta cuando se utiliza agua contaminada con cloruros provenientes de un medio marítimo.

El mezclado se realizó de acuerdo a la norma ASTM C-305.

La mezcla se vació a los moldes en dos etapas, la primera hasta la mitad de su capacidad seguida de un apisonamiento manual y en la segunda etapa se llenó completamente el molde volviéndose a compactar la mezcla. Se elaboraron morteros conteniendo acero de refuerzo y sin éste.

Las varillas o acero de refuerzo (electrodos de trabajo) fueron colocadas en juegos de dos, bajo presión manual. La varilla 1 al centro y la varilla 2 a 2.5 cm. de distancia de la varilla 1, lo cual servirá para observar el efecto que tiene el mortero como recubrimiento y protección de la varilla. El área expuesta fue de  $8 \text{ cm}^2$  (Ver Fig. 3.1)

El molde se vibró extemamente para evitar la formación de cavidades de aire, produciendo en lo posible la homogeneidad del material y asegurar el contacto íntimo del acero con el mortero.

Las probetas se desmoldaron 24 hrs. después de haber sido coladas, posteriormente fueron inmersas en agua destilada(en recipientes de plástico con capacidad para dos probetas), a temperatura ambiente, durante un periodo de 28 días, el cual corresponde al tiempo de curado, permitiendo así la completa hidratación del cemento.

Con el fin de observar el efecto del ion cloruro desde el exterior del mortero se procedió a la inmersión de éste en la solución de NaCl (concentración 3 % en peso de cloruros, simulando agua de mar). Esto se llevó a cabo a partir del día número 29, por un periodo de 8 días más.

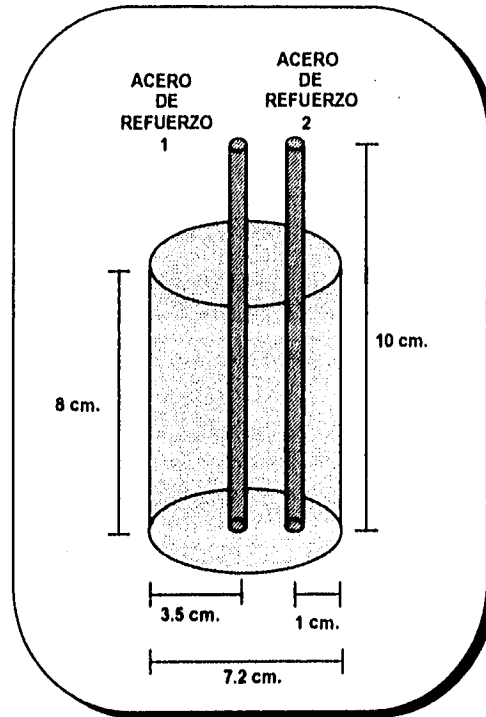


Fig. 3.1

Representación gráfica del mortero.

### 3.2 MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS UTILIZADOS.

#### 3.2.1 Medición del potencial de media celda.

En el sistema acero/concreto, el método para la determinación de los potenciales de media celda estuvo basado en la norma ASTM C-876 [APENDICE A], con el propósito de determinar la actividad de corrosión del acero. Ver figura A.1

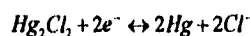
Se utilizó un multímetro de alta impedancia, marca SOAR modelo 3400 para registrar las medidas de potencial; un electrodo de calomelanos saturado



( $Hg/Hg_2Cl_2, Cl^-$ ), y dos conexiones punta-caimán, para unir eléctricamente el circuito formado por el electrodo de trabajo (varilla) y el electrodo de referencia.

El electrodo está formado por mercurio cubierto por una capa de cloruro insoluble (calomelanos),  $Hg_2Cl_2$ , en equilibrio con una disolución de cloruro de potasio,  $KCl$ , que puede ser 0.1 N, 1 N o saturada. El contacto eléctrico con el mercurio se realiza por medio de un hilo de platino.

La reacción del electrodo de calomelanos es :



así pues ; si el electrodo actúa como ánodo (-), la reacción se desplaza hacia la izquierda y se produce una reacción de oxidación ; si el electrodo actúa como cátodo (+), la reacción se desplaza hacia la derecha y se produce una reacción de reducción. Por tanto ; en la presente tesis el electrodo de calomel actúa como cátodo y el acero de refuerzo (electrodo de trabajo) como ánodo. Con la solución saturada de  $KCl$ , se tiene  $E = 0.244$  v. vs.  $ENH$ .

Con la finalidad de observar el efecto que produce la diferencia de aeración sobre el acero de refuerzo , se hicieron mediciones de potencial de media celda a lo largo del mortero. Ver gráfica 3.2.

Las mediciones se hicieron a lo largo del periodo de curado e inmersión en  $NaCl$  (3 % en peso de  $Cl^-$ ) de los morteros.

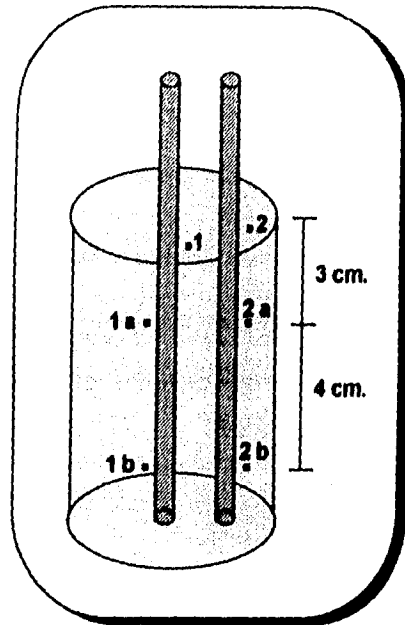


Figura 3.2

*Puntos donde se realizó el monitoreo del potencial de media celda.*

### 3.2.2 Medición de la Resistividad.

A partir del día 29 (inmersión de los morteros en 3 % en peso de cloruros), en los morteros que no contenían acero de refuerzo y durante 8 días, se procedió, mediante el empleo del método Millard et. al. [APÉNDICE B] (basado en el método de Wenner o de los cuatro electrodos), a medir la resistencia que presenta el mortero, con el propósito de determinar la actividad de corrosión que puede producir éste como medio de recubrimiento y protección para el acero de refuerzo.

Las incisiones se hicieron con un espaciado de 1 cm., y del lado opuesto a éstas, se realizaron otras incisiones con un espaciado de 2 cm.; esto se hizo con el fin de observar el efecto que tenía el espaciamiento en la medida de resistividad.

Los dos electrodos del centro se conectaron con caimanes a los bornes de potencial del aparato; los electrodos de los extremos se conectaron a los bornes de corriente del aparato. Ver Fig. 3.3

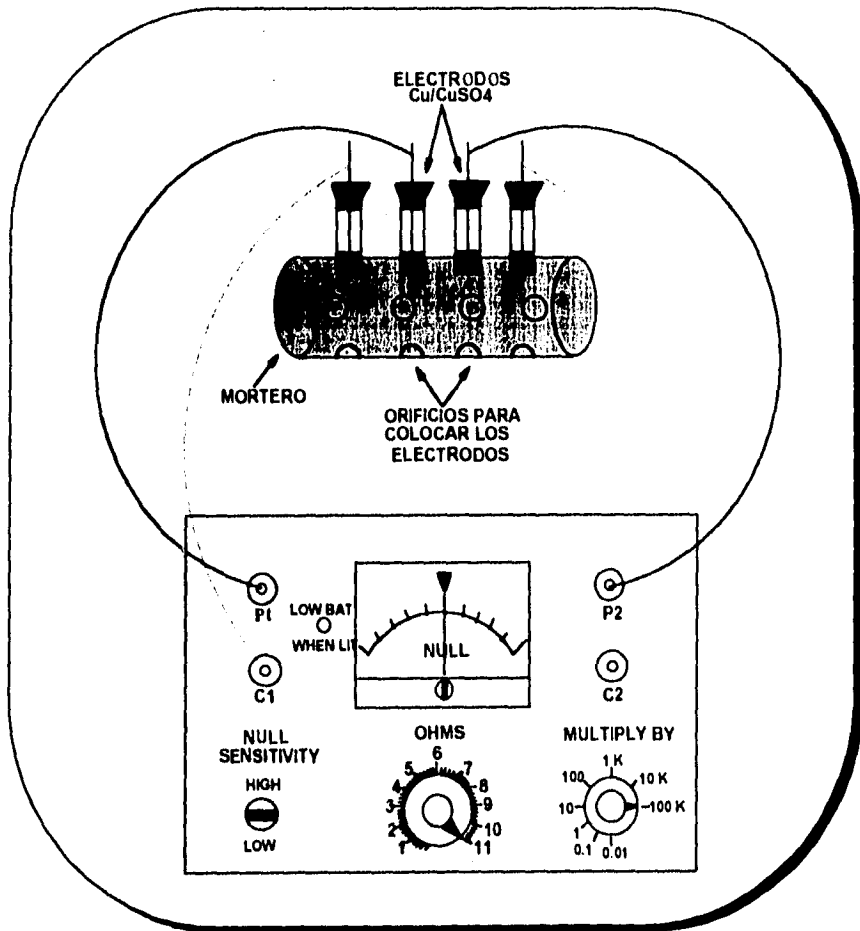


Figura 3.3

Esquema del montaje para la medida de resistividad.

# **CAPITULO IV**

## **“RESULTADOS EXPERIMENTALES”**

#### 4.1 MEDICIÓN DEL POTENCIAL DE MEDIA CELDA.

1.- *Estructura Analizada:* Morteros de Cemento Portland Tipo I y Portland Puzolana con relaciones agua/cemento de 0.4, 0.5 y 0.6 respectivamente, y una concentración de 0.14 % en peso de cloruros (como NaCl) en el agua de amasado.(ver Capítulo III)

2.- *Tipo de media celda de referencia usada:* La media celda usada fue una de Calomelanos Saturado (ECS).

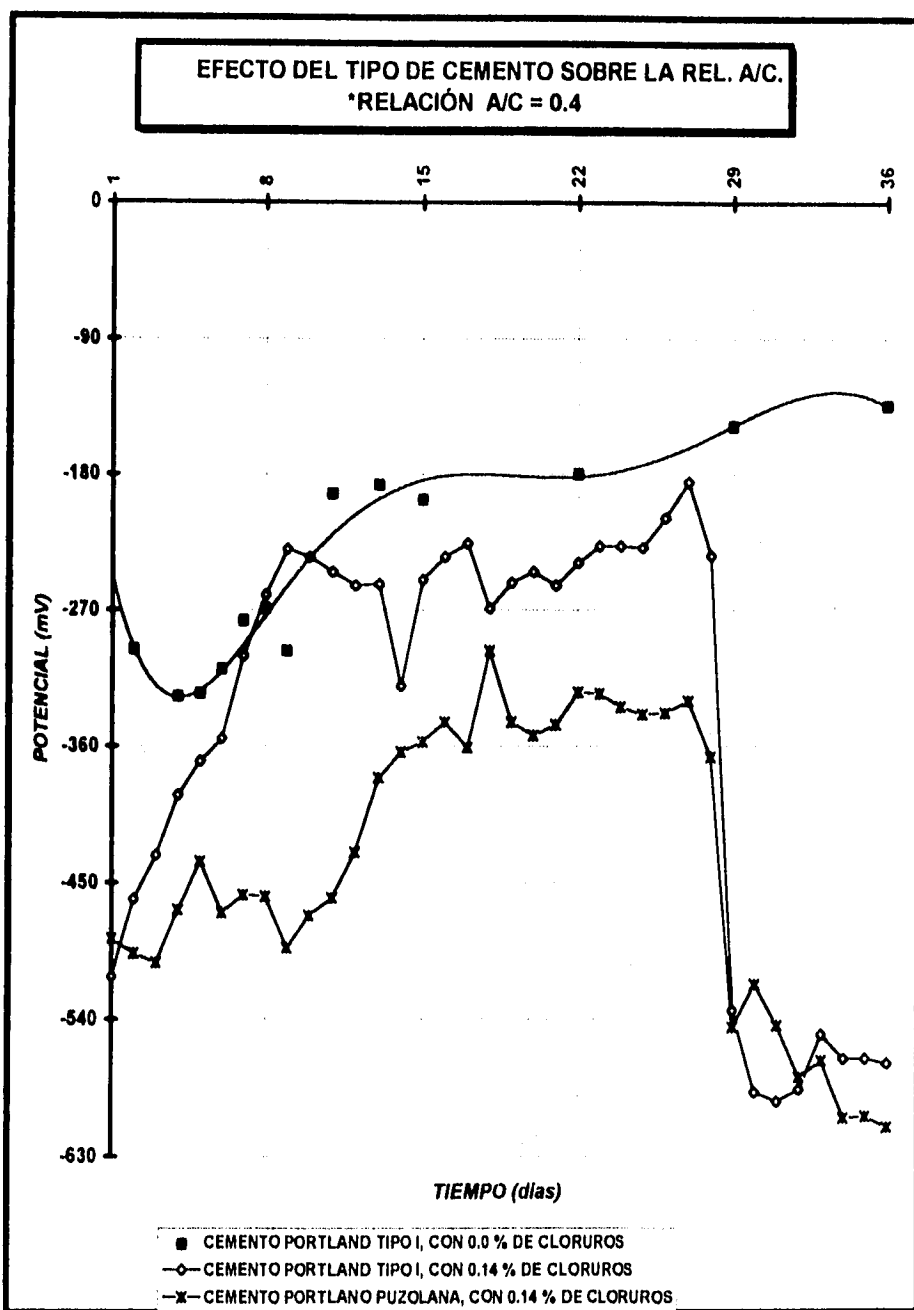
3.- *Temperatura Promedio:* 20 °C.

4.- *Método de humidificación de la estructura analizada y tipo de unión del Voltmetro al acero de refuerzo:* Las mediciones se hicieron durante el tiempo de curado del mortero, por tanto no fue necesario emplear algún método de humidificación.

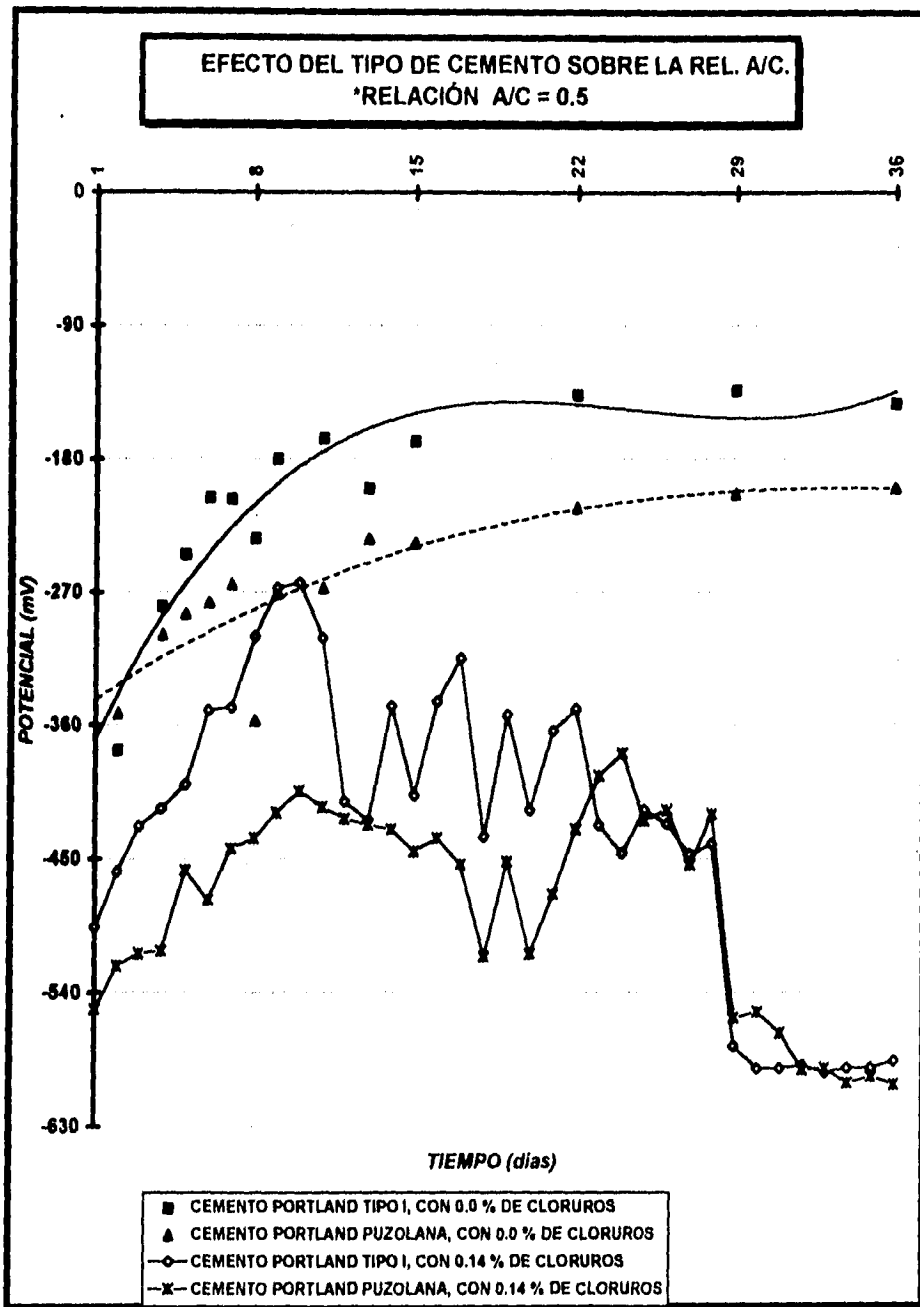
Con respecto al tipo de unión entre el voltmetro y el mortero (ver Capítulo III)

◇ En las siguientes páginas se presentan gráficas de los resultados obtenidos durante la prueba.

