

T  
620.137  
GOM



**Escuela Superior Politécnica del Litoral**  
**FACULTAD DE INGENIERIA EN MECANICA Y CIENCIAS DE**  
**LA PRODUCCION**



**"Estudio de la Polarización Catódica**  
**del Acero en Estructuras de Hormigón**  
**Armado"**

**TESIS DE GRADO**

Previa la Obtención del Título de:  
**INGENIERO MECANICO**

Presentada por:

**HOOVER RICARDO GOMEZ HURTADO**



Guayaquil - Ecuador  
Año - 1997

## AGRADECIMIENTO.

Al ING. JULIAN PEÑA, porque como Director de Tesis supo guiar en todo momento esta investigación, al CENTRO TÉCNICO DEL HORMIGÓN de la Cemento Nacional y por su intermedio al ING. HUGO EGUEZ por todo el apoyo brindado durante el desarrollo de esta tesis.

A la ING. SORAYA ALBÁN MORALES por toda su ayuda durante mi vida universitaria, al SR. MARCOS ROJANO y a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo.

## DEDICATORIA

A DIOS.

A MIS PADRES.

A MI ABUELITA.

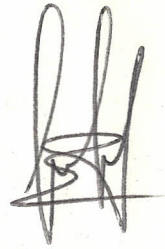
A MIS TIAS Y HERMANOS.

**TRIBUNAL DE GRADUACIÓN**



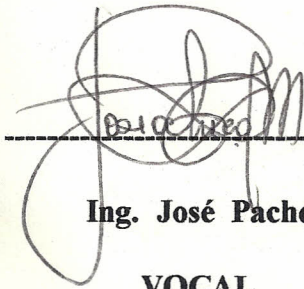
---

**Ing. Mario Patiño**  
**SUB- DECANO DE LA FIM**



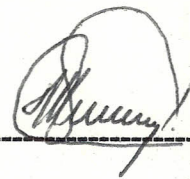
---

**Ing. Julián Peña Estrella .**  
**DIRECTOR DE TESIS**



---

**Ing. José Pacheco**  
**VOCAL**



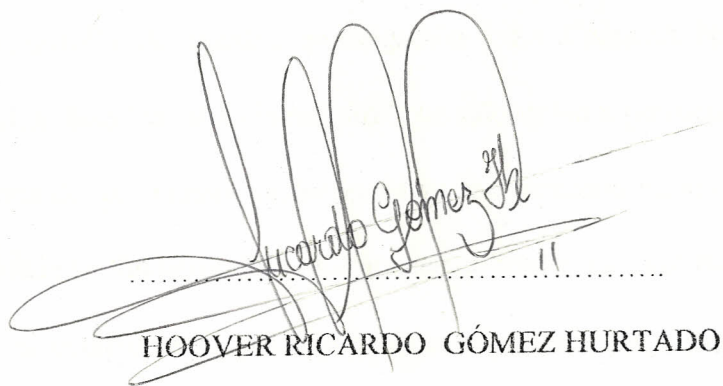
---

**Ing. José Mancero**  
**VOCAL**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“ La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL** ”

( Reglamento de Graduación de la ESPOL ).



HOOVER RICARDO GÓMEZ HURTADO

## RESUMEN.

La corrosión de los aceros de armadura , ha sido uno de los problemas que mas ha preocupado al momento de planificar obras empleando hormigón armado, por la dificultad en garantizar la durabilidad económica de las estructuras ; especialmente en lugares que como sucede en ambientes marinos y costeros favorecen la corrosión rápida del acero de refuerzo.

El tema de nuestro estudio surge como una medida necesaria para conocer el comportamiento activo/pasivo del hormigón armado y la respuesta a la Polarización Catódica de este material , por efecto de la inyección de una Corriente de Protección. De esta forma, se podrá tomar medidas precautelatorias para evitar no solo el deterioro de construcciones futuras , sino también prever los gastos que demanda la reparación y restauración de una estructura dañada por una corrosión severa.

Para el desarrollo de nuestra investigación , La Cemento Nacional , a través del “ **Centro Técnico del Hormigón** ” ha sido quien a patrocinado este proyecto. La ejecución de los trabajos preliminares se han realizado en los laboratorios de este Centro, donde se fundieron los especímenes utilizados en nuestras pruebas , habiendo facilitado el equipamiento y logística necesaria , además que dieron el respaldo económico al proyecto.

El presente estudio está orientado a evaluar el comportamiento del acero en dos tipos de hormigón: uno de baja y otro de alta resistencia ante la presencia de una corriente catódica.

Esto lo haremos utilizando un Sistema de Protección Catódica por Corrientes Impresas para polarizar el acero hasta llegar a potenciales de protección y posteriormente determinaremos la incidencia mecánica de los hormigones.

Se harán pruebas complementarias en los dos tipos de hormigón como por ejemplo: determinación de la resistencia mecánica, porosidad, contenido de cloruros, porcentaje de humedad, medición de potenciales de corrosión y las caídas de voltaje que son de nuestro interés para conocer la respuesta de los hormigones ante la presencia de la corriente de polarización catódica.

Esta tesis consta de cuatro capítulos:

En el capítulo I se hará una introducción a los conceptos básicos sobre procesos de corrosión de las Armaduras, sus causas y efectos.

También hace un enfoque sobre los Sistemas de Protección Catódica, sus aplicaciones en estructuras de Hormigón y el papel de éstos como una forma eficaz de prevenir y detener la corrosión.

El capítulo II describe la parte experimental introducida en nuestro estudio, la metodología, el procedimiento, las normas utilizadas, los ensayos realizados, y resultados.

En el capítulo III se presentan el Análisis de los Resultados.

Por último, en el Capítulo IV, se presentan las conclusiones y recomendaciones.

Esperamos que este trabajo sirva como una herramienta para la inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras, y además como una guía para próximas

investigaciones en el campo de los Sistemas de Protección del Hormigón Armado  
contra la corrosión.

## INDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Tipos de corrosión de anmaduras y factores que la provocan.....	6
Figura 1.2	Carbonatación del recubrimiento de Hormigón .....	7
Figura 1.3	Visualización de la red de poros de Hormigón.....	9
Figura 1.4	Muestra de una viga principal de un muelle dañado por corrosión...	10
Figura 1.5	Corrosión de una viga secundaria completamente corroída .....	11
Figura 1.6	Corrosión en fisuras transversales y longitudinales .....	12
Figura 1.7	Zona de Splash o zona de marea .....	17
Figura 1.8	Simplificación del fenómeno de intercambio de humedad entre el recubrimiento de hormigón y el medio ambiente.....	18
Figura 1.9	Contenido de humedad en los poros de hormigón en función de la humedad ambiente.....	19
Figura 1.10	Funcionamiento esquemático de un macropar generado por corrosión de las armaduras superiores debido a la penetración de cloruros desde el exterior .....	21
Figura 1.11	Desprendimiento de la capa de hormigón en una losa .....	23
Figura 1.12	Esquema para la dedición de los potenciales naturales de corrosión	25
Figura 1.13	Esquema para la medición de la resistividad eléctrica del hormigón	30
Figura 1.14A	Sistema de protección catódica mediante ánodos de sacrificio.....	34
Figura 1.14B	Sistema de protección catódica por corrientes impresas .....	34
Figura 1.15	Diagrama de Pourbaix .....	38
Figura 1.16	Control Anódico.....	41
Figura 1.17	Control Catódico.....	42
Figura 1.18	Control Mixto.....	42
Figura 1.19	Potencial del Acero en Hormigón vs Tiempo de Polarización .....	44
Figura 2.1	Preparación de los encofrados de madera .....	49
Figura 2.2	Decapado de las varillas con ácido sulfúrico al 10 %.....	50
Figura 2.3	Distribución de la malla de titanio y las cuatro varillas de acero dentro de la probeta de hormigón .....	51
Figura 2.4	Dimensiones de la probeta de hormigón .....	51
Figura 2.5	Medición del asentamiento en el hormigón.....	53
Figura 2.6	Probetas y cilindros antes y después de la fundición .....	54
Figura 2.7	Control del peso de los materiales del hormigón .....	55
Figura 2.8	Cilindros listos para el ensayo de Resistencia a la compresión ....	55
Figura 2.9	Medición de la resistencia a la compresión .....	56
Figura 2.10	Determinación de la porosidad del hormigón.....	59
Figura 2.11	Tubería de hormigón pretensado colapsada por la presencia de cloruros dentro de la mezcla de hormigón .....	70
Figura 2.12	Determinación del contenido de cloruros en el hormigón .....	72
Figura 2.13	Titulación de las muestras de hormigón para determinar la cantidad de cloruros.....	74
Figura 2.14	Perfil de cloruros en el recubrimiento del hormigón.....	76
Figura 2.15	Celda de Polarización Catódica.....	78

Figura 2.16	Rectificador de Corrientes .....	79
Figura 2.17	Equipo utilizado para medir potenciales de corrosión .....	81
Figura 2.18	Medición del potencial de Corrosión de las Probetas de hormigón ..	82
Figura 2.19	Variación de la densidad del Corriente de protección del acero en función de la resistividad eléctrica del medio.....	88
Figura 2.20	Potencial del Acero en el hormigón vs tiempo de polarización durante la protección catódica.....	93
Figura 3.1	Variación de la Resistencia Mecánica alcanzada por el hormigón .....	97
Figura 3.2 A	Porcentaje de Saturación del hormigón .....	99
Figura 3.2 B	Probeta de Hormigón en ambiente salino.....	100
Figura 3.3	Macrografía tomada a la varilla de acero después de 7 meses de exposición.....	102
Figura 3.4	Macrografía tomada a la malla que actuó como ánodo.....	103
Figura 3.5	Perfil del contenido de Cloruros en el Hormigón.....	104
Figura 3.6	Acople malla/acero de refuerzo para determinar corriente de corrosión galvánica.....	105
Figura 3.7	Disminución de la corriente de corrosión galvánica antes de la polarización.....	107
Figura 3.8	Polarización del acero y caídas en el voltaje de polarización.....	108
Figura 3.9	Variación en la corriente de Polarización catódica .....	109
Figura 3.10	Potencial natural de corrosión ( Probeta A1 ).....	113
Figura 3.11	Potencial natural de corrosión ( Probeta A2 ).....	114
Figura 3.12	Potencial natural de corrosión ( Probeta A3 ).....	115
Figura 3.13	Potencial natural de corrosión ( Hormigón B1).....	116
Figura 3.14	Potencial natural de corrosión ( Probeta B2 ).....	117
Figura 3.15	Potencial natural de corrosión ( Hormigón B3 ).....	118
Figura 3.16	Curva de polarización para el acero en Hormigón ( $D_c = 253 \text{ mA} / \text{m}^2$ ).....	119
Figura 3.17	Curva de polarización para el acero en hormigón. ( Hormigón A y $D_c = 40 \text{ mA}/\text{m}^2$ ).....	120
Figura 3.18	Curva de polarización para el acero en hormigón. ( Hormigón B y $D_c = 5 \text{ mA}/\text{m}^2$ ).....	121
Figura 3.19	Curva de Polarización para el acero en hormigón. ( Hormigón A1 y $D_c = 5 \text{ mA}/\text{m}^2$ ).....	122
Figura 3.20	Curva de polarización para el acero en hormigón. ( Hormigón A2 y $D_c = 5 \text{ mA}/\text{m}^2$ ).....	123
Figura 3.21	Curva de polarización para el acero en hormigón. ( Hormigón B1 y $D_c = 5 \text{ mA} / \text{m}^2$ ).....	124
Figura 3.22	Curva de polarización para el acero en hormigón. ( Hormigón B2 y $D_c = 5 \text{ mA} / \text{m}^2$ ).....	125

## INDICE DE TABLAS

		Pág #
Tabla I	Interpretación de los potenciales de corrosión .....	27
Tabla II.	Cuadro de resistividades eléctricas alcanzadas por un hormigón.....	32
Tabla III.	Criterios de valorización de la resistividad eléctrica .....	32
Tabla IV.	Dosificaciones utilizadas en la preparación de los hormigones.....	48
Tabla V .	Resultado de la resistencia a la Compresión ( Hormigón A ).....	57
Tabla VI .	Resultado de la resistencia a la compresión ( Hormigón B ) .....	57
Tabla VII .	Criterios de valorización de la Porosidad.....	61
Tabla VIII .	Determinación de la porosidad del hormigón.....	62
Tabla IX .	Determinación de la densidad del hormigón .....	63
Tabla X .	Contenido en humedad del hormigón .....	66
Tabla XI .	Criterio de valorización de la fenolftaleína en contacto con el hormigón.....	68
Tabla XII.	Resultado de la profundidad de carbonatación obtenida en los hormigones después de 7 meses de exposición. ....	69
Tabla XIII	Criterio de valorización de cloruros.....	75
Tabla XIV .	Contenido de cloruros en las probetas de hormigón.....	75
Tabla XV .	Variación de los potenciales naturales de corrosión ( Probeta A1 ).....	83
Tabla XVI .	Variación de los potenciales naturales de corrosión ( Probeta B1).....	83
Tabla XVII .	Variación de los potenciales naturales de corrosión ( Probeta A2).....	84
Tabla XVIII .	Variación de los potenciales naturales de corrosión ( Probeta B2 ).....	84
Tabla XIX .	Variación de los potenciales naturales de corrosión ( Probeta A3 ).....	85
Tabla XX .	Variación de los potenciales naturales de corrosión ( Probeta B3).....	85
Tabla XXI .	Variación de los potenciales naturales de corrosión ( Probeta A4 ).....	86
Tabla XXII .	Variación de los potenciales naturales de corrosión ( Probeta B4 ).....	86
Tabla XXIII.	Variación de la corriente de corrosión galvánica entre la malla y el acero de refuerzo.....	106