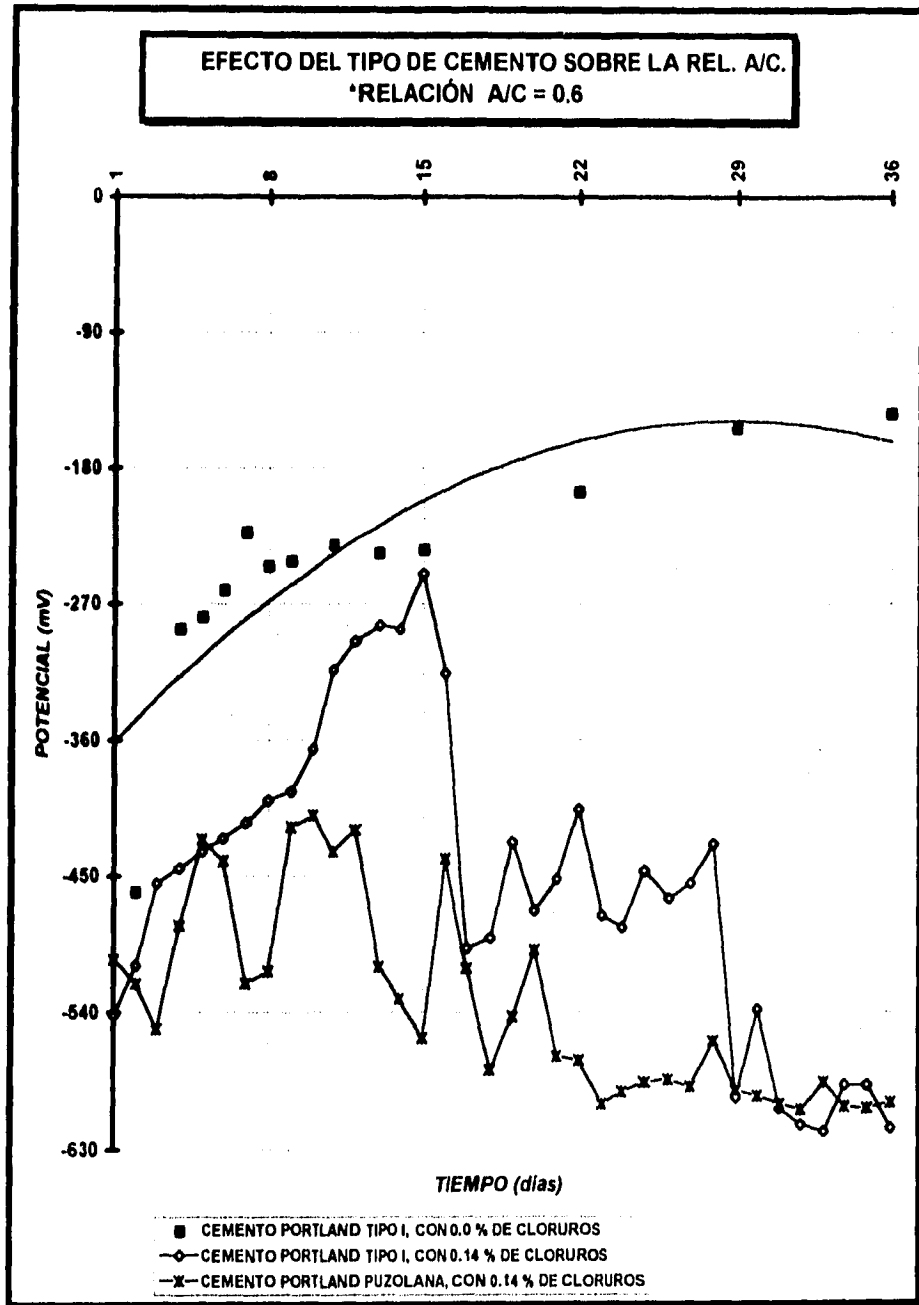
NOTA : Los datos para Cemento Portland Tipo I y Portland Puzolana, ambos con 0.0 % de Cloruros (como NaCl) en el agua de amasado se obtuvieron de la tesis de López y Miranda.<sup>38</sup>



Gráfica 4.1 Potenciales de Media Celda, medidos vs. ECS.

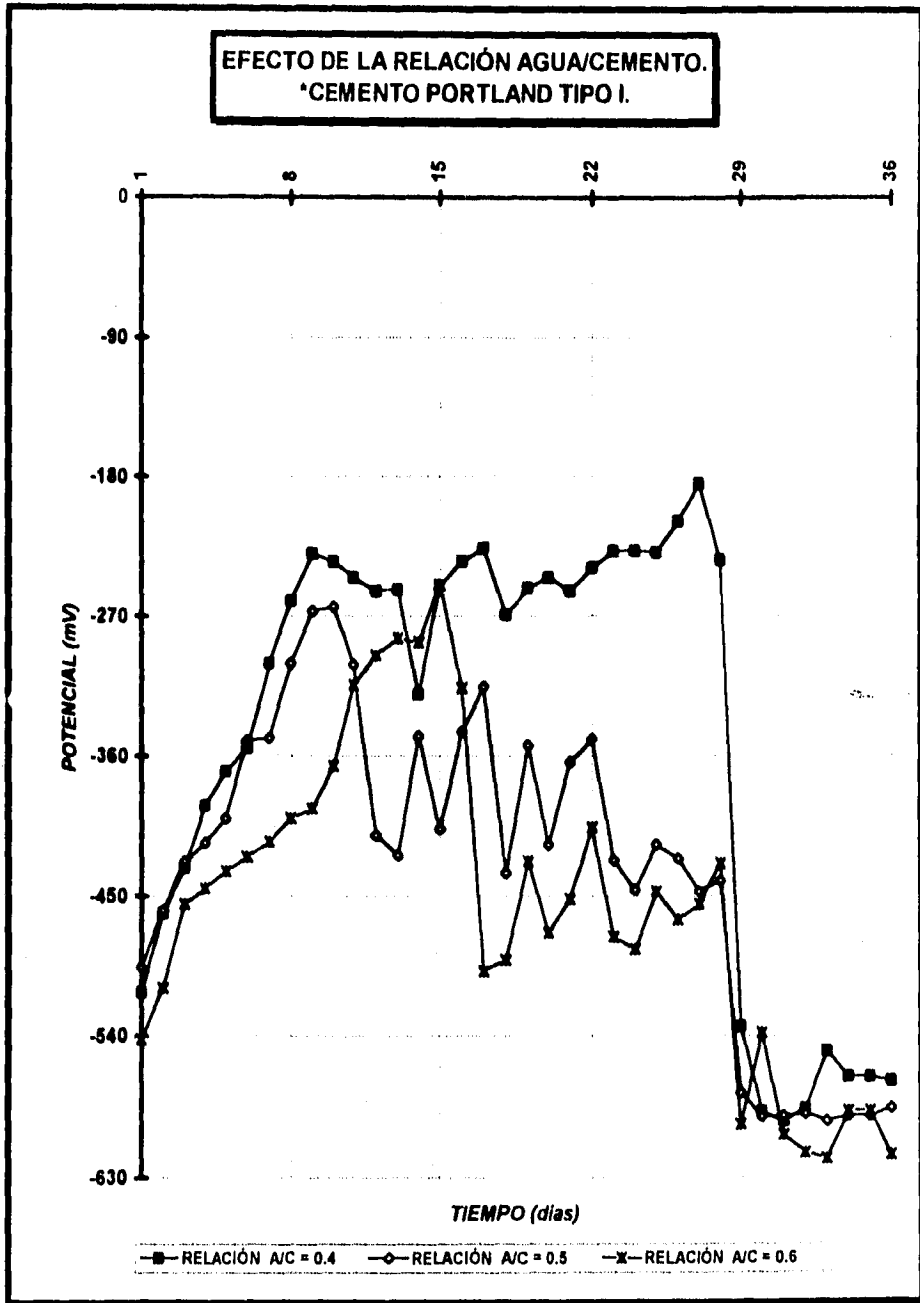


Gráfica 4.2 Potenciales de Media Celda , medidos vs. ECS.

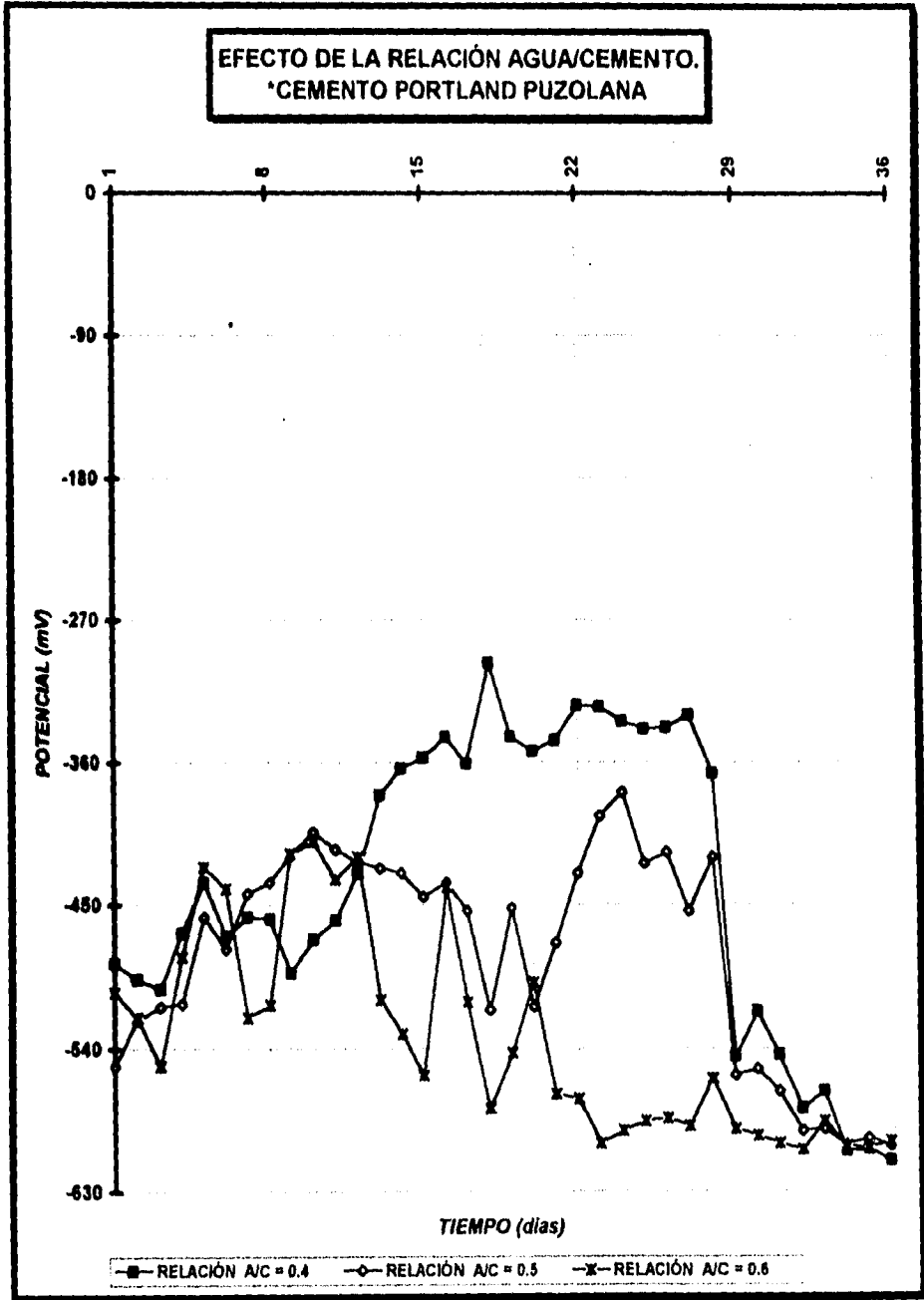


Gráfica 4.3 Potenciales de Media Celda, medido vs. ECS.

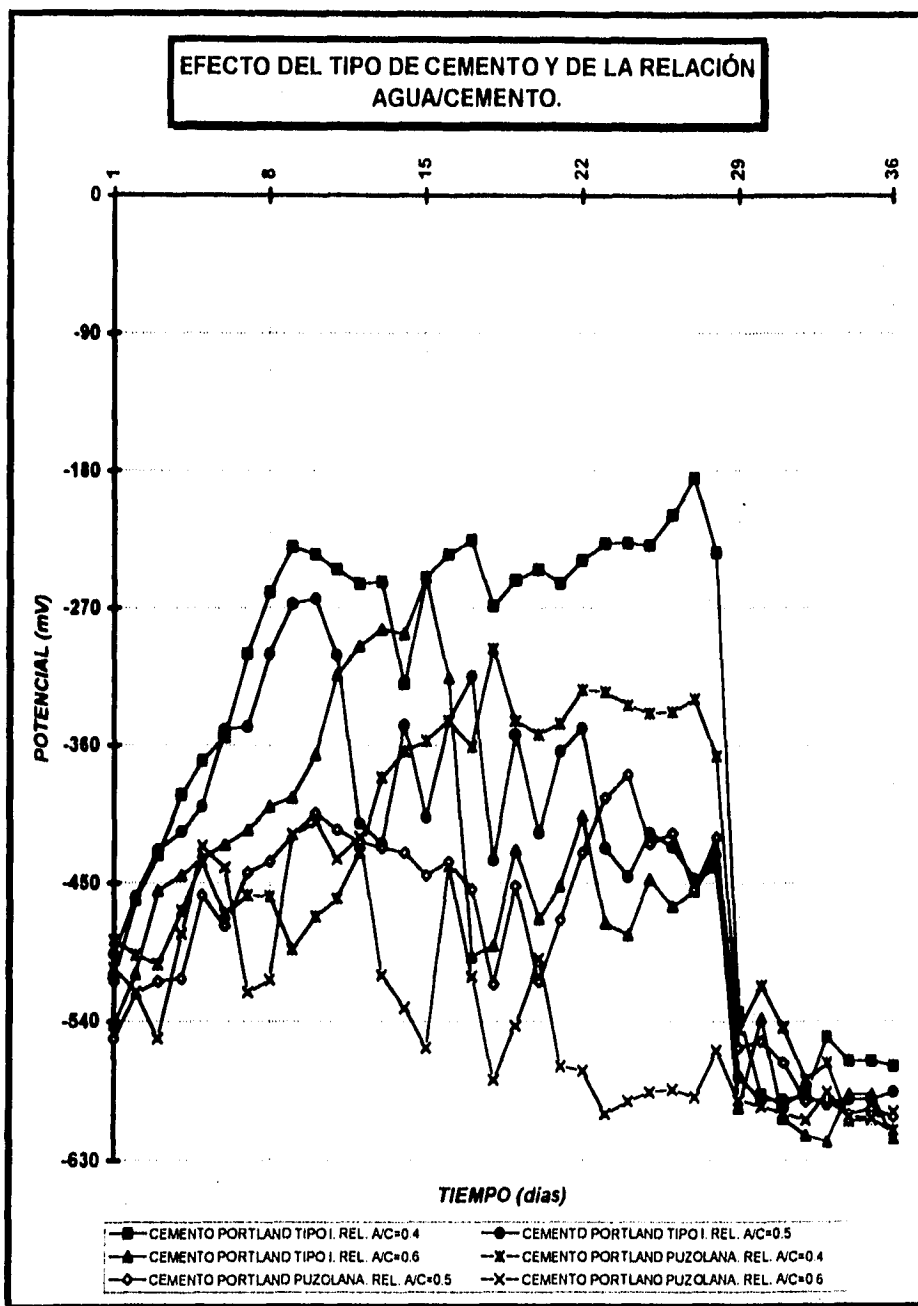




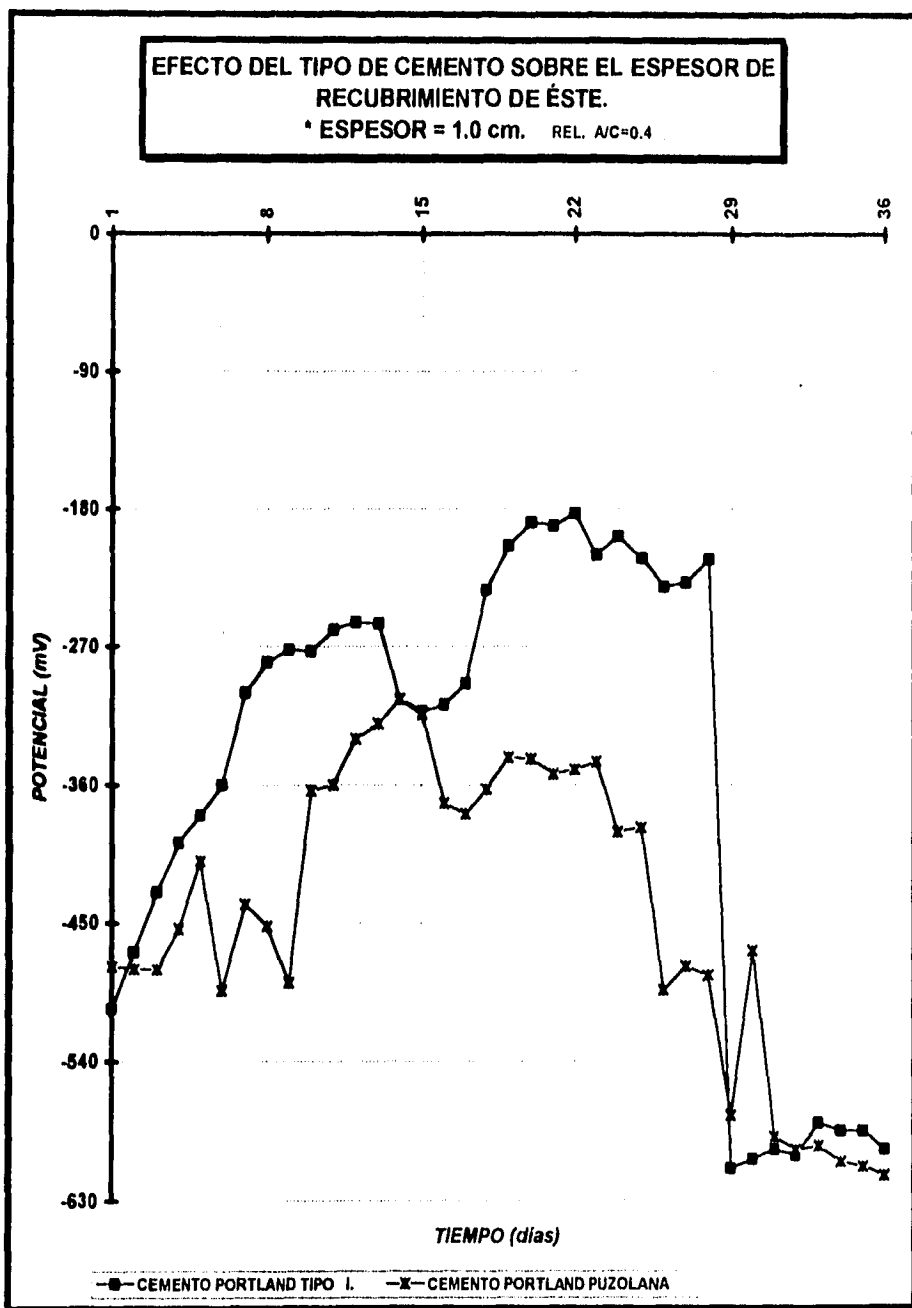
Gráfica 4.4 Potenciales de Media Celda, medidos vs. ECS.



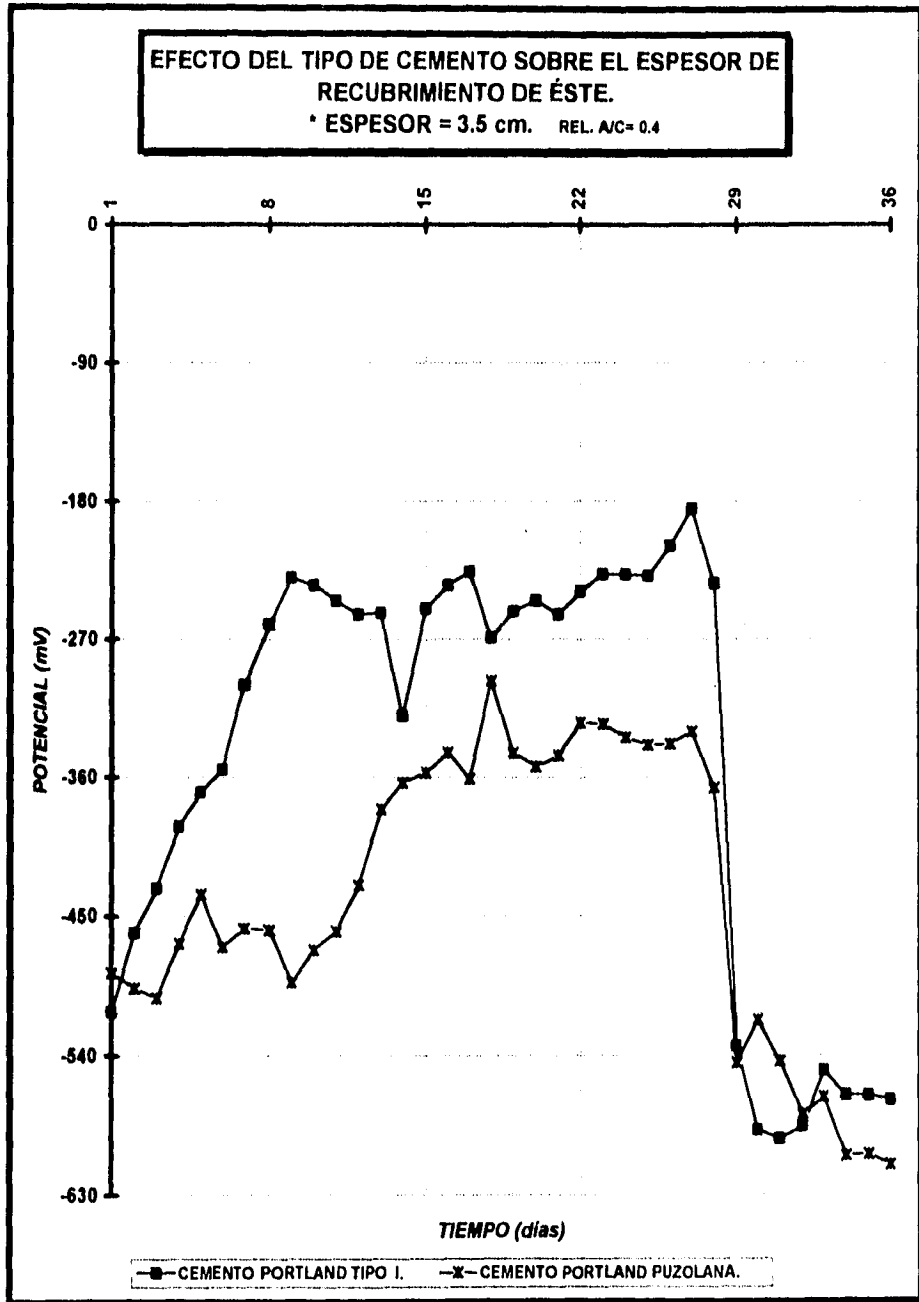
Gráfica 4.5 Potenciales de Media Celda, medidos vs. ECS.



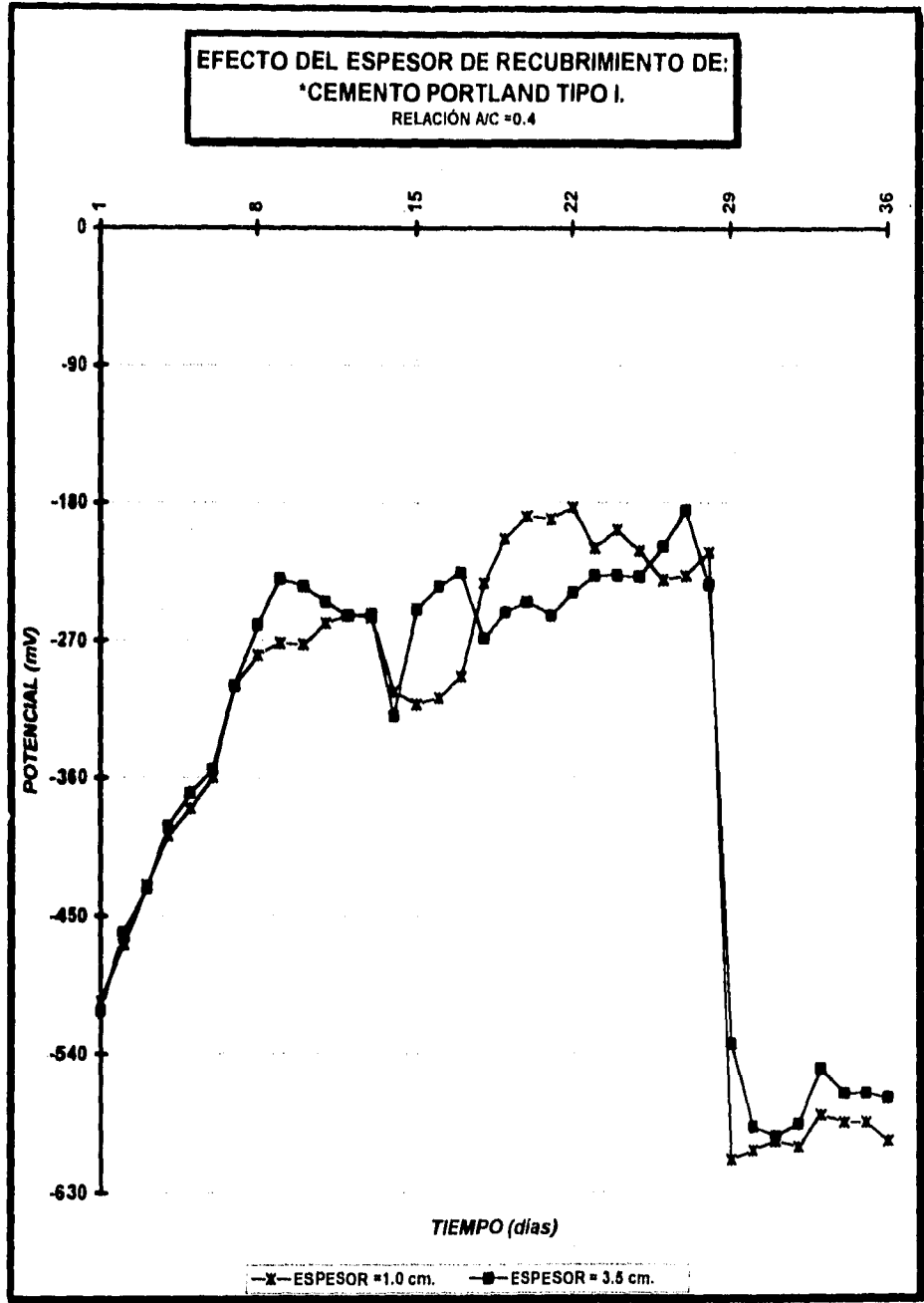
Gráfica 4.6 Potenciales de Media Celda, medidos vs. ECS.



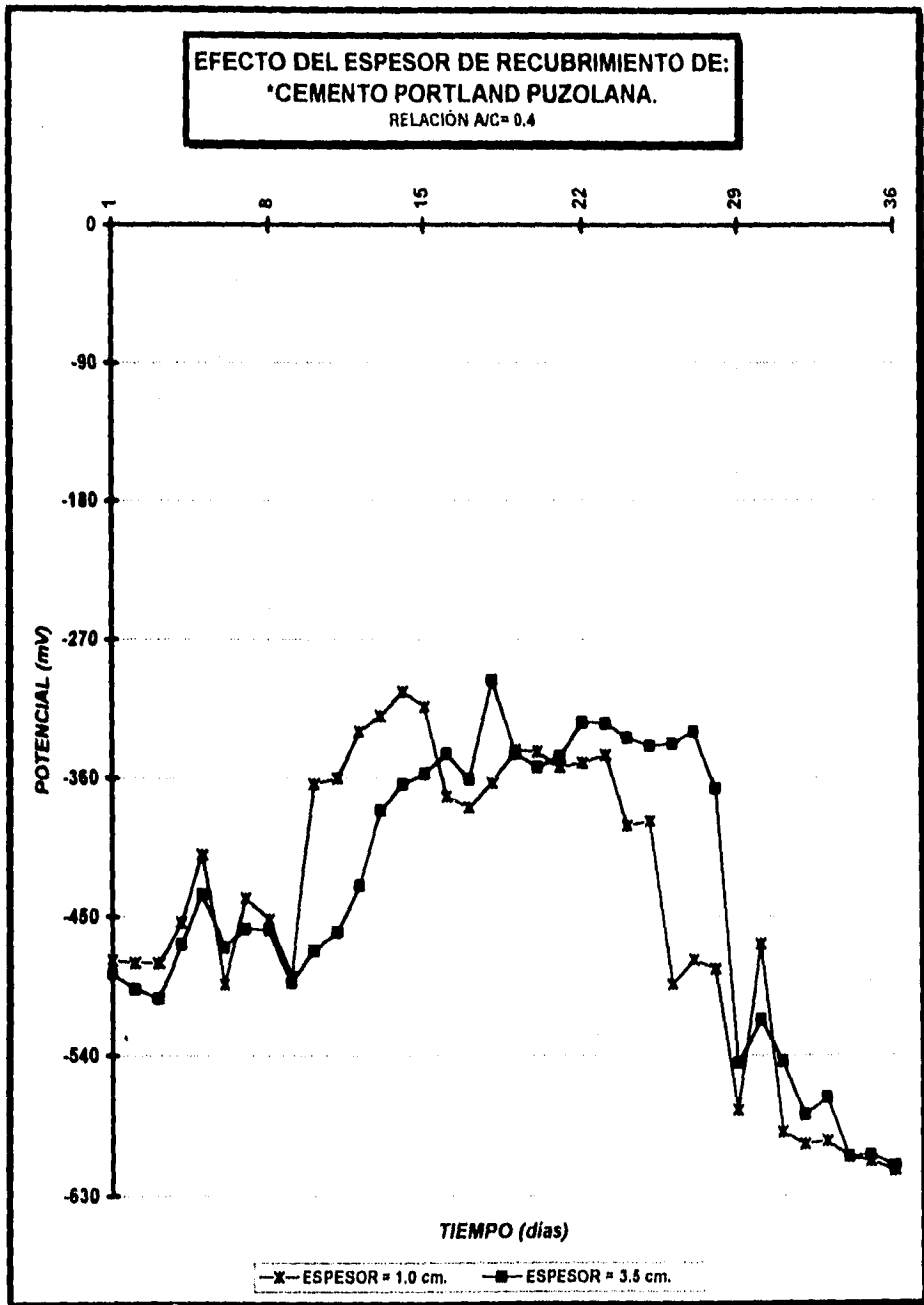
Gráfica 4.7 Potenciales de Media Celda, medidos vs. ECS.



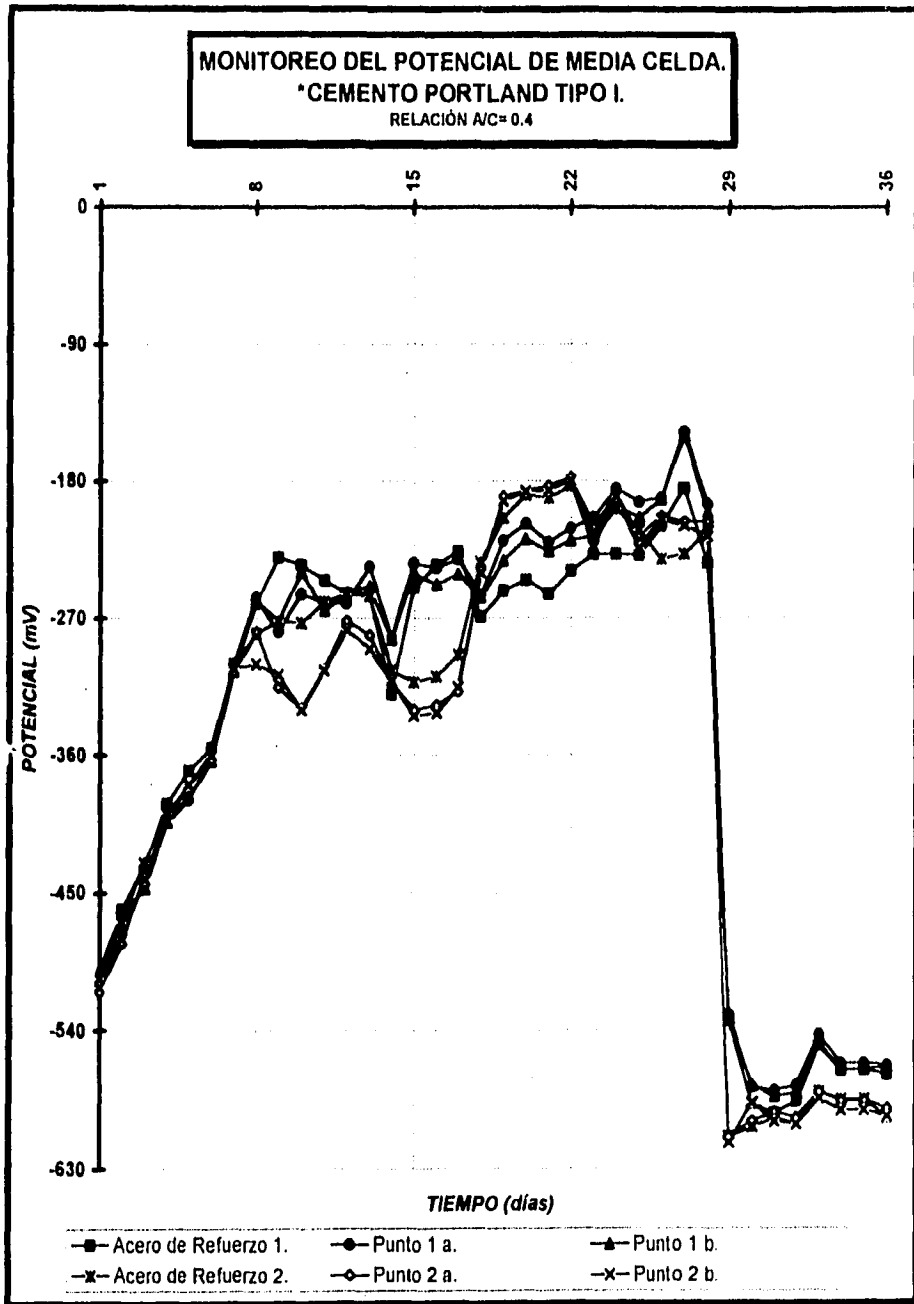
Gráfica 4.8 Potenciales de Media Celda, medicos vs. ESC.



Gráfica 4.9 Potenciales de Media Cella, medidos vs. ECS.

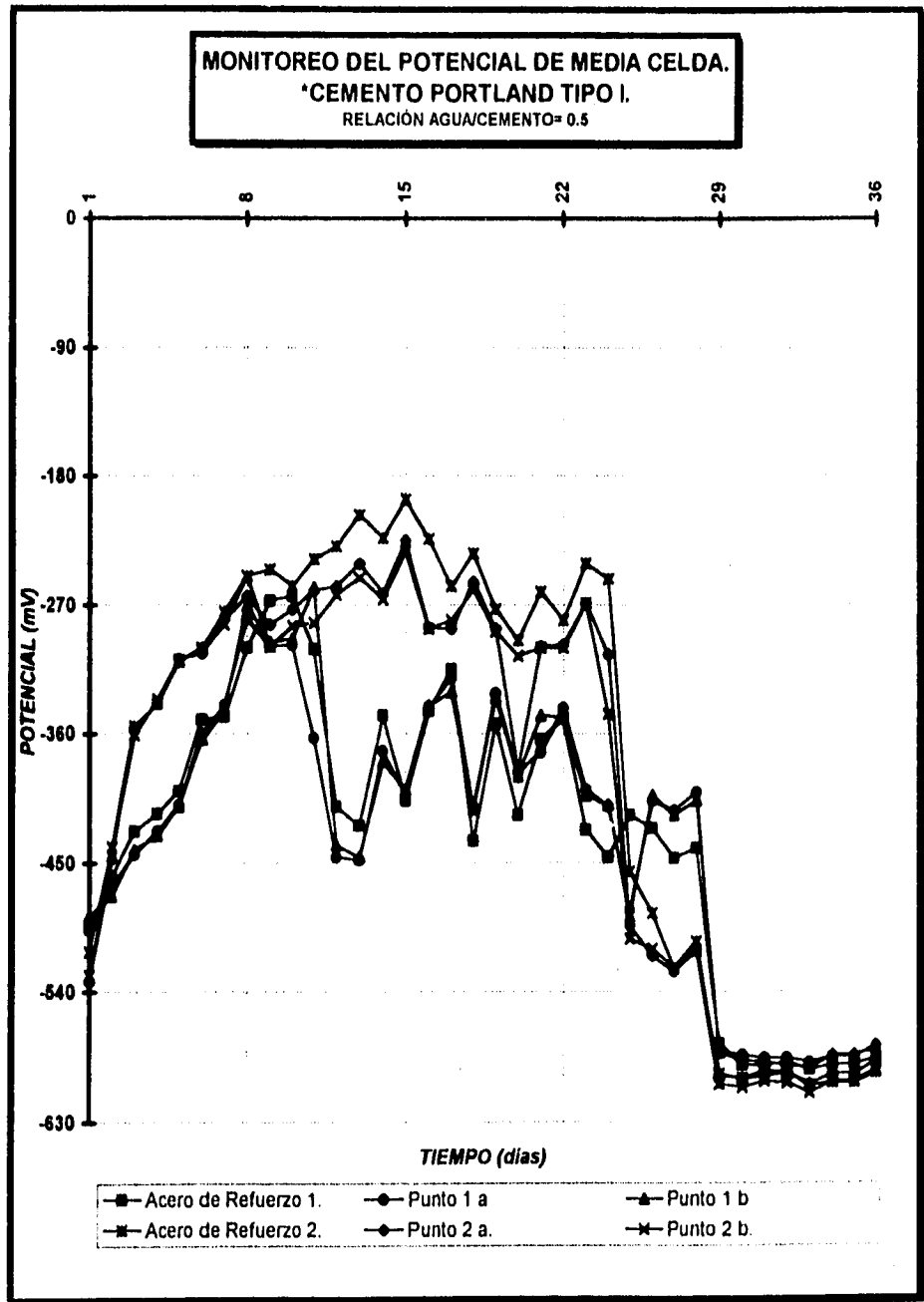


Gráfica 4.10 Potenciales de Media Celda, medido vs. ECS.