## NOMENCLATURA

a/c	Relación agua -cemento
A	Amperios
Ag/AgCl	Electrodo de plata -cloruro de plata
AgCl	Cloruro de plata
AgCrO <sub>4</sub>	Cromato de plata.
AgNO <sub>3</sub>	Nitrato de plata
ACI	Instituto Americano del Concreto.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
°C	Grado centígrado.
Ca (OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de calcio
Cl <sup>-</sup>	Ión cloruro
ClNa	Cloruro de sodio
CO <sub>3</sub> Ca	Carbonato de calcio
CO <sub>2</sub>	Bióxido de Carbono
Cu/CuSO <sub>4</sub>	Electrodo de cobre- sulfato de cobre
cm <sup>2</sup>	Centímetro cuadrado
CrO <sub>4</sub>	Ión cromato
Dc	Densidad de corrientes
e <sup>-</sup>	Electrón
E <sub>corr</sub>	Potencial de corrosión
E <sub>prot</sub>	Potencial de protección catódica
E <sub>o</sub>	Potencial natural del acero
E <sub>off</sub>	Potencial instantáneo OFF
E <sub>on</sub>	Potencial instantáneo ON
Fe <sup>++</sup>	Ión hierro
FeCl <sub>2</sub>	Cloruro de hierro
gr	Gramo
H <sub>2</sub>	Hidrógeno
H <sub>2</sub> O	Agua
HR	Humedad relativa
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido sulfúrico
I	Corriente de corrosión
i <sub>prot</sub>	Corriente de protección
K	Potasio
Kg/m <sup>3</sup>	Kilogramo por metro cúbico.
K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	Cromato de Potasio
KN	Kilonewton
KΩ	Kilohmio
lt	Litro
mA	Miliamperio

$\text{mA/m}^2$	Miliamperio por metro cuadrado
$\text{mA/pie}^2$	Miliamperio por pie cuadrado
Me	Metal
mg	Miligramo
ml	Mililitro
mm	Milímetro
mol/ litro	Mol por litro
MPa	Megapascal
mV	Milivoltio
N	Normalidad
NACE	Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión.
NMT	Técnica de la Magnitud numérica
OFF	Apagado
ON	Encendido
ohm	Ohmio
ohm-cm	Ohmio- centímetro
$\text{O}_2$	Oxígeno
$P_{\text{seco}}$	Peso seco
$P_{\text{sat}}$	Peso saturado
$P_{\text{sumerg}}$	Peso sumergido
$P_{\text{muestra}}$	Peso de la muestra
pH	Potencial de hidrógeno
R	Resistencia eléctrica
SCE	Electrodo de calomelanos- saturado
V	Voltio
$\mu\text{A}$	Microamperio
$\mu\text{A/m}^2$	Micramperio por metro cuadrado
$\mu\text{A/pie}^2$	Microamperio por pie cuadrado
$\rho$	Resistividad eléctrica
$\Omega$	Ohmio

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	II
ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	IV
NOMENCLATURA.....	V
INTRODUCCIÓN.....	1

### I CORROSIÓN Y PROTECCIÓN CATÓDICA DEL ACERO

EN EL HORMIGÓN.....	3
1.1. Mecanismos de Corrosión del acero en las estructuras de hormigón armado.....	4
1.2. Factores que aceleran los procesos de Corrosión de las armaduras.....	13
1.3. Identificación de ambientes corrosivos y del estado activo del acero de refuerzo.....	22
1.4. Criterios de Protección Catódica del acero en hormigón.....	33
1.4.1. Criterio de la Polarización Catódica transferida de por lo menos -100 mV.....	35
1.4.2. Criterio del Potencial instantáneo ON/OFF respecto	

al electrodo Cu/CuSO <sub>4</sub> de por lo menos -850 mV.....	36
1.4.3. Criterio de los -300 mV transferidos al potencial natural de la estructura.....	37
1.5. Cinética Electroquímica del acero en el Concreto.....	38
1.5.1. Pasividad del acero en el hormigón.....	38
1.5.2. Polarización Electroquímica.....	39
1.5.3. Curvas Experimentales de Polarización.....	41
1.6. Técnica de las Caídas de Voltaje en la evaluación de los Sistemas de Protección Catódica para estructuras de hormigón armado.....	43
<b>II. PARTE EXPERIMENTAL DEL ESTUDIO.....</b>	<b>45</b>
2.1. Metodología de la Experimentación.....	46
2.2. Fabricación de las Probetas de Hormigón.....	47
2.3. Determinación de las Propiedades del Hormigón.....	52
2.3.1. Resistencia Mecánica del hormigón.....	52
2.3.2. Porosidad y Densidad del hormigón.....	58
2.3.3. Contenido en Humedad del hormigón.....	64
2.4. Pruebas Químicas.....	66
2.4.1 Profundidad de Carbonatación.....	66
2.4.2 Contenido de Cloruros.....	69

2.5. Pruebas Electroquímicas.....	77
2.5.1 Polarización Catódica del acero en las probetas de hormigón, mediante ensayos ON/OFF.....	77
<b>III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>94</b>
3.1. Propiedades del Hormigón.....	95
3.2. Pruebas Químicas .....	101
3.3. Pruebas Electroquímicas.....	104
<b>IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	
<b>ANEXOS.....</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	

## INTRODUCCION

El concreto protege de una manera natural al acero contra la corrosión, por la creación de una capa pasivada de óxido de hierro sobre la superficie del acero. Esta capa se crea por el alto pH del medio que rodea al acero (cerca de 13 para el concreto elaborado con cemento Portland) y se mantiene estable mientras el pH no descienda a valores inferiores a 9,6 aproximadamente.

Sin embargo la película protectora del acero, formada por la alta alcalinidad desarrollada en el concreto puede romperse debido a la influencia de un medio agresivo, disminuyendo así la vida útil de las estructuras, y provocando la necesidad de gastos significativos para su reparación y protección anticorrosiva.

Los iones cloruros son la mayor causa de corrosión prematura del acero de refuerzo, éstos penetran al interior de la masa del concreto debido a la porosidad de la misma, pues el concreto es un material poroso por naturaleza.

La continua exposición de numerosas estructuras marinas en agua salada produce corrosión, y cuando el contenido de cloruros excede cierto límite el acero empieza a corroerse.

En el presente proyecto vamos a utilizar un Sistema de Protección Catódica por Corrientes Impresas para Polarizar el Acero hasta llegar a potenciales de protección , y posteriormente determinar la incidencia de la protección Catódica sobre la resistencia mecánica de los hormigones.

Se realizarán pruebas complementarias en los dos tipos de hormigón como: determinación de la resistencia mecánica , porosidad y permeabilidad , potenciales de corrosión y de polarización , cantidad de cloruros , y las caídas de voltaje que son de nuestro interés para conocer la respuesta de los hormigones ante la corriente de polarización catódica.