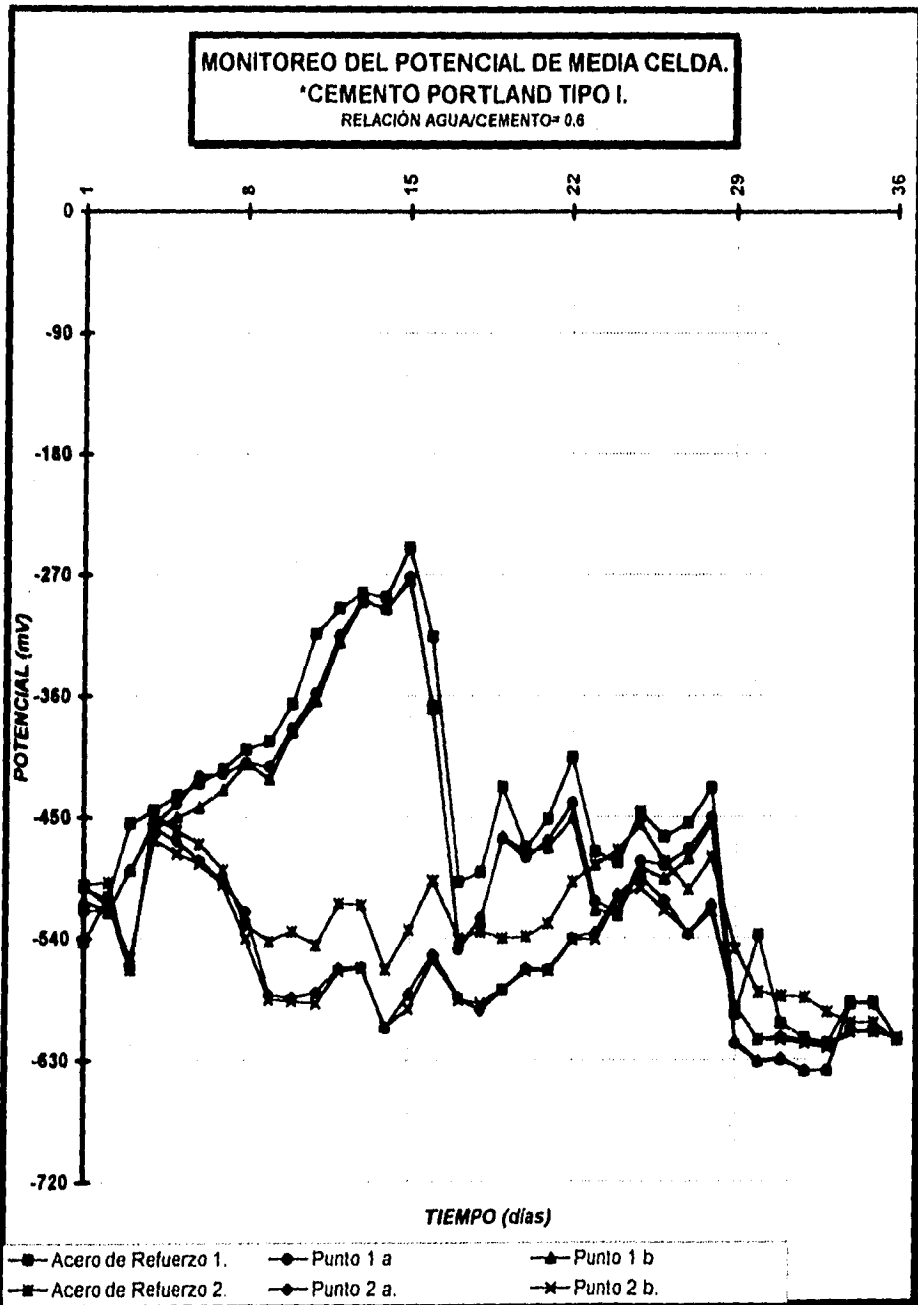


Gráfica 4.11 Potenciales de Media Celda, medidos vs. ECS. Observando el efecto de la diferencia de aeración.

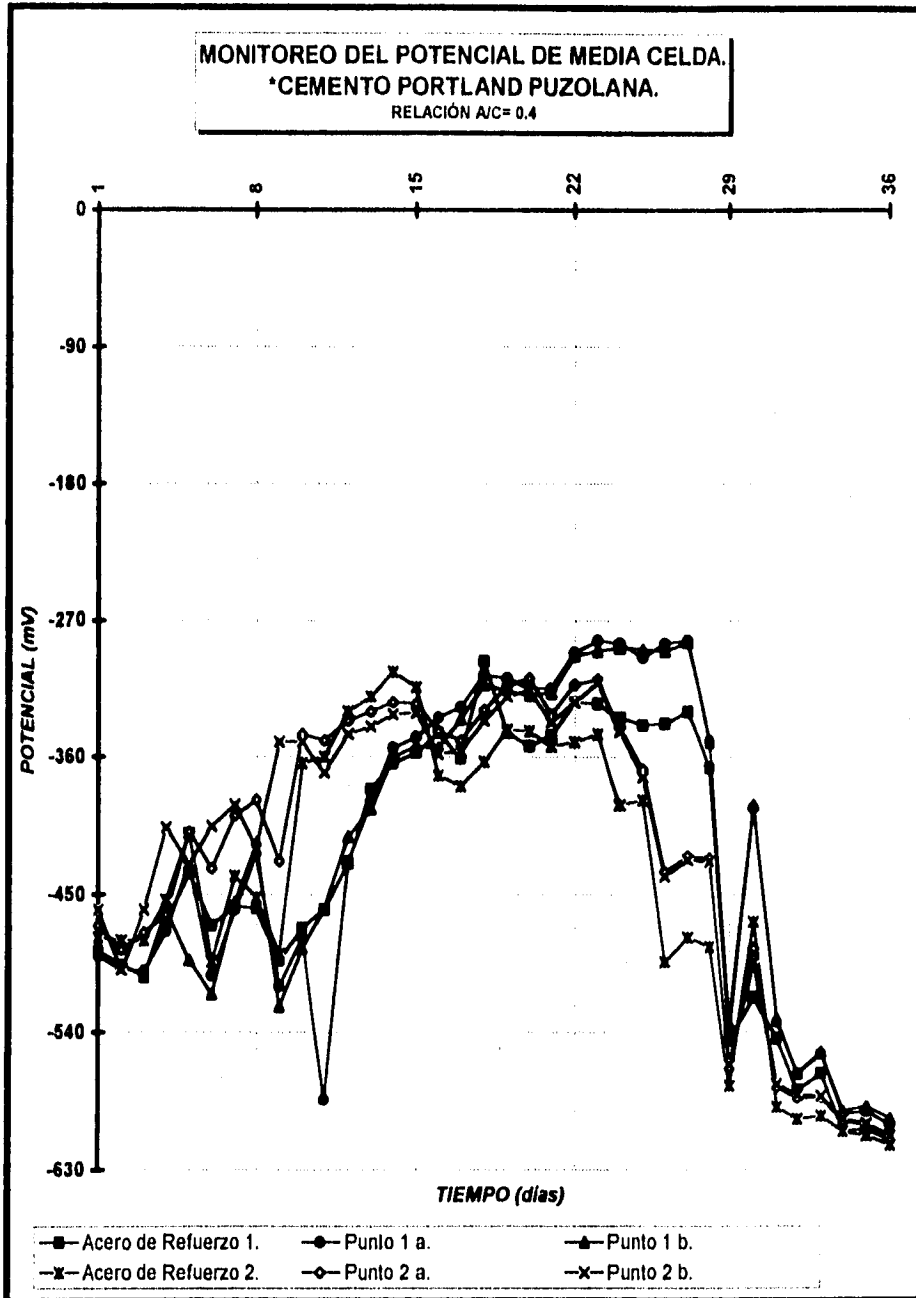




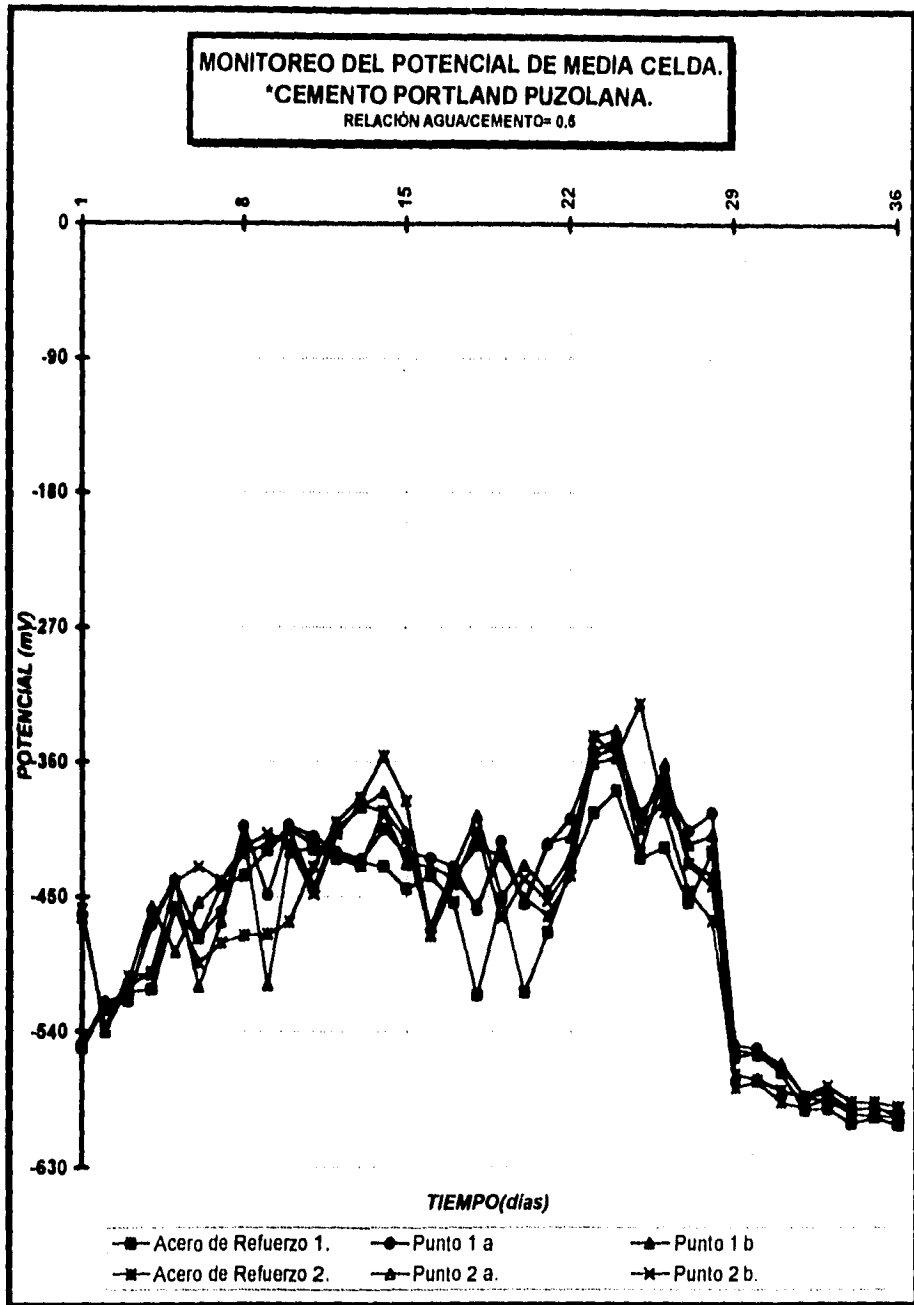
Gráfica 4.12 Potenciales de Media Celda, medidos vs. ECS. Observando el efecto de la diferencia de aeración.



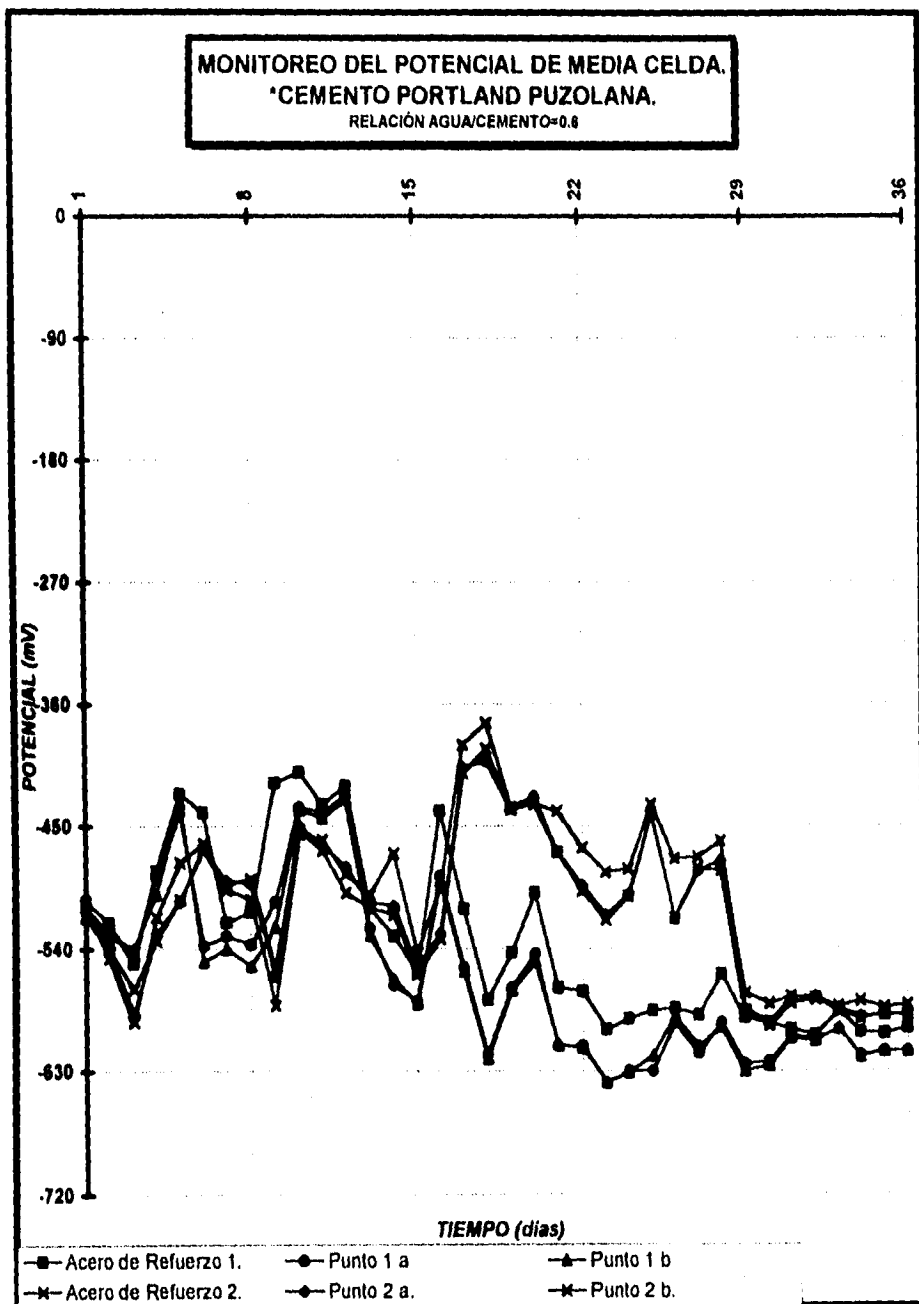
Gráfica 4.13 Potenciales de Media Celda, medidos vs. ECS. Observando el efecto de la diferencia de aernación.



Gráfica 4.14 Potenciales de Media Celda, medidos vs. ECS. Observando el efecto de la diferencia de aeración.



Gráfica 4.15 Potenciales de Media Celda, medidos vs. ECS. Observando el efecto de la diferencia de aeración.



Gráfica 4.16 Potenciales de Media Celda, medidos vs. ECS. Observando el efecto de la diferencia de aeración.

## **4.2 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.**

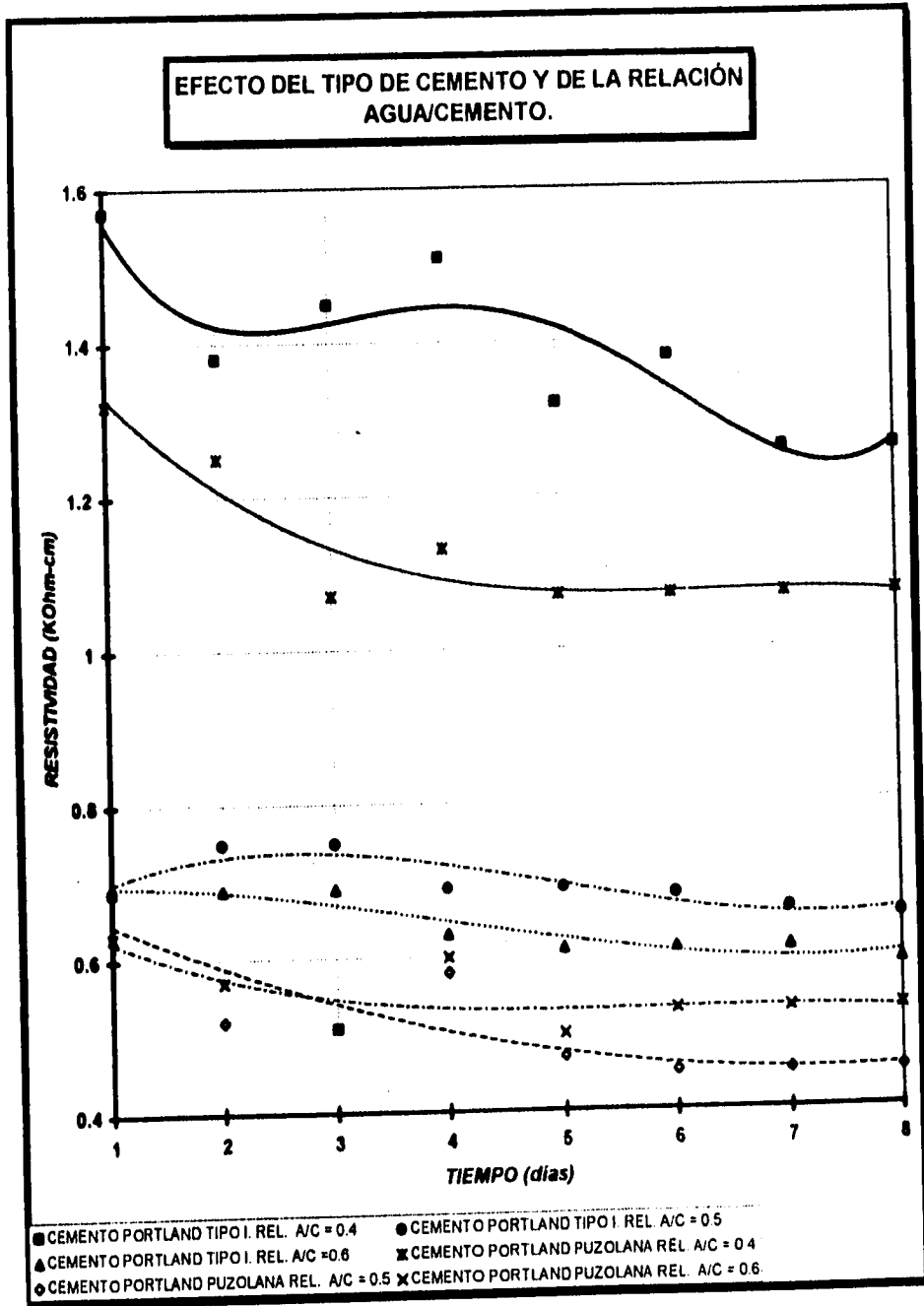
**1.- Estructura Analizada:** Morteros de Cemento Portland Tipo I y Portland Puzolana con relaciones agua/cemento de 0.4, 0.5 y 0.6 respectivamente, y una concentración de 0.14 % en peso de cloruros (como NaCl) en el agua de amasado.(ver Desarrollo Experimental)

**2.- Tipo de electrodos usados:** Los electrodos usados fueron cuatro de cobre/sulfato de cobre (ESC).

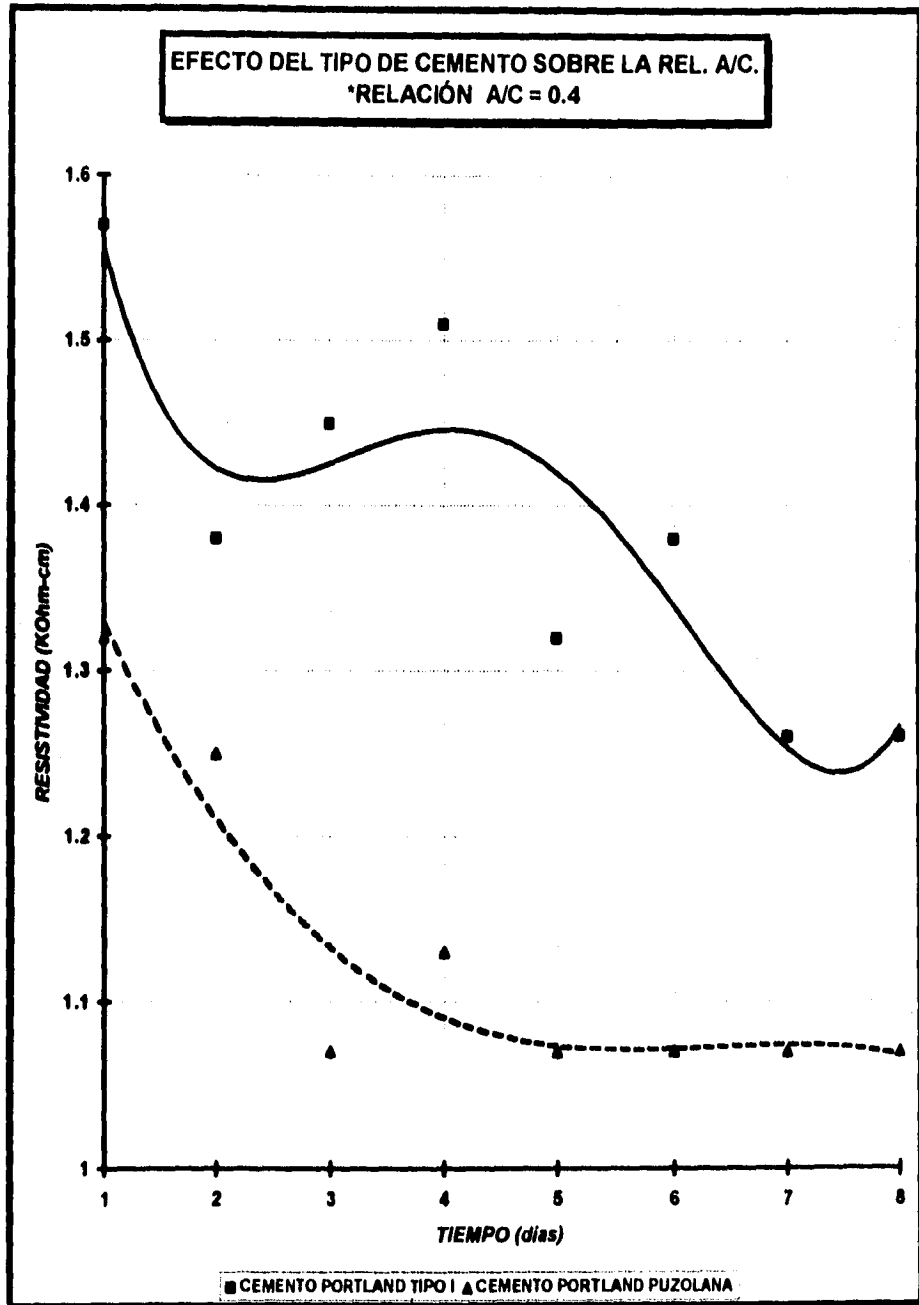
**3.- Temperatura Promedio:** 20 °C.

**4.- Tipo de aparato empleado en la determinación de la resistencia eléctrica del concreto:** Soil Resistance Meter, Model 400, Nilsson Electrical Laboratory Inc.

◇ En las siguientes páginas se presentan gráficas de los resultados obtenidos durante la prueba.

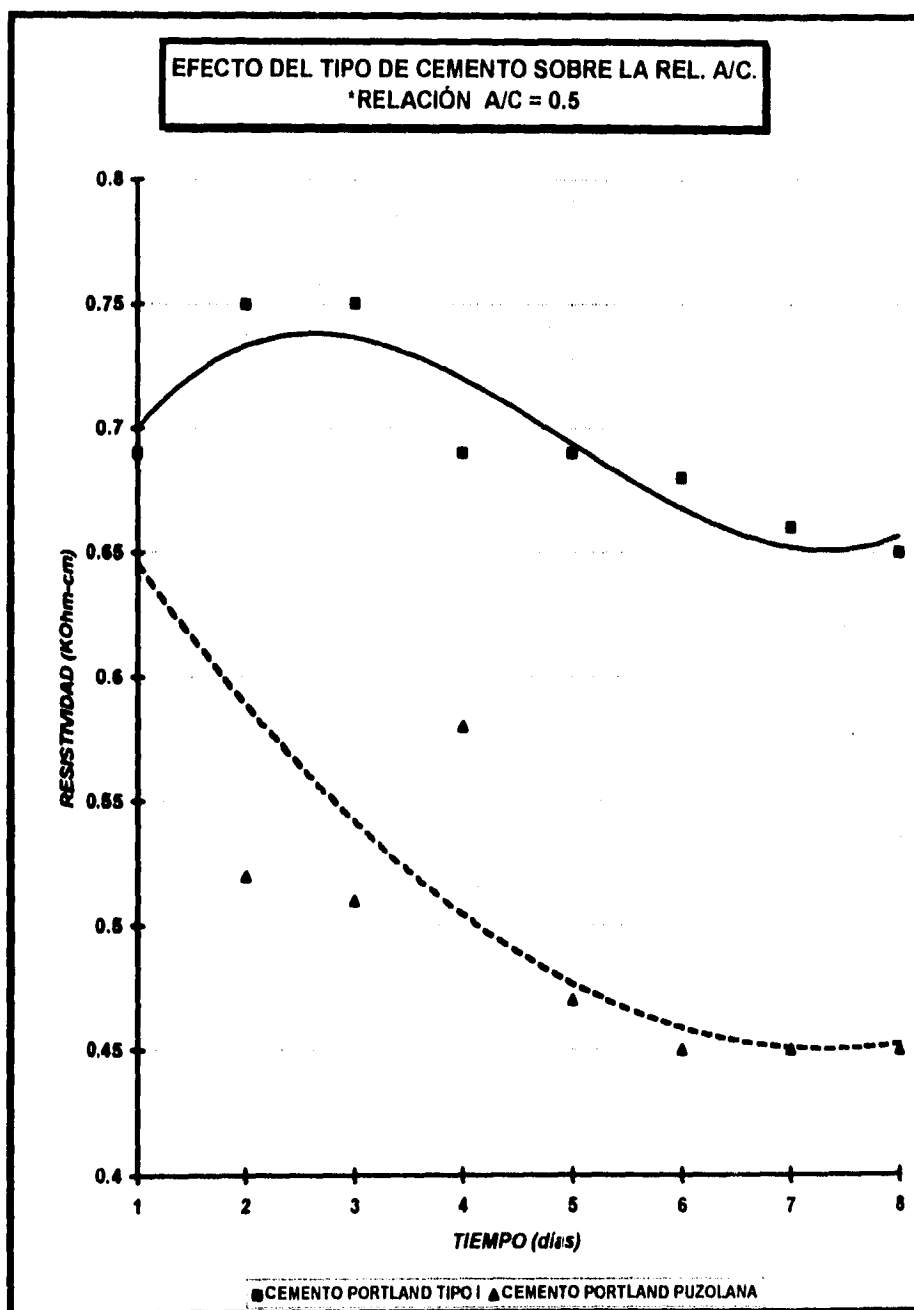


Gráfica 4.17 Resistividad Eléctrica del Mortero, medida por el Método de Millard.  
 \*Espaciamiento entre electrodos = 1 cm.

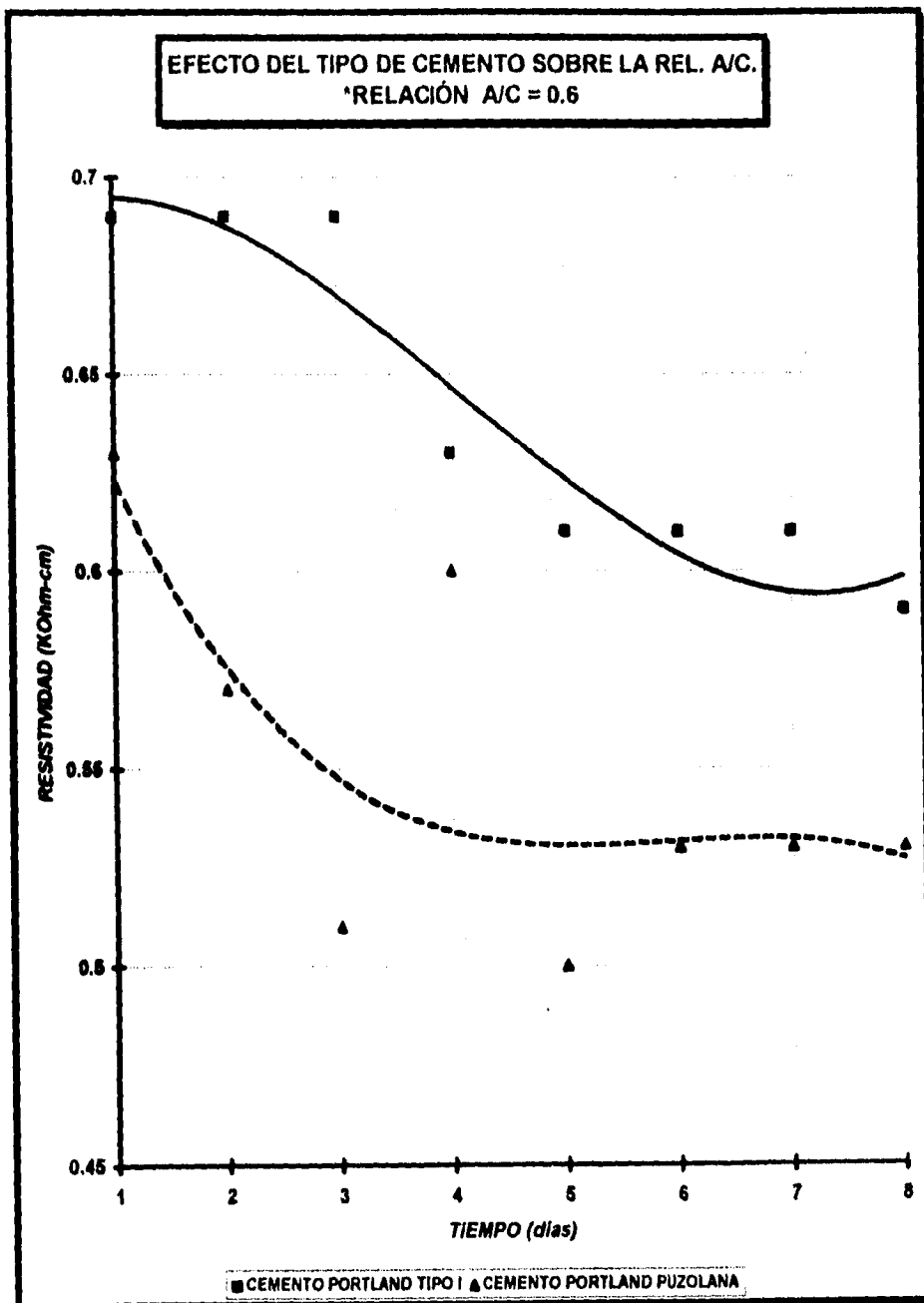


Gráfica 4.18 Resistividad Eléctrica del Mortero, medida por el Método de Millard.  
Espaciamiento entre electrodos = 1 cm.