***CAPITULO I***

***CORROSIÓN Y PROTECCION CATÓDICA DEL  
ACERO EN EL HORMIGÓN***

## I. CORROSIÓN Y PROTECCIÓN CATÓDICA DEL ACERO EN EL HORMIGÓN.

### 1.1. Mecanismos de Corrosión del Acero en las estructuras de Hormigón Armado.

El acero está protegido contra la corrosión por la pasivación. La razón para esta pasivación es la alta alcalinidad desarrollada en el hormigón, producto de la hidratación del cemento, ya que el agua de los poros alcanza valores de  $\text{pH} > 12.5$ . En tales condiciones, se forma sobre la superficie del acero una capa microscópica de óxido llamada pasiva.

Esta capa pasiva impide la disolución del hierro. De esta manera se imposibilita la corrosión de las armaduras, incluso cumpliéndose el resto de las condiciones necesarias para la corrosión (sobre todo, la presencia de humedad y oxígeno).

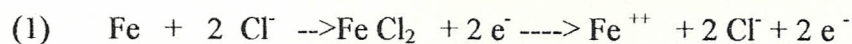
La capa pasiva puede destruirse localmente o en toda la superficie debido a la carbonatación o a la acción de los iones cloruro en la interface acero-concreto. Una tercera posibilidad es la reducción de la alcalinidad debido a la lixiviación de los álcalis a causa de corrientes de agua. En la práctica, esto puede ocurrir en los puntos débiles de la estructura (por ejemplo, escapes de las juntas de construcción o anchos de fisura elevados) en combinación con hormigón de mala calidad.

La película pasiva, y por tanto la protección contra la corrosión, se pierde si el valor de pH desciende por debajo de 9 en la zona en contacto con las armaduras, o si el contenido en cloruros supera el valor crítico.

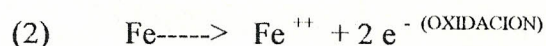
Como consecuencia de ello, es posible la corrosión de las armaduras si hay suficiente disponibilidad de oxígeno y humedad. Esta situación puede considerarse representativa de estructuras terrestres en condiciones normales de exposición. Los comportamientos descritos de pasivación y despasivación pueden ocurrir tanto en armaduras pasivas como en activas.

En la presencia de iones cloruro, oxígeno y agua en el hormigón, las reacciones anódica y catódica son las siguientes:

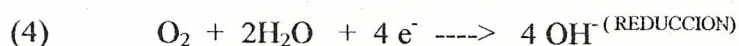
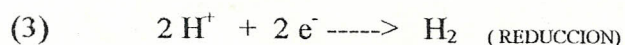
(a) Reacción Anódica:



la reacción neta de la ecuación 1 se expresa como:



(b) Reacción Catódica.



La posible reacción catódica depende de la disponibilidad de oxígeno y del pH cercano a la superficie del acero. En general, la reducción de oxígeno es la principal reacción catódica en concreto debido al alto pH

del concreto y a que el oxígeno está termodinámicamente más lejos de poder aceptar electrones que el ión hidrógeno.

El oxígeno en los poros reacciona con los iones que llegan del ánodo y causa una reducción de oxígeno en presencia de agua. Cuando se consideran las reacciones en ambos, ánodo y cátodo, los primeros factores que controlan la corrosión del acero en el concreto son:

- disponibilidad de oxígeno
- disponibilidad de los poros o la penetración del agua
- el grado de despasivación del acero por causa de los iones cloruros.

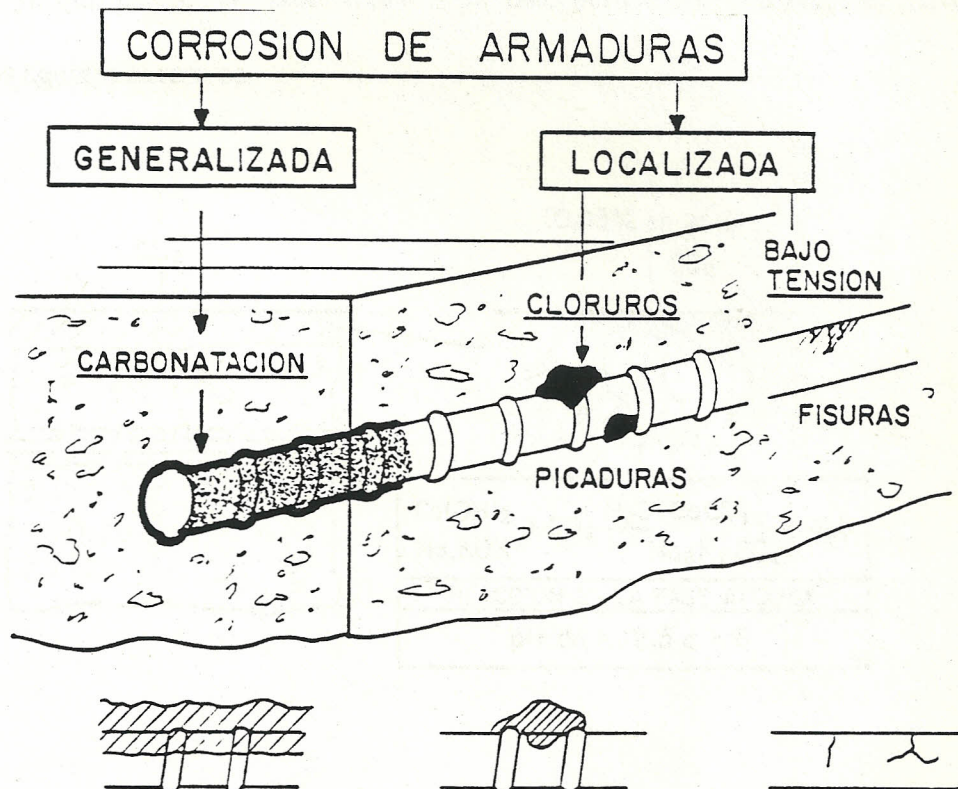


Figura 1.1 Tipos de corrosión de armaduras y factores que lo provocan

### A. Carbonatación de la Capa Protectora del Acero en el Hormigón.

La disminución de la alcalinidad de la capa protectora está asociada muchas veces a la acción del bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), este agente agresivo del aire puede penetrar a través de los poros del hormigón hacia su interior y reaccionar con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , provocando la disminución de éste en la fase líquida y por ende el pH que alcanza valores de 9.4.



esta acción continuada sobre las *armaduras* hace que la estabilidad de la capa pasiva peligre y en el momento que la capa carbonada llegue al acero, este se encuentra indefenso, ya que esta capa carbonatada es porosa, permitiendo entonces el mayor paso de los agentes agresivos.