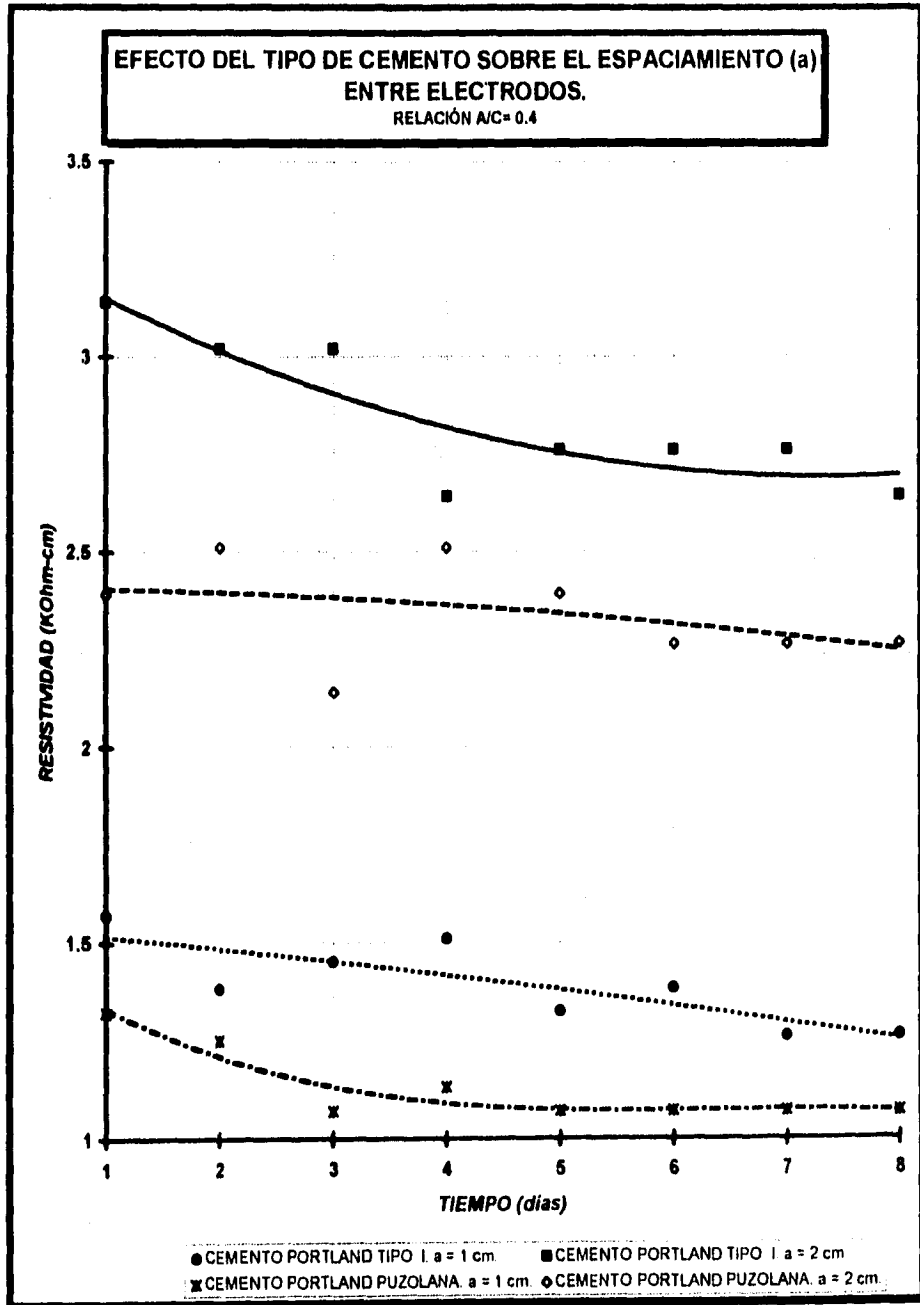




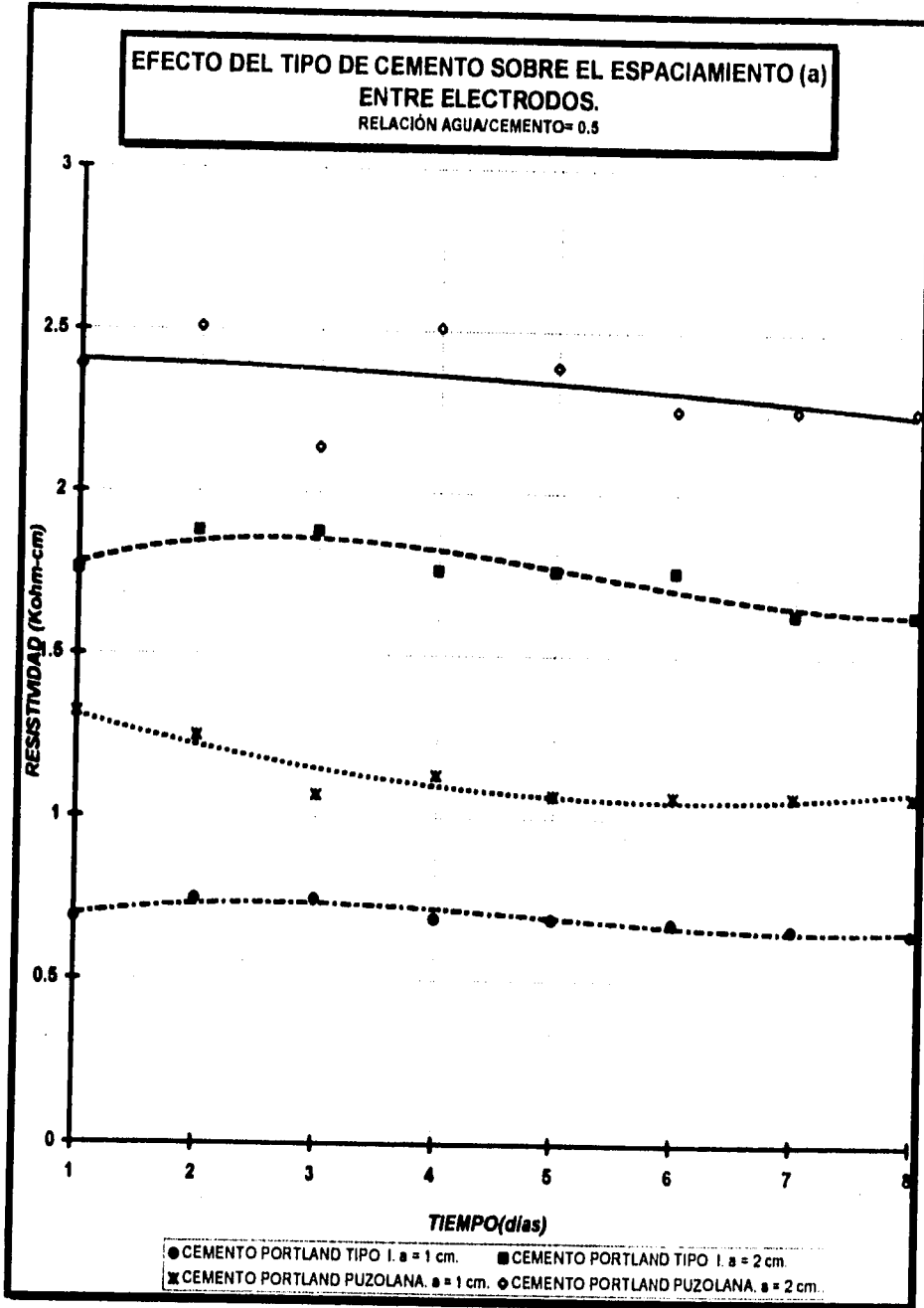
Gráfica 4.19 Resistividad Eléctrica del Mortero, medida por el Método de Millard.  
Espaciamiento entre electrodos = 1 cm.



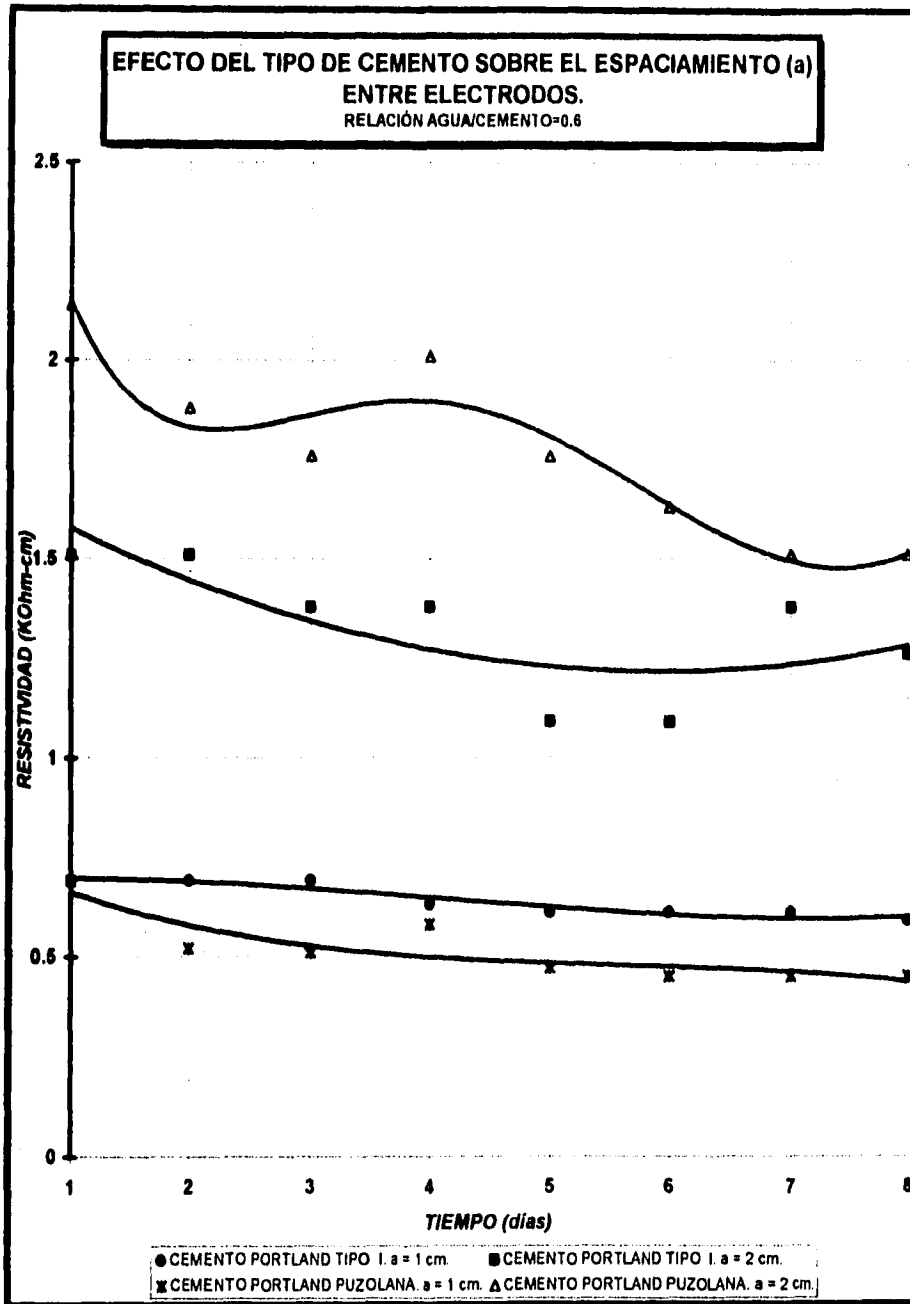
Gráfica 4.20 Resistividad Eléctrica del Mortero, medida por el Método de Millurd.  
Espaciamiento entre electrodos = 1 cm.



Gráfica 4.21 Resistividad Eléctrica del Mortero, medida por el Método de Millurd.



Gráfica 4.22 Resistividad Eléctrica del Mortero, medida por el Método de Millard.



Gráfica 4.23 Resistividad Eléctrica del Mortero, medida por el Método de Millard.

# **CAPITULO V**

## **“ANALISIS DE RESULTADOS”**

## 5.1 MEDICIÓN DEL POTENCIAL DE MEDIA CELDA.

Basándose en la norma ASTM C-876 [APENDICE A].

<b>REFERIDO AL ELECTRODO <math>Hg/H_2Cl_2/Cl^-</math> (ECS)</b>	
<b>Potencial (mV)</b>	<b>Probabilidad de corrosión en el acero de refuerzo embebido en concreto (%).</b>
Menos negativo que -120	5
[-120 a -270]	50
Más negativo que -270	95

### 5.1.1 Efecto del tipo de cemento.

Los resultados mostrados en las gráficas 4.1, 4.2 y 4.3 de donde se puede observar que durante los 28 días (tiempo de curado) la probabilidad de corrosión del acero embebido en el mortero (con 0.14% en peso de cloruros en el agua de amasado) es del 95% al utilizar el cemento Portland Puzolana igual que al usar el cemento Portland Tipo I. No obstante, se observa que el cemento Portland Puzolana se encuentra en una zona de más alta probabilidad de corrosión que el cemento Portland Tipo I. Sin embargo, al sumergir los morteros en la solución del 3% en peso de cloruros (a partir del día 29 hasta el día 36), la probabilidad de corrosión se iguala tanto para uno como para otro tipo de cemento, siendo ésta mayor del 95%.

En estas gráficas también se observa que para los dos tipos de cemento (con contenido de 0.14% en peso de cloruros), la tendencia del potencial de corrosión es hacerse menos negativo (más noble) en los primeros 28 días que dura el curado (partiendo de un valor inicial aproximado de -470 mV. a -510 mV. para ambos cementos), para luego tender a estabilizarse (llegando a valores de aproximadamente -230 mV. para el cemento Portland Tipo I y -330 mV. para el cemento Portland Puzolana; pero al sumergirse en solución del 3% en peso de cloruros, el potencial de media celda tiende bruscamente a ser más negativo (menos noble), siendo este valor hasta de -300 mV. más negativo, como se ve en la gráfica 4.6 para el cemento Portland Tipo I y relación agua/cemento = 0.4. Este comportamiento es adjudicado a que en los primeros días del colado, el acero se corroe rápidamente por la presencia del agua de amasado conteniendo cloruros (0.14% en peso de cloruros, como NaCl) y la baja resistencia presentada por el concreto, provocando la ruptura inmediata de la capa pasiva del acero o no permitiendo que se forme ésta y por ende al sumergirse en la solución salina se torna más agresivo el medio resultando potenciales mucho más negativos, oscilando éstos alrededor de -500 mV. y -610 mV.

Por otra parte, el incremento de potenciales negativos con el tiempo, puede haber sido causado por la disolución anódica de la superficie sumergida del acero. El efecto provocado por los iones cloruro, entonces, pudo haber ocasionado la corrosión localizada en forma de picadura y/o corrosión general.

En cuanto al espesor de recubrimiento de cemento sobre el acero de refuerzo, es de observarse en las gráficas 4.7 y 4.8 que los potenciales de media celda tienden a ser menos negativos, dando como resultado una probabilidad de corrosión del 50% para el cemento Portland Tipo I y 95% de probabilidad de corrosión para el Portland Puzolana, con la tendencia a igualarse el valor del  $E_{cor}$ , para ambos tipos de



cementos al sumergirse en la solución salina e igualarse los potenciales. También se ve en las gráficas 4.9 y 4.10 que al utilizar un espesor de cemento igual a 1 cm. se presenta casi la misma probabilidad de corrosión que al utilizar un espesor de cemento igual a 3 cm., esto se debe a que el material es tan poroso que deja pasar los iones cloruro aún teniendo más grosor el material cementante.

En cuanto al monitoreo del potencial, se observa que en las gráficas 4.11 a 4.16 el efecto de la diferencia de aeración no es apreciable, ya que a distintos puntos del mortero se presenta similar  $E_{corr}$  para ambos cementos y relaciones agua/cemento. Si bien es cierto que en estos puntos la separación máxima fue de 4 cm., lo cual es un valor demasiado pequeño para apreciar los efectos. No quedando otra opción debido a que los morteros median 8 cm de largo.

### 5.1.2 Efecto de la Relación Agua/Cemento.

De la gráficas 4.4 y 4.5 se observa una probabilidad de corrosión del 50% (de acuerdo a la norma ASTM C-876) para la relación agua/cemento = 0.4, las demás relaciones ensayadas (0.5 y 0.6) tienen valores de  $E_{corr}$  con probabilidad de corrosión del 95%. La gráfica 4.6 muestra recomendable la relación agua/cemento = 0.4, utilizando el cemento Portland Tipo I, ya que se encuentra dentro de la zona en la cual la probabilidad de corrosión es del 50%. Sin embargo, al sumergir los morteros en la solución salina los  $E_{corr}$  tomaron valores más negativos y semejantes para todas las relaciones agua/cemento, aunque cabe resaltar que de acuerdo con la gráfica 4.6. el cemento Portland Tipo I con relación agua/cemento= 0.4 presenta valores de  $E_{corr}$  por encima de todas las demás relaciones, lo que significa que aún en un medio agresivo (como lo son los cloruros) éste tiene menos probabilidad de corrosión que los demás.

Por tanto sería una buena opción si se fabricarán estructuras de concreto armado utilizando el cemento portland tipo I con relación agua/cemento de 0.4, previamente proporcionándole a éste un tratamiento con inhibidores de la corrosión para evitar que ésta se no se presente.

## 5.2 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.

Basándose en la norma establecida por Millard [APENDICE B]:

<b>REFERIDO AL ELECTRODO <math>Cu/CuSO_4</math> (IASC)</b>	
<b>Resistividad (<math>K\Omega\text{-cm}</math>)</b>	<b>Probabilidad de actividad de corrosión en el acero de refuerzo embebido en concreto.</b>
> 12	<i>Poco Probable.</i>
[5-12]	<i>Probable.</i>
< 5	<i>Muy Probable.</i>

### 5.2.1 Efecto del tipo de cemento

Los resultados mostrados en la gráfica 4.17 muestran que para el cemento Portland Tipo I el valor de  $\rho(K\Omega\text{-cm})$  es mayor que para el cemento portland Puzolana. Sin embargo, de acuerdo a la norma establecida por Millard, los resultados obtenidos muestran que la presencia de corrosión activa es muy probable, para ambos cementos, ya que los valores son mucho menores a 5 ( $K\Omega\text{-cm}$ ) y con base en esta norma existe riesgo alto de corrosión. También se observó que a mayor

contenido de humedad en los poros del mortero, la resistividad tendía a ser menor hasta estabilizarse.

En las gráficas 4.21 a 4.23 se observa que al utilizar un espaciamiento entre electrodos de 2 cm. (para ambos tipos de cemento) la resistividad aumenta, aunque los valores no corresponden con lo esperado, debido a que es posible pensar que al variar el espacio entre los electrodos ( $a=1$  cm. y  $a=2$  cm.) el valor de la resistividad se mantuviera igual para los dos casos, no obstante es de apuntar que los valores obtenidos al utilizar  $a=2$  cm. tienen la misma tendencia que para  $a=1$  cm., únicamente el valor es sensiblemente el doble. Lo anterior se debe a que el mortero es un material heterogéneo, además de que no estaba muy bien compactado.

#### **5.2.2 Efecto de la Relación Agua/Cemento.**

De acuerdo a las gráficas 4.18 a 4.20, se puede observar que, a menor relación agua/cemento la resistividad eléctrica de mortero, en  $K\Omega\text{-cm.}$ , es mayor debido a que presenta menor porosidad.

En la gráfica 4.17 se muestra recomendable la relación agua/cemento = 0.4, utilizando el cemento Portland Tipo I, ya que presenta un valor de resistividad mayor al de los otros valores obtenidos, esto puede explicarse por el hecho de que a menor relación agua/cemento existe menos porosidad en la masa del concreto y por lo tanto menor disponibilidad del medio corrosivo que implica una mayor resistencia eléctrica del concreto.

# **CAPITULO VI**

**“CONCLUSIONES”**

- ◆ La medición del potencial de media celda en función del tiempo es importante, ya que ésta técnica es muy versátil y ampliamente utilizada sobre estructuras de concreto reales porque indican las condiciones de corrosión o protección del acero de refuerzo y permiten localizar zonas con diferente probabilidad de corrosión.
- ◆ La calidad del cemento tiene influencia protectora hacia la estructura, por tanto; este trabajo muestra recomendable utilizar el cemento Portland Tipo I con una relación agua/cemento = 0.4 (gráfica 4.6), debido a que en el tiempo de curado los valores de  $E_{corr}$  se encuentran dentro de la zona en la cual la probabilidad de corrosión es del 50%, y en el período de inmersión en solución salina los valores de  $E_{corr}$  para estas mismas condiciones, aún estando en una zona con probabilidad de corrosión del 95%, están por encima de los demás, siendo estos últimos menores y semejantes entre sí.
- ◆ Debido a su composición (cap. III), el cemento Portland Tipo I ofrece mejor protección contra la corrosión, por su reserva alcalina, proporcionando una capacidad de autoregeneración de la capa pasiva en la superficie metálica .
- ◆ Los valores de potenciales más negativos exhibidos por el cemento puzolánico, es debido a que el  $Ca(OH)_2$  es consumido por la puzolana para la formación de compuestos cementantes, además de que el cemento puzolánico es el que menor cantidad de reserva alcalina posee y por lo tanto tarda más tiempo en pasivar al acero.

- ◆ La medición de la resistividad eléctrica, aunque es una técnica empleada recientemente (adaptada por el Grupo de Corrosión, UNAM), ha demostrado ser una buena opción para localizar la presencia de corrosión en el acero embebido en el concreto, además de ser una técnica semidestructiva.
- ◆ A menor relación agua/cemento aumenta significativamente la resistividad eléctrica, reduciendo en consecuencia la reacción electroquímica de corrosión.
- ◆ Los valores de Potencial de media celda son directamente proporcionales a los de Resistividades Eléctricas.
- ◆ A una concentración de 0.14% en peso de cloruros (en el agua de amasado) la probabilidad de corrosión para ambos cementos y distintas relaciones agua/cemento fue del 95%, por lo tanto; aún cuando existen algunas sugerencias acerca de los límites tolerables de cloruros en el concreto (ACI 318), no es posible hablar de una concentración umbral límite de éstos para iniciar el proceso de corrosión, ya que su acción despasivante está relacionada con muchas variables del concreto, las cuales están dadas por la composición química del cemento, finura, calor de hidratación y tiempo del desarrollo de la resistencia a la compresión.
- ◆ De la composición química del cemento depende el contenido de reserva alcalina de los cementos hidratados y la posibilidad de que los cloruros presentes en el agua de amasado reaccionen con las fases ricas en aluminio del cemento, por otro lado, la finura está relacionada con la porosidad del concreto y por lo tanto con la resistividad del mismo.

- ◆ Dado que el concreto reciente o fresco es más sensible a la acción de las aguas con contenido de cloruros, y que la permeabilidad aumenta con una baja relación agua/cemento y un inmediato curado además de la edad, el agua agresiva debe mantenerse lejos del concreto el mayor tiempo posible, de allí la importancia de utilizar elementos prefabricados, lo cual es contraproducente, ya que los cloruros penetran a través de las juntas causando corrosiones.
  
- ◆ Los cuidados y precauciones, empiezan desde la construcción de la estructura, y no ya que se presentó la corrosión, tomando en cuenta esto se tendrá cada vez menos estructuras corroídas.
  
- ◆ Aunque en aplicaciones arquitectónicas lo más importante es la apariencia, en la ingeniería estructural lo son la resistencia a la corrosión y el costo.

# APÉNDICE A



A continuación se describe la mencionada norma, en la cual se presenta el procedimiento para realizar mediciones de actividad de corrosión, los cuidados que deben guardarse y la forma de interpretar los resultados obtenidos.

La norma C 876-91 de la ASTM consta de las siguientes secciones:

### **1. Alcance.**

- La norma en cuestión es un método de prueba aplicable a concreto en ausencia de recubrimientos y es aplicable en campo y laboratorio para determinar la actividad de corrosión de acero de refuerzo. Esta norma no trata problemas de seguridad asociados con el uso de estructuras de concreto.

- Este método está limitado por la existencia de un circuito eléctrico. Cabe hacer notar que, una superficie de concreto que ha sido secada completamente, de tal manera que se comporte como un material dieléctrico, o que haya sido cubierto por una película dieléctrica no proveerá un circuito eléctrico aceptable. La configuración básica del circuito eléctrico se muestra en la figura A. 1.

### **2. Significado y Uso.**

El método es aplicable a estructuras independientemente de su tamaño o profundidad de la capa de concreto sobre el acero de refuerzo. Asimismo, puede ser utilizado en cualquier momento durante la vida de la estructura de concreto.

Se hace hincapié en que los resultados obtenidos mediante el uso de este método no son considerados como parte de una manera de estimar las propiedades estructurales del acero o de la estructura de concreto reforzada.

Las medidas de potencial deben ser interpretadas por ingenieros o técnicos especialistas en los campos de pruebas de materiales de concreto y de corrosión.

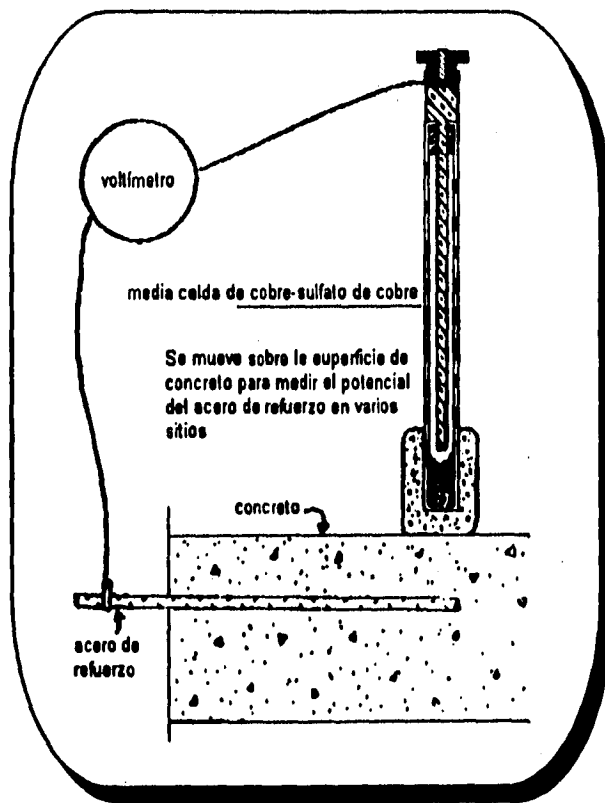


Figura A.1 Circuito de la media celda de cobre-sulfato de cobre.

### 3. Instrumentos.

Los instrumentos utilizados en la medición de potencial de media celda consisten de:

Una *Media Celda* que es una media celda de cobre-sulfato de cobre, la cual se muestra en la figura y está formada por:

- un contenedor de material dieléctrico que no reaccione con cobre o sulfatos de cobre,
- un tapón poroso de madera o plástico que se mantiene húmedo por capilaridad y
- una barra de cobre que está inmersa en una solución de sulfato de cobre saturado.

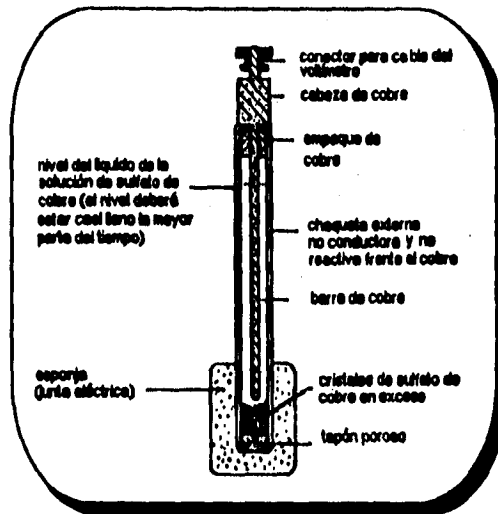


Figura A.2 Sección transversal de la media celda de cobre-sulfato de cobre.

Las soluciones se preparan con químicos grado reactivo disueltos en agua destilada o desionizada. Se dice que hay saturación de la solución cuando un exceso de cristales (no disueltos) son observables en el fondo de la media celda.

Medidas de los componentes de la media celda propuestas por la norma:

Componente	Diámetro no menor a ...	Longitud no menor a ...
Tubo rígido	1 pulgada (25 mm) interior	-
Tapón poroso	1/2 pulgada (13 mm)	-
Barra de cobre	1/4 pulgada (6 mm)	2 pulgadas (50 mm)

El potencial de la media celda respecto al electrodo de hidrógeno es de 0.316 V a 22 °C y tiene un coeficiente de temperatura de alrededor de 0.0005 V más negativo de 0 a 49 °C. Otros electrodos de media celda pueden ser utilizados, tal como el de los calomelanos, cuyas lecturas deben ser convertidas a valores de cobre-sulfato de cobre de acuerdo a la Norma G3.

Cabe señalar que en ésta tesis se utilizó como media celda el electrodo de Calomelanos (ECS). (descrito anteriormente en el Capítulo III)

**Junta eléctrica.** Proporciona una resistencia eléctrica baja entre la superficie del concreto y la media celda para proporcionar un puente líquido entre éstas. Se trata de una esponja humedecida con una solución de baja resistencia. La esponja recubre el extremo de la punta del electrodo de media celda.

**Solución de contacto eléctrico.** Uniformiza la caída de potencial a través del concreto al mojar la junta eléctrica. Un ejemplo de solución es la mezcla de 95 ml de

agente humectante o de detergente líquido bien mezclados con 19 litros de agua potable. A menos de 10 °C aproximadamente 15 % volumen de alcohol debe ser agregado para evitar el opacamiento de la solución de contacto eléctrico.

NOTA: Esta solución es sólo para el electrodo de  $Cu/CuSO_4$ .

En el caso del electrodo de Calomelanos se utiliza  $KCl$  solución 0.1 N, 1 N o saturada.

**Voltímetro.** Debe ser operado por batería y  $\pm 3$  % de precisión de la escala. La impedancia de entrada debe ser no menor a 10 M $\Omega$ , ya que así se asegura que la medida sea más estable y precisa.

**Cables eléctricos.** Su resistencia, para la longitud utilizada, no debe perturbar el circuito eléctrico por más de 0.0001 V. Por ejemplo, no más de 150 m de al menos un calibre AWG No. 24. El alambre debe estar aislado en una superficie externa.

#### 4. Calibración y estandarización.

**Cuidados de la media celda.** El tapón poroso debe ser cubierto cuando no se use por períodos largos para asegurar que no se seque al punto que se vuelva dieléctrico, donde los poros se tapan con cristales de sulfato de cobre. Si hay poca reproducibilidad la barra de cobre puede limpiarse con ácido clorhídrico. No debe usarse otros abrasivos metálicos que contaminen la barra de cobre.

#### 5. Procedimiento.

**Espaciamiento entre mediciones.** El espaciamiento deberá ser de acuerdo con el miembro investigado y el propósito de las mediciones. Así, un espaciamiento de 1.2 m es satisfactorio para evaluación de puentes. Para intervalos más grandes se

pueden omitir formas de corrosión localizada. El espaciamiento puede reducirse cuando las mediciones contiguas tiene diferencias mayores a 150 mV.

**Contacto eléctrico al acero.** Se debe hacer un buen contacto a la varilla usando una tenaza de compresión, envolviéndose o soldándose a una varilla saliente. En algunos se debe limpiar la varilla para hacer un buen contacto o la remoción de concreto para exponer la varilla. La continuidad eléctrica entre componentes de acero con la varilla de refuerzo puede ser determinado a través de la continuidad entre componentes espaciados.

**Contacto eléctrico a la media celda.** Se establece contacto por un lado a la media celda y por el otro a la terminal negativa (tierra) del voltímetro.

**Premojado de la superficie de concreto.** En algunos casos la superficie del concreto debe ser premojado por alguno de los métodos descritos abajo, con la solución descrita anteriormente (ver sección de Instrumentos; Solución de contacto eléctrico) para disminuir la resistencia eléctrica. Para conocer la necesidad de premojar la superficie, se puede seguir el siguiente procedimiento:

- Colocar la media celda en la superficie de concreto y no moverla.
- Observar la lectura del voltímetro para una de estas condiciones:

(a) la medida de la media celda no cambia o fluctúa en el tiempo.

(b) el valor medido de la media celda cambia o fluctúa en el tiempo.

Si la condición (a) se cumple, no se debe hacer el premojado. Si la condición (b) es observada, se requiere de premojado durante un tiempo tal que la lectura de voltaje se estabilice cuando es observada por cinco minutos. Si la condición (a) no se cumple puede haber un mal contacto eléctrico, una alta resistencia o una corriente de alguna otra estructura o instalación cercana.

**Método A para premojado de superficies de concreto.** Es el caso donde un mínimo de premojado es necesario. Se atomiza la superficie del concreto o sólo los puntos de medida descritos (ver sección Procedimientos; Espaciamiento entre mediciones) con la solución humedecedora (ver sección de Instrumentos; Solución de contacto eléctrico). No debe quedar agua libre entre puntos de la cuadrícula de medición al iniciar las mediciones.

**Método B para premojado de superficies de concreto.** Esponjas saturadas en líquido son usadas. Se dejan en la superficie hasta lograr la condición (a).

**Medidas bajo el agua.** Las mediciones bajo el agua son posibles pero deben ser interpretadas con cuidado ya que pueden obtenerse mediciones uniformes a lo largo de la superficie dificultando la localización de la actividad de corrosión, sin embargo, la magnitud de las mediciones sirve para indicar si la actividad de corrosión es significativa.

**Medidas horizontales y verticales.** Pueden realizarse indistintamente en dirección hacia arriba o abajo de la misma manera que se puede seguir una secuencia horizontal, sin embargo se deben tener cuidado que en todo momento que la solución haga contacto simultáneamente con el tapón poroso y la barra de cobre.

#### **6. Registro de los valores de media celda.**

Deben registrarse lo más cercano a 0.01 V. Se reportan los valores en Voltios y se corrigen para la temperatura si el potencial de media celda está fuera del intervalo de  $22 \pm 5.5$  °C. El coeficiente de corrección fue mencionado anteriormente (ver sección Instrumentos; Media celda).

### 7. Presentación de datos.

Las medidas puede ser presentadas de una o de dos maneras. La primera es un mapa de contornos equipotenciales delineando las áreas en los miembros donde hay actividad de corrosión. El segundo es un diagrama de frecuencia acumulada, que proporciona una indicación de la magnitud del área afectada del miembro del concreto.

*Mapa de contornos equipotenciales.* Se muestra el miembro en una escala adecuada, graficándose los valores y dibujándose los contornos a través de valores iguales de potencial o interpolando valores, ver figura A.3. El intervalo máximo de contorno aconsejable es de 0.1 V.

*Distribución de frecuencia acumulada.* Persigue determinar la distribución de potenciales de media celda para el miembro de concreto, usando papel de probabilidad normal ordenando y numerando consecutivamente del potencial menos negativo al más negativo. Se determina la posición de graficación de cada valor de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$f_x = \left( \frac{r}{\sum n + 1} \right) 100$$

donde:

$f_x$  = posición de graficación del total de observaciones para el valor observado. %.

$r$  = posición en lista ordenada del potencial de media celda individual

$\sum n$  = número total de observaciones.

En la figura A.4, el eje de la ordenada del papel de probabilidad se denomina Potencial de Media Celda (Volts vs. CSE), donde CSE es la designación del electrodo de cobre-sulfato de cobre, ver figura . La abscisa del papel de probabilidad se denomina Frecuencia acumulada (%). Se dibujan dos líneas paralelas horizontales



que interceptan los valores de  $-0.2$  y  $-0.35$  V., de la ordenada, respectivamente, a lo largo del diagrama. Tras dibujar todos los valores de potencial de media celda, se traza un ajuste lineal a través de los valores.

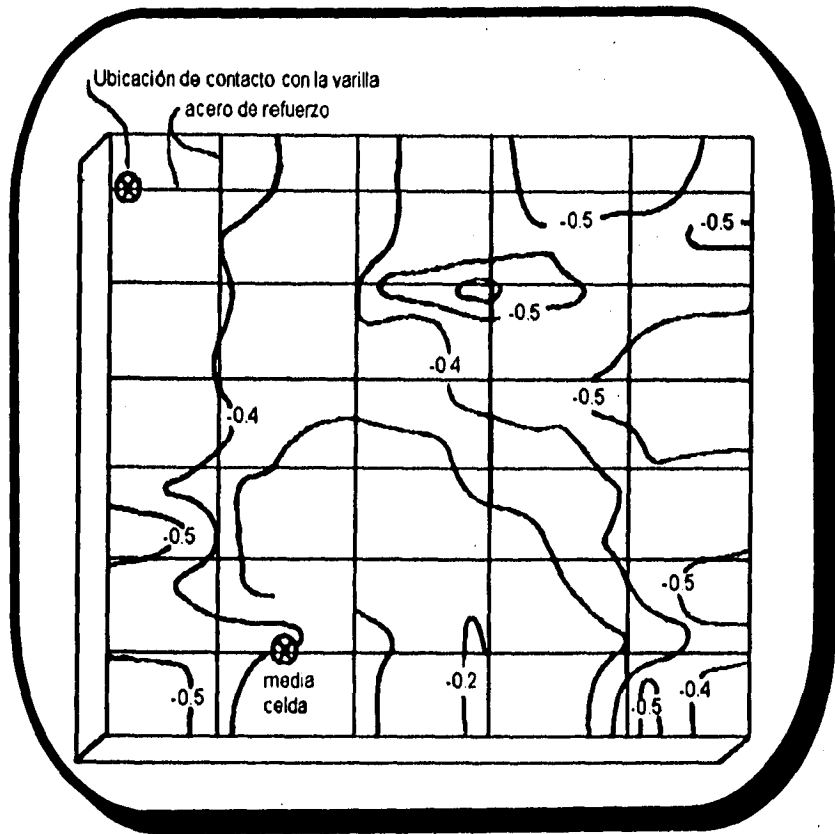


Figura A.3 Mapa de contornos equipotenciales.

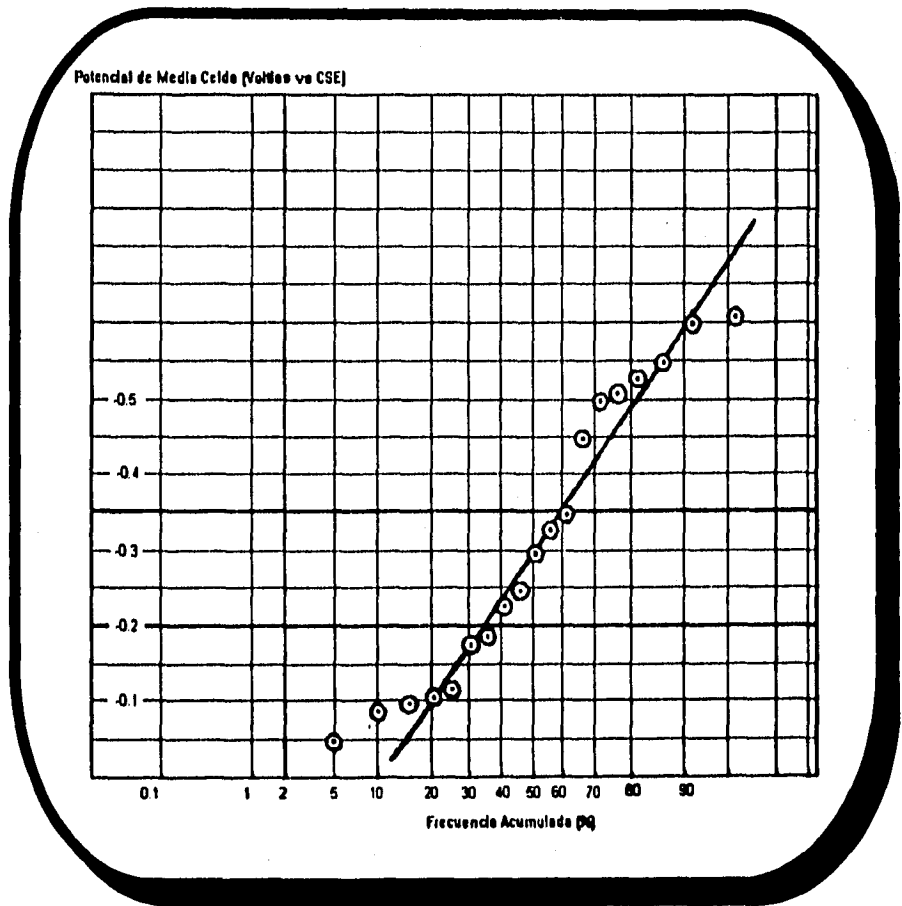


Figura A.4 Diagrama de Frecuencia Acumulada.

**8. Interpretación de resultados.**

El valor numérico de la medición de potencial da indicación de la presencia o ausencia de corrosión de acero embebido en mortero de cemento portland o concreto no carbonatados, sin recubrimiento (como galvanizado) y cerca de la punta de la media celda. El valor no indica la velocidad de corrosión.