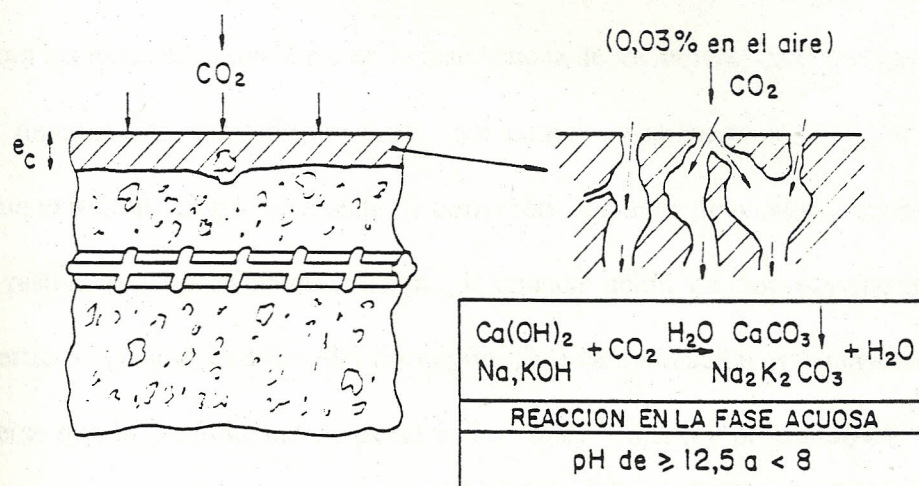


Figura 1.2 Carbonatación del recubrimiento de Hormigón .

## B. Penetración de Cloruros en el Hormigón.

Además del  $\text{CO}_2$ , los iones cloruro (procedentes del agua de mar) pueden penetrar a través de los poros hacia el interior del hormigón. En este caso, a diferencia del anterior, el proceso de difusión de cloruros puede ocurrir con los poros total o parcialmente llenos de agua.

Los iones cloruros son la mayor causa de corrosión prematura del acero de refuerzo, rompiendo la película protectora formada por la alta alcalinidad.

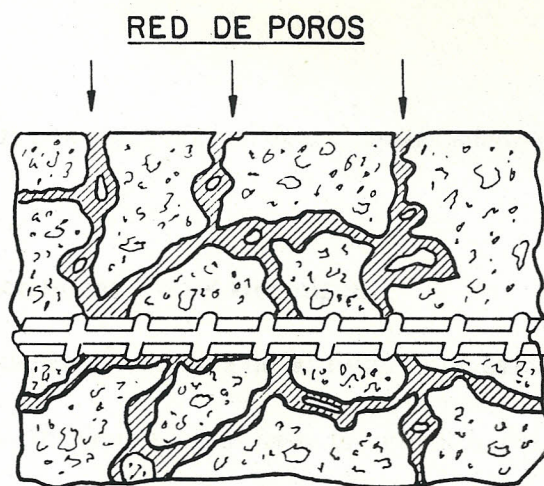
El cemento posee cierta capacidad física y química de combinarse con los iones cloruro dependiendo de la concentración de éstos en la fase acuosa de los poros. Sin embargo no todos los cloruros se pueden combinar. Por el contrario, siempre existe un equilibrio de disolución entre los cloruros combinados y los iones cloruro libres de dicha fase acuosa. A los efectos de la corrosión de las armaduras, sólo importan los iones cloruros libres en la fase acuosa de los poros y por consiguiente, el riesgo de corrosión causado por éstos, aumenta considerablemente. El valor crítico para que exista un peligro incipiente de corrosión, depende de muchas variables.

Como resultado del proceso de difusión, la concentración de cloruros decrece desde la superficie hacia el interior del hormigón. En una estimación aproximada, puede suponerse que la profundidad de penetración sigue una ley proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. Sin embargo, cálculos más precisos y observaciones basadas en la experiencia práctica muestran que la velocidad de penetración es menor.

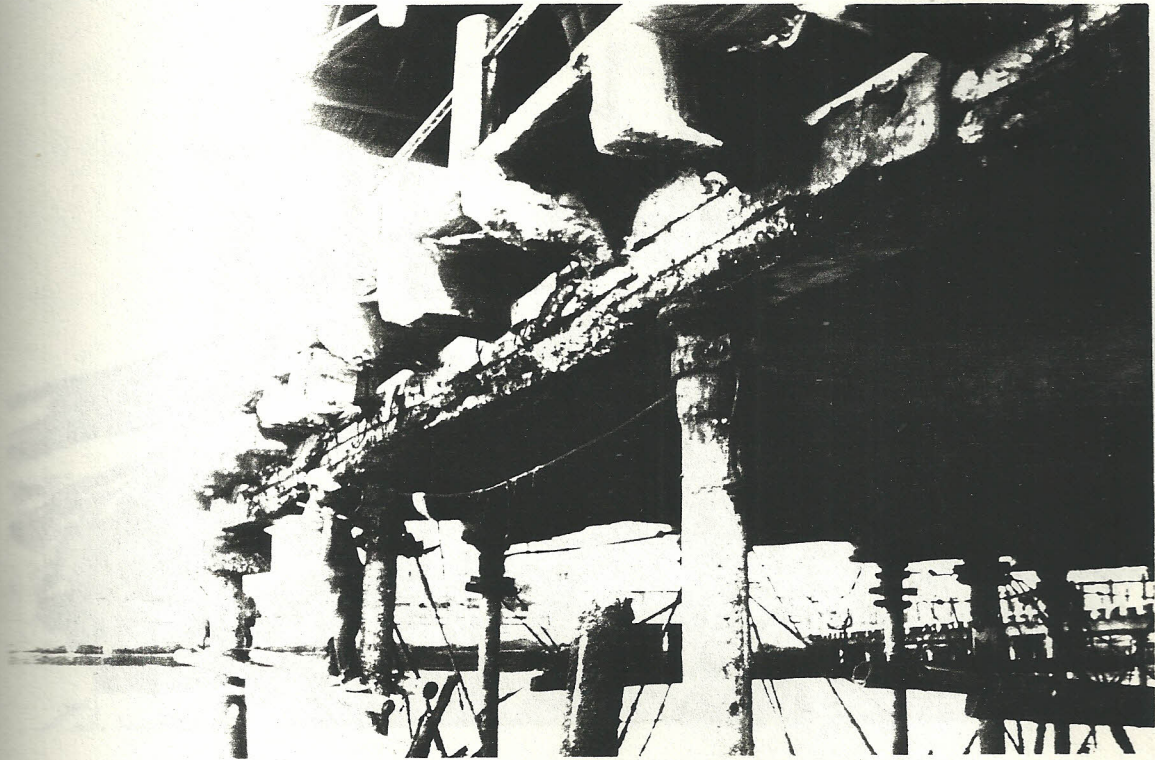
La razón principal para este hecho es el cambio en la distribución del tamaño de poro con el tiempo, lo cual responde a la continua evolución del proceso de hidratación.

Los ciclos de humectación y de secación de la superficie del hormigón con agua conteniendo cloruros producen un aumento de éstos en la capa superficial. Al principio del periodo de humectación una cantidad relativamente elevada de agua conteniendo cloruros penetra en el hormigón por succión capilar.

Durante el periodo de secado, el agua se evapora y los cloruros permanecen en el hormigón. Este proceso puede causar un elevado aumento en los cloruros en la zona de secado y humectación del hormigón. Por lo tanto, con respecto a la penetración de cloruros en el hormigón, los factores principales son la profundidad de penetración de agua en el hormigón y la permeabilidad de la capa superficial, todo ello en relación con el espesor del recubrimiento del hormigón.



**Figura 1.3** Visualización de la red de poros del hormigón



**Figura 1.4** Muestra de una viga principal de un muelle dañado por corrosión .

### **C. Presencia de Agrietamientos en el Hormigón.**

La despasivación puede darse en el área de las fisuras atravesada por la armadura.

El  $\text{CO}_2$  y los cloruros pueden penetrar hasta la superficie del acero , a través de las fisuras , varios órdenes de magnitud más de prisa que a través del hormigón no fisurado . El tiempo necesario para la despasivación depende de la anchura de las fisuras ( ver figura ) sin embargo , los tiempos en cuestión son despreciables comparados con la vida útil de las estructuras de hormigón armado .

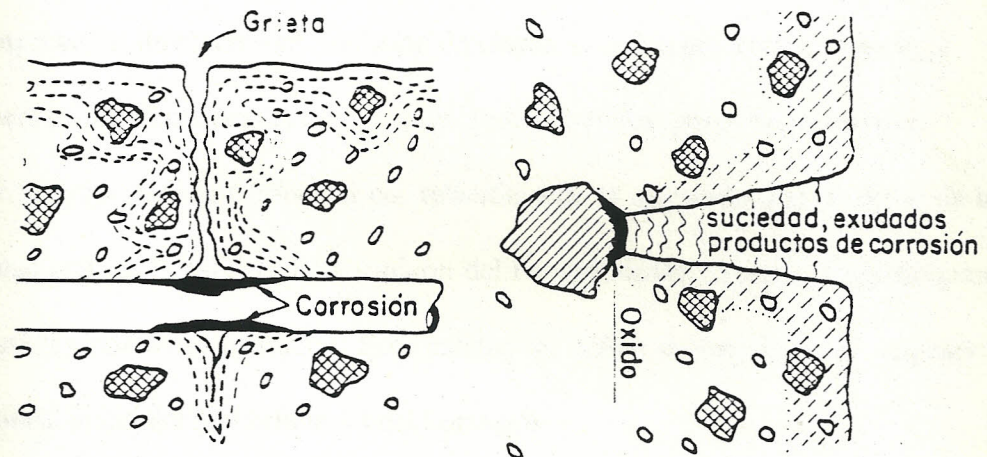


**Figura 1.5** Muestra de una viga secundaria completamente corroída.

En las fisuras tanto la carbonatación como los cloruros tienden a penetrar más de prisa hacia las armaduras que en el hormigón no fisurado .

Cuando el ancho de las fisuras medido en la superficie del hormigón es menor de 0,4 mm, es frecuente observar que se produce un proceso de autocicatrización , como consecuencia de los depósitos cálcicos, de suciedad y de productos derivados de la corrosión . En este caso , es probable que si se reinicia el proceso corrosivo acabe deteniéndose o reduciéndose de forma significativa . Si el ancho de las fisuras no excede los 0,4 mm tiene menor importancia.

Medidas de corrientes de corrosión indican que normalmente una corrosión por macro-pilas ocurre de forma que el acero expuesto en la región de fisura actúa anódicamente, mientras que el proceso catódico tiene lugar en áreas no fisuradas, situadas al lado de las fisuras. Debido a este proceso de macro-pila, es obvio que los anchos de fisuras son de menos importancia después de la despasivación, dado que el proceso catódico es el principal factor determinante de la velocidad de corrosión.



**Figura 1.6** Corrosión en fisuras transversales y longitudinales

Las fisuras transversales a las armaduras son menos perjudiciales que las longitudinales. Esto se debe a que, en las fisuras transversales, la corrosión queda confinada en pequeñas áreas superficiales, por lo que el riesgo de desprendimiento del hormigón no existe. Las fisuras que atraviesan las armaduras pueden ser muy perjudiciales si las superficies horizontales del hormigón están directamente afectadas por agua que contenga cloruros. En estos casos deben tomarse medidas

de protección especiales , como por ejemplo el sellado o revestimiento del hormigón o la armadura . La limitación de los anchos de las fisuras no reduce el riesgo de corrosión en tales casos .

## **1.2. Factores que aceleran los Procesos de corrosión de las Armaduras.**

Todos los procesos que afectan a la corrosión de las armaduras están más o menos controlados por procesos de difusión :

**Carbonatación:** difusión del  $\text{CO}_2$  en los poros llenos de aire

**Penetración de cloruros:** difusión de cloruros en los poros llenos de agua

**Corrosión de las armaduras:** difusión de  $\text{O}_2$  en los poros llenos de aire.

Por lo tanto el factor principal en relación con la corrosión y protección de las armaduras es la calidad del hormigón del recubrimiento , tanto para hormigones fisurados como no fisurados. Esta calidad se define en términos de espesor y permeabilidad del recubrimiento del hormigón.

### **1. Permeabilidad del recubrimiento.**

#### **A .- Influencia de la relación agua / cemento ( a / c )**

La relación agua /cemento ( a/c) influye de un modo decisivo sobre la permeabilidad del hormigón . Cuando la relación a/c excede le valor 0.6 , la permeabilidad aumenta considerablemente debido al incremento en la porosidad capilar . La figura nos muestra la dependencia de la permeabilidad respecto a la relación a/c y al grado de hidratación .

### B. - Influencia del curado.

La permeabilidad de la capa superficial del hormigón puede verse considerablemente afectada por causa de un insuficiente curado (secado prematuro de la superficie del hormigón). La profundidad de la capa afectada depende del grado de secado; sin embargo, muy frecuentemente el espesor de dicha capa es igual o mayor al del recubrimiento de hormigón. El viento y las altas temperaturas tienen una significativa influencia en el secado prematuro de la superficie del hormigón.

Las medidas de curado posteriores al primer secado del hormigón son inútiles, porque el endurecimiento difícilmente continúa una vez que ha sido interrumpido. Por lo tanto, las medidas de curado deben comenzar inmediatamente después del hormigonado y no deben ser interrumpidas.

La sensibilidad al curado aumenta al aumentar la relación agua/cemento y al disminuir el contenido de cemento.

### C. - Influencia de la compactación.

La compactación deficiente tiende a elevar la permeabilidad del hormigón, hasta el punto de que la protección de las armaduras deja de existir.

### 2. Espesor de recubrimiento.

La carbonatación y los cloruros penetran hacia el interior del hormigón a una velocidad que sigue una ley función de la raíz cuadrada del tiempo. Esto significa que, si el recubrimiento de hormigón se reduce a la mitad, la

condición crítica para un incipiente riesgo de corrosión se alcanza en la cuarta parte del tiempo.