La interpretación de los resultados se hace de acuerdo a las siguientes tablas:

<b>REFERIDO AL ELECTRODO Cu/CuSO<sub>4</sub> (ESC)</b>	
<b>Potencial (mV).</b>	<b>Probabilidad de corrosión en el acero de refuerzo embebido en concreto (%).</b>
Menos negativo que -200	5
[-200 a -350]	50
Más negativo que -350	95

<b>Hg/H<sub>2</sub>,Cl<sub>2</sub>,Cl<sup>-</sup></b>	
<b>Potencial (mV).</b>	<b>Probabilidad de corrosión en el acero de refuerzo embebido en concreto (%).</b>
Menos negativo que -120	5
[-120 a -270]	50
Más negativo que -270	95

En pruebas de laboratorio donde los potenciales son más negativos que -0.500 V. vs. ESC, aproximadamente la mitad de las muestras se rompen debido a la actividad de la corrosión.

Además, si se obtienen lecturas positivas, éstas no deberán ser consideradas como válidas, pues esto indica humedad insuficiente en el concreto, poca conexión con el acero o la presencia de corrientes vagabundas.

**9. Precisión.**

La diferencia entre dos lecturas de media celda tomadas en la misma ubicación con la misma celda, no deberá exceder de 10 mV cuando la celda es desconectada y reconectada.

La diferencia entre dos lecturas de media celda tomadas en la misma ubicación con dos diferentes celdas, no deberá exceder de 20 mV.

**10. Reporte.**

Se debe reportar :

- El tipo de celda utilizada.
- La temperatura media durante las mediciones.
- El método de premojado y el método de conexión del voltmetro al acero de refuerzo.
- Un mapa de contornos equipotenciales mostrando la localización del contacto con el acero, o una gráfica de distribución de frecuencia acumulada de la media celda, o ambos.
- El porcentaje del total de los potenciales de media celda más negativos que 0.350 V. y
- El porcentaje de los potenciales de media celda que son menos negativos que -0.200 V.

# APÉNDICE B

Aún no existe un método establecido como norma oficial para la determinación de la resistividad en el concreto. Sin embargo se ha utilizado el método basado en el artículo de Millard et. al.<sup>35</sup>

### 1. Alcance.

- Este método cubre la determinación de la resistividad del concreto, con el propósito de determinar la actividad de corrosión del acero embebido en el concreto.
- Este método se basa en la conocida fórmula  $\rho = \frac{RA}{L}$ , que relaciona el cambio de resistencia eléctrica de un elemento sensor a medida que el proceso de corrosión reduce su área en la sección transversal.
- Este método está limitado por la existencia de un circuito eléctrico. Cabe hacer notar que, una superficie de concreto que ha sido secada completamente de tal manera que se comporte como un material dieléctrico, o que haya sido cubierto por una película dieléctrica no proveerá un circuito eléctrico aceptable.
- Este método se ha usado ampliamente para determinar velocidades de corrosión en distintos medios. La principal ventaja del método de resistencia eléctrica radica en la posibilidad de evaluar los cambios que se presenten en la velocidad de corrosión en función del tiempo y poder usarse en el campo.

### 2. Usos.

La extracción de un corazón cilíndrico de concreto de una estructura cada vez que sea necesaria una medición de resistividad es poco práctica y económica. A su vez, si se usara un extractor de corazones de tipo diamante lubricado con agua alteraría la resistividad del material al modificar el contenido de humedad del mismo. No obstante, una técnica empleada para determinar la resistividad del

concreto de manera rápida y fácil (sin dañar la estructura), consiste en hacer pasar una magnitud de corriente alterna entre dos electrodos en contacto con la superficie del concreto.

En un material homogéneo semi infinito se crea un campo de flujo de corriente, clásico de la medición de la diferencia de potencial a través de los otros dos electrodos, colocados entre los electrodos de corriente, así puede evaluarse la resistividad del material.

- Este método puede ser usado para indicar la actividad de corrosión asociado con el acero embebido en concreto en muestras de campo o de laboratorio.
- Este método es aplicable a cualquier muestra, siendo importante especificar la relación entre el espesor de la cubierta de concreto sobre el acero de refuerzo y la separación entre electrodos.
- Este método puede ser usado en cualquier momento durante la vida del concreto.
- Los resultados obtenidos por este método no deberán ser considerados como un medio para estimar las propiedades estructurales del acero o del concreto.

### 3. Instrumentos

Los instrumentos utilizados en la medición de la resistividad eléctrica consisten de:

**Cuatro Medias Celdas de cobre-sulfato de cobre saturado**, y están formadas por:

- un contenedor de material dieléctrico que no reaccione con cobre o sulfatos de cobre,
- un tapón poroso de madera que se mantiene húmedo por capilaridad y
- un alambre de cobre que está inmersa en una solución de sulfato de cobre saturado, la cual es inyectada con una jeringa de vidrio o plástico.

Las soluciones se preparan con químicos grado reactivo disueltos en agua destilada o desionizada. Se dice que hay saturación de la solución cuando un exceso de cristales (no disueltos) son observables en el fondo de la media celda.

Medidas de los componentes de cada media celda, propuestas:

Componente	Diámetro no mayor a ...	Longitud no menor a ...
Tubo rígido	0.16 pulgada (4 mm). interior	2.6 pulgadas (65 mm.)
Tapón poroso	0.12 pulgada (3 mm.)	0.4 pulgada (10 mm)
Alambre de cobre	0.04 pulgada (1 mm.)	3.6 pulgadas (90 mm.)

**Caimanes.** Se utilizan para unir eléctricamente el circuito formado por el concreto y el aparato para la determinación de la resistividad.

**Desecador.** El desecador es usado para colocar las muestras de concreto en él. con el fondo del mismo con agua, y simular así, la condición de una atmósfera saturada.

**Aparato para determinación de la resistencia.** El aparato debe ser operado con corriente alterna, con una frecuencia de 50 - 1000 Hz, (debido a que el uso de un sistema de corriente directa para la determinación trae como consecuencia la polarización del electrolito y la formación de hidrógeno y oxígeno en los electrodos), y tener una exactitud de  $\pm 3\%$  de la escala mínima. El aparato puede ser del tipo Soil Resistance Meter, Model 400, Nilsson Electrical Laboratory Inc. o similar.

**Cuidados de los electrodos.** El tapón poroso de cada electrodo deberá permanecer húmedo aún cuando no se use. Para asegurarse que no lleguen a secarse se deberán



mantener los electrodos en un vaso con agua destilada. Además, verificar que el nivel de la solución saturada de sulfato de cobre permanezca constante en cada electrodo a lo largo de la prueba.

### **5. Procedimiento.**

*Espaciado entre electrodos.* Cabe destacar que el espaciado o arreglo de Wenner está determinado por la superficie del concreto a medir.

- Si el espaciado es muy pequeño, la presencia o ausencia de partículas individuales agregadas, que casi siempre tienen alta resistividad, conducirá a un disparo del valor de la resistividad.
- Al usar un espaciado grande puede conducir a inexactitud en la lectura debido a una constricción del campo de corriente por las orillas de la estructura.

Estos efectos son inevitables, y no deben ser ignorados al interpretar los resultados. Por tanto, se considera conveniente un espaciado de 2 cm., para la evaluación de cubiertas de concreto. Millard<sup>35</sup> encontró que el 77% de la corriente fluye a lo largo de  $4a$ , es decir, cuatro veces la separación entre electrodos, por tanto el espaciado entre los electrodos debe ser como máximo  $1/4$  del espesor de la capa de concreto, de esta manera el error debido a la constricción del flujo es menor al 20%.

### *Conexión eléctrica al concreto.*

- Hacer cuatro incisiones en el concreto con una broca cuyo diámetro sea igual al diámetro exterior de los electrodos, y a una profundidad de aproximadamente 5 mm.
- Colocar uno a uno los electrodos en cada orificio, poniendo cuidado en que realmente haya contacto entre el concreto y el tapón poroso de cada electrodo, de ser necesario, sujetar con plastilina cada uno de los electrodos.

- Los dos electrodos del centro se conectan con caimanes a los bornes de corriente del aparato.

***Determinar los valores de resistencia de cada muestra.***

- Colocar la manija de resolución de barrido en posición baja("low"), y mantenerla en esa posición, mientras que se coloca la perilla del factor de escala en uno tal que la aguja indicadora sea lo suficientemente sensible para efectuar la lectura; esto es, con la perilla de medición, hacer coincidir la aguja en el centro de la escala. Una vez hecho lo anterior, se libera la posición de baja resolución.
- Se coloca la manija de resolución de barrido en la posición de alta ("high") y con la perilla del valor de la lectura se hace coincidir nuevamente la aguja con el centro de la escala. Este último valor, multiplicado por el factor de escala (0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1K, 10 K ó 100K), es el de la resistencia de la muestra de concreto.

NOTA: Cuando se aplica el método de la resistividad de cuatro puntos en concreto hay tres aspectos que deben tomarse en cuenta para obtener resultados confiables:

- El concreto es un material eléctrico heterogéneo especialmente el reforzado con varilla de acero.
  - Una estructura podría no ser "semi infinita" en tamaño, y
  - Podría haber dificultades en el contacto superficial entre los electrodos y la superficie del concreto, esto puede causar errores significativos cuando la superficie del concreto está seca.

**6. Registro de los valores de resistividad eléctrica del concreto.**

Deben registrarse los valores de la resistencia eléctrica, ya que con éstos se calcula el valor de la resistividad del concreto, mediante la fórmula siguiente:

$$\rho = R2\pi a$$

donde:

$\rho$  = resistividad (Ohms-cm)

$R$  = resistencia eléctrica (Ohms).

$a$  = espaciado entre electrodos (cm.).

**7. Presentación de datos.**

Las mediciones de prueba deben ser presentados en tablas en las que se indique la etiqueta de la muestra, la lectura de la resistencia, las condiciones del espécimen al momento de efectuar la medición (si se encontraba seco, húmedo o si se dejó en una atmósfera saturada), así como la temperatura ambiental al momento de hacer las mediciones.

**8. Interpretación de resultados.**

La prueba de laboratorio de los especímenes de concreto indica el valor numérico de la resistencia, con lo cual se calcula el valor de la resistividad. El valor numérico de ésta da indicación de la presencia o ausencia de corrosión que brinda el material (en este caso el mortero o concreto) al acero embebido. El valor no indica la velocidad de corrosión.

La interpretación de los resultados se hace de acuerdo a la siguiente tabla:

<b>REFERIDO AL ELECTRODO <math>Cu/CuSO_4</math> (ESC)</b>	
<b>Resistividad (<math>K\Omega\text{-cm.}</math>)</b>	<b>Probabilidad de actividad de corrosión en el acero de refuerzo embebido en concreto.</b>
> 12	<i>Poco Probable.</i>
[5-12]	<i>Probable.</i>
< 5	<i>Muy Probable.</i>

#### 9. Precisión.

El valor de la resistencia eléctrica del concreto no debe variar durante al menos cinco minutos.

#### 10. Reporte.

Deberá incluir:

- Tipo de electrodos utilizados.
- Tipo de aparato usado en la determinación de la resistencia.
- La temperatura ambiental promedio durante la prueba.
- Las condiciones de prueba de la muestra de concreto.
- Una tabla en la que se indique el valor de la resistencia eléctrica obtenida, así como la resistividad calculada.

# **BIBLIOGRAFÍA**

- 1.- Vargas Gómez F., "La Infraestructura del Transporte.", IMCYC, V. I, N°. 7, p. 5-14, Dic. (1988).
- 2.- Payá Peinado M., "Hormigón Vibrado y Hormigones Especiales.", CEAC, Barcelona, España (1991).
- 3.- American Concrete Institute, "Manual of Concrete Inspection", reported by ACI comité 311, Detroit, U.S.A., 1985.
- 4.- Kosmatka S.H. y Panarese W. C., " Diseño y Control de Mezclas de Concreto", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), México, D.F. (1992).
- 5.- Boris Bresler, "Materials, Structural Elements, Safety", Reinforced Concrete Engineering, V. I., John Wiley & Sons. New York (1974).
- 6.- Martínez. L., "La Conveniencia de los Aceros de baja Aleación en la Construcción Antisísmica.", Instituto Física, UNAM., Siderúrgica Lázaro Cárdenas , Las Truchas. S. A. (sin publicar).
- 7.- Wernish. R. G., "Bond Studies of Different Types of Reinforcing Bars", American Concrete Institute, USA, p. 145-164.. (1937).
- 8.- Gikey. H. J., "The Bond Between Concrete and Steel", American Concrete Institute, Jnal. of the ACI, V. 35, p. 10-11, Septiembre (1938).

- 9.- Gjorv, O. E. ; Vennesland, O; El-Busaidy, A. H. S., "Diffusion of Dissolved Oxygen Through Concrete", Paper no. 17, NACE Corrosion U.S.A., p.13, March (1976).
- 10.- Biczok, I., "La Corrosión del Hormigón y su Protección.", URMO, España, p. 677, (1972).
- 11.- Neville, A. M. "Tecnología del Concreto.", T. I, IMCYC, México. 1984.
- 12.- Fritz de la O. G. Otto, "Concreto Armado.", Facultad de Ingeniería. UNAM, p. 11-15, (1965).
- 13.- Tabor, L. J., "Reparación del Concreto.", IMCYC, V. 18, N°. 116, p. 19-26, Diciembre (1980).
- 14.-J. Avila, J. Genescá, "Más allá de la herrumbre I". La Ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica, México. 1986
- 15.- Galvele, J. R. "Corrosión", monografía no.21, Secretaría General de la O.E.A. Prog. de Desarrollo Científico y Tecnológico, E.E.U.U., 1979. p. 7, 37, 38.
- 16.- Cano, U.; Mendoza, J., "Efecto del óxido superficial sobre la pasividad de estructuras de acero embebidas en concreto". Tesis de Licenciatura. Fac. de Química, UNAM, México, 1988.

17.-Joshi, P.S. "Stimulated decomposition of  $Fe(OH)_2$  in presence of avt chemicals and metallic surfaces-relevance to low temperature feed water line corrosion". Corrosion. Vol. 49, N° 4, April 1993, pp. 300-309.

18.-Vesikari, Erkki., "Service life of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement", Concrete and Silicate Laboratory. Valtion Teknillien Tutkimus Keskus, Tutkimutsia. Espoo, Finland, August 1988, pp. 53

19.- Diego P. L. et. al., "Evaluación de la corrosión en acero estructural AISI 1010 inducida por bacterias aerobias y anaerobias", Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM. México, 1995.

20.-Pourbaix, M., "Atlas of Electrochemical Equilibrium in Aqueous Solutions", Pergamon Press. London, 1976.

21.- Kesavan S., Mozhi T. A. and Wilde B. E., "Technical Note :Potential-pH Diagrams for the Fe-Cl-H<sub>2</sub>O System at 25 to 150 °C", Journal Corrosion, Vol. 45, No. 3, March 1989. p. 213-214.

22.- Paine P., "Discussion on Technical Note :Potential-pH Diagrams for the Fe-Cl-H<sub>2</sub>O System at 25 to 150 °C", Corrosion, Vol. 46, No. 1, January 1990. p. 19-22.

23.-Evans, U.R. "Corrosiones Metálicas", 1976, p. 192-193.

24.- Comett A. I. y Pali R. M., "Propuesta de manual para inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras". Tesis de Licenciatura. Facultad de Química, UNAM. México, 1994.



- 25.-Funahashi, M. and Bushman, J. B., "Technical Review of 100 mV. Polarization Shift Criterion for Reinforcing Steel in Concrete", Corrosion, Vol. 47, No. 5, p. 376-386, (1991).
- 26.-American Concrete Institute, "Corrosion of Metals in Concrete", reported by ACI comitte222, Detroit, U.S.A., 1985, p.4
- 26.-Boah J. K., S. K. Somuah and P. LeBlac, "Electrochemical Behavior of Steel in Saturated Calcium Hydroxide Solution Containing  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  and  $CO_3^{2-}$  Ions", Corrosion Sci., Vol. 46, p. 153-158. (1990)
- 27.-Raharinaivo, A. ; Genin, R. J. M. , "Sobre la Corrosión de Armaduras de hormigón en presencia de cloruros", Materiales de Construcción. V. 36, no. 204. Oct./Nov./Dic., 1986. p.5-16
- 29.- Rodríguez R. A., "Carbonatación en concreto armado : efecto del medio de curado y la exposición en diferentes ambientes en la velocidad de corrosión del acero de refuerzo". Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. UNAM. México, 1996.
- 30.-Carpio, J.J. et al., "Severe Corrosion of a Gulf of Mexico Bridge, Materials Performance, Vol. 33, N°.12, December, 1994, p. 12-16.
- 31.-Standard Test Method for Half Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Designation C 876-91 American Society for Testing and Materials.

- 32.- J. Avila, J. Genescá, "Más allá de la herrumbre II". La Ciencia desde México. Fondo de Cultura Económica, México, 1986, p. 116-118.
- 33.-Alonso. C. Andrade, C. A. & González, J. A. "Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types". Cement and Concrete Research. Vol. 8, 1988, pp. 687-698.
- 34.- Carpio, J. J. "A case study of severe corrosion a 3 Km. Length Bridge over seawater". NACE '94 Conference, March 1994.
- 35.- Millard, S.G., Harrison, J.A. & Edwards, A.J., "Measurement of the electrical resistivity of reinforced concrete structures for the assesment of corrosion risk.". British Journal of Corrosion, Vol. 31, p-617-621.
- 36.- Kunze Walter, "Nuevos desarrollos en concreto", IMCYC, Vol. 1, N°. 8, Enero. 1989, p. 5-19.
- 37.- Sidney H. Avner, "Introduction to physical metallurgy", Mc Graw-Hill Book Company, 1974, p. 246.
- 38.- López , G. W., Miranda, H. M., "Estudio de la velocidad de corrosión de los refuerzos metálicos en estructuras de concreto", Tesis de Licenciatura. México, Fac. de Química, UNAM, 1988.
- 39.- Alcocer O. I., "Carbonatación de estructuras de concreto reforzado", Tesis de Licenciatura, Fac. de Química, UNAM., México. 1994.

40.- Pressler, E.E.; Brunauer, S.; Kanto, D.L.; Weise, C.H., "Determination of the Free Calcium Hydroxide Contents of Hydrated Portland Cements and Calcium Silicates", Analytical Chemistry, v.33, no. 7, June 1961, pp. 877-882

41.- González, Fernández, J. A., "Teoría y Práctica de la Lucha Contra la Corrosión", Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, España, 1984, p.187.

42.- González Villarreal, F. J., "La Infraestructura Hidráulica", IMCYC, Vol. I, N°. 7, Dic. 1988, p. 25-36.

43.- Smart N. G. and Bockris J. O'M., "Effect of Water Activity on Corrosion", Corrosion, Vol. 48, N°. 4, p. 277-280.