### **3. El contenido de Cemento.**

Al incrementar el contenido de cemento, la capacidad de fijación del hormigón frente al  $\text{CO}_2$  aumenta. Sin embargo, dentro de un rango normal de contenido de cemento, la velocidad de penetración de carbonatos y cloruros está considerablemente menos influida por el contenido de cemento que por la relación agua/cemento y por las calidades de la compactación y el curado. De cualquier modo, la cantidad de cemento es importante por lo que se requiere a la trabajabilidad y, hasta cierto punto, a la sensibilidad al curado.

Normalmente un contenido de cemento en torno a  $300 \text{ Kg/m}^3$  es suficiente para conseguir una permeabilidad suficientemente baja y, de este modo, una durabilidad suficiente, si la relación a/c se mantiene por debajo de  $0,6 \dots 0,5$ , dependiendo de las condiciones ambientales (con o sin cloruros) y si se utiliza un curado adecuado.

Un medio para asegurar una calidad suficiente de hormigón es la especificación de resistencias mínimas relativamente altas, diferenciadas de acuerdo con las condiciones ambientales.

En cuanto al tipo de cemento, los cementos conteniendo puzolanas naturales, escorias de alto horno o cenizas volantes, tienen como características producir un desarrollo lento de resistencia durante las primeras edades, y un posterior

desarrollo de resistencia (post-endurecimiento). Estos iones indican que estos tipos de cemento son más sensibles al curado que el cemento Portland.

Si se asegura el post-endurecimiento mediante un adecuado curado, se puede alcanzar una mayor impermeabilidad en los hormigones hechos con cementos con adiciones que la obtenida en análogas condiciones con cementos Portland. En consecuencia la resistencia frente a la penetración de cloruros se mejora en gran medida.

Cualquiera que sea el tipo de cemento, un curado inadecuado puede conducir a una pobre calidad del hormigón del recubrimiento (permeabilidad, capacidad de fijación).

#### **4. Disponibilidad de Oxígeno en el Hormigón.**

La difusión de oxígeno es un factor limitante para la razón de corrosión cuando los alrededores del refuerzo dentro del concreto están saturados de agua y la mayor parte del oxígeno dentro del concreto y cerca de la superficie del refuerzo ha sido consumida por la reacción catódica del proceso de corrosión. Como consecuencia la razón de corrosión se ve influenciada por la difusión de oxígeno solamente a través del espesor de recubrimiento en estructuras que están sumergidas o expuestas por largo término o por aplicaciones cíclicas de agua lo cual causa la saturación del concreto por periodos de varias semanas.

Bajo la mayor parte de condiciones, la principal reacción catódica asociada con la corrosión del acero en el concreto es la reducción de oxígeno desde que la posible alternativa de descomposición del agua con evolución de hidrógeno

pueda ocurrir solamente en potenciales altamente negativos bajo aproximadamente los  $-940$  mV CSE. Esto puede producir picaduras en el acero, y éstas junto con la polarización catódica mediante la presencia de corrientes vagabundas.

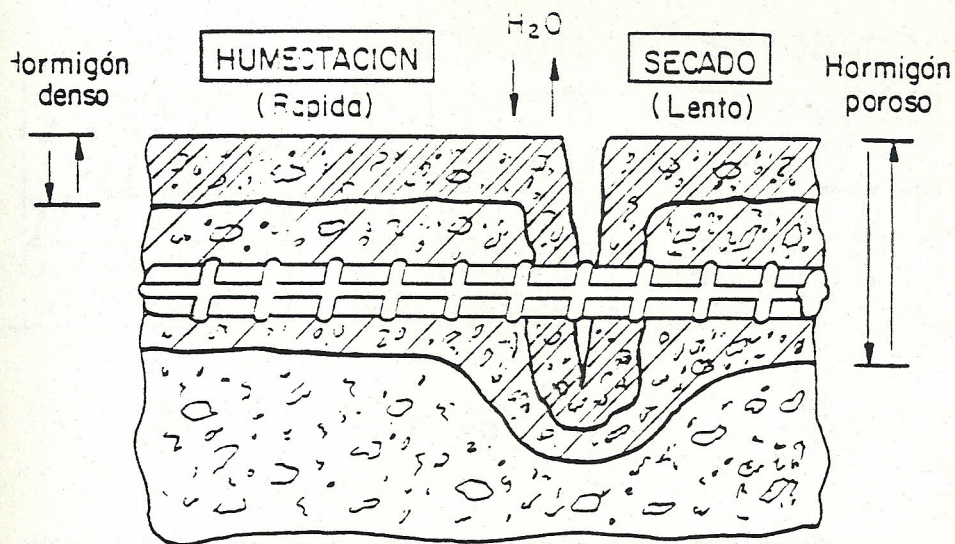
De acuerdo con el **ACI (Instituto Americano del Concreto)**, en ciertas condiciones de exposición, los niveles de cloruros pueden exceder los límites recomendados, sin causar corrosión. Tal es el caso del concreto que está continuamente sumergido en agua de mar, y por lo tanto está aislado del caso de la Zona de splash o zona de marea donde las concentraciones de oxígeno son altas. Esto explica porque el acero de refuerzo en áreas expuestas a altas concentraciones de cloruros presenta mínimos daños por corrosión.



**FiguraN° 1.7** Zona de Splash o zona de marea ( altas concentraciones de oxígeno)

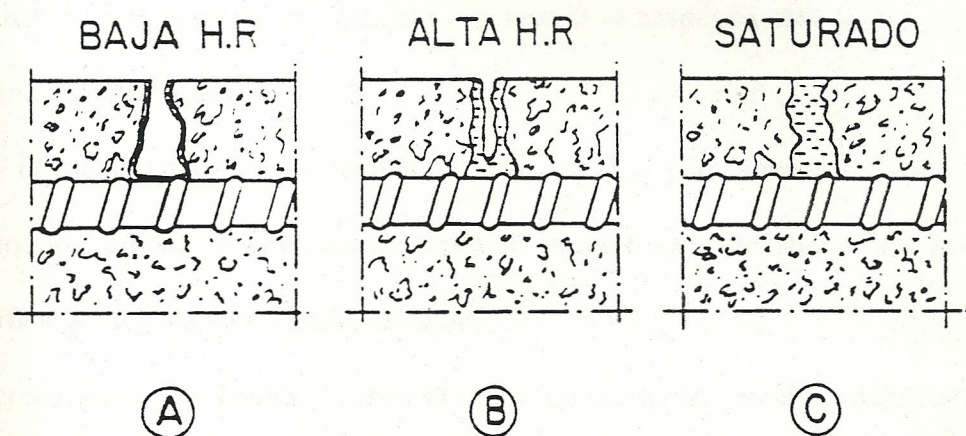
### 5. Contenido de Humedad en el Hormigón .

El hormigón es un material poroso por naturaleza, por lo tanto absorbe con facilidad la humedad ambiente , pero en cambio se seca lentamente. Cuando la humedad exterior es constante , se llega a establecer un equilibrio entre el contenido en humedad en el interior y la humedad relativa , HR, ambiental, pero cuando la humedad exterior oscila, el interior del hormigón no puede según los cambios a la misma velocidad, dando como resultado que sólo la capa exterior de la estructura es la que mantiene un equilibrio con la HR exterior ( ver figura 1. 8) , lo que ha llevado a decir que “ solo respira la piel del hormigón”. Esta circunstancia tiene diversas consecuencias que será necesario tener en cuenta a la hora de valorar el estado en que se encuentran unas armaduras situadas a una determinada profundidad.



**Figura 1.8.** Simplificación del fenómeno de intercambio de humedad entre el recubrimiento de hormigón y el medio ambiente.

El contenido en humedad es el factor que más influye en la velocidad de corrosión. Si los poros están saturados de humedad, como es el caso c) de la figura 1.9, entonces aunque la resistividad será la menor posible y por tanto la pila de corrosión estará muy facilitada, el oxígeno tendrá primero que disolverse en el agua para poder alcanzar la armadura. en estas condiciones se dice que el proceso "está controlado por el acceso de oxígeno", y las velocidades de corrosión no serán las más elevadas sino moderadas e incluso muy baja, como es el caso de las estructuras situadas en los mares a cierta profundidad. Cuando los poros contienen muy poca humedad, entonces la resistividad es muy elevada y el proceso de corrosión se encuentra muy dificultado. en este caso la velocidad de corrosión también será baja, aunque el hormigón se encuentre carbonatado y contaminado de cloruros.(figura 1.9 A)



**Figura 1.9** Contenido en Humedad de los poros de hormigón  
en función de la humedad ambiental

Las velocidades de corrosión máximas se dan en hormigones con contenidos de humedad altos, pero " sin saturar los poros ".

En este caso el oxígeno llega libremente hasta la armadura y la resistividad es lo suficientemente baja para permitir elevadas velocidades de corrosión ( figura 1.9 B )

#### **6. Condiciones Ambientales.**

En ambientes permanentemente secos (  $HR < 60\%$  ) el riesgo de corrosión es bajo, incluso si el hormigón está carbonatado , dado que el proceso de electrolítico está impedido. La corrosión es posible , caso que haya alto contenido en cloruros , incluso en ambientes secos debido a los efectos higroscópicos de los cloruros, que aumentan el contenido de agua del hormigón.

En hormigones permanentemente saturados de agua el riesgo de corrosión es bajo debido a la carencia de oxígeno , incluso si el hormigón está fuertemente contaminado por cloruros.

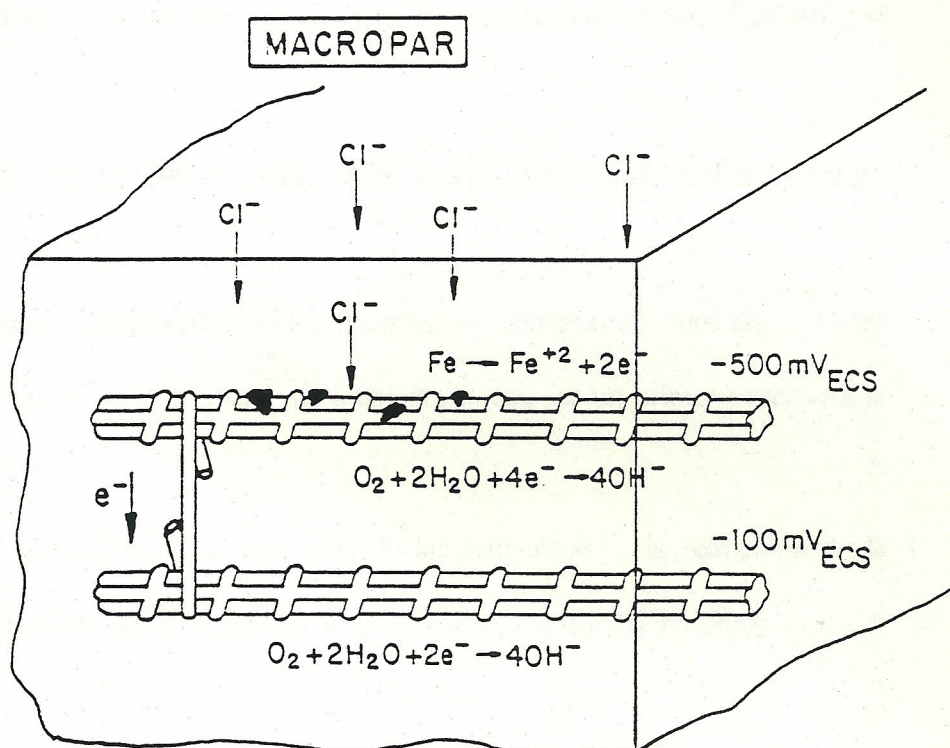
Si la estructura o elemento estructural está total o parcialmente saturada o sumergida , se debe tener en cuenta el posible riesgo de que distintas zonas de la superficie actúen anódica y catódicamente.

Las condiciones más favorables para la corrosión del acero en el hormigón son los ciclos de humedad -sequedad en combinación con altas temperaturas.

#### **7. Macropares Galvánicos.**

Otro de los factores acelerantes de la corrosión es la presencia de macropares galvánicos . Se llaman así a las pilas de corrosión que se pueden generar entre

dos áreas distanciadas un máximo de algunos decímetros , una de las cuales está corroída y actúa de ánodo y otra se mantiene pasiva y lo hace de cátodo. Un ejemplo se muestra en la figura 1.10 , en este ejemplo la macropila se forma a través del estribo entre la trama superior de la armadura atacada por los cloruros y la inferior que se mantiene pasiva.



**Figura 1.10** Funcionamiento esquemático de un macropar generado por corrosión de las armaduras superiores debido a la penetración de cloruros desde el exterior.

Cuando una situación como ésta se produce . A la corrosión propia de las micropilas ( generada por el ataque de cloruros) se suma la acción de la micropila, incrementando la velocidad de corrosión.

El incremento que se produzca depende de los potenciales de corrosión del ánodo y del cátodo en el momento de comenzar la acción de la macropila y de la resistencia óhmica entre ambos.

Cabe indicar que la corrosión se sustenta fundamentalmente por la acción de las macropilas, que ejercen su acción en un rango muy limitado de distancia, en el que es fundamental identificar la existencia de un electrolito entre el ánodo y el cátodo.

### **1.3. Identificación de Ambientes Corrosivos y del Estado Activo del Acero de refuerzo.**

Existen muchos mecanismos para identificar los ambientes corrosivos del acero en el concreto; una inspección visual del ambiente puede ser un primer paso para la examinación.

Son efectos derivados de la corrosión de las armaduras: la reducción de la sección transversal de la armadura y el desprendimiento del recubrimiento del hormigón.

La armadura al oxidarse, aumenta de volumen de forma significativa, teóricamente hasta más de seis veces, dependiendo de la disponibilidad de oxígeno. Esto provoca fuerzas expansivas que pueden causar fisuración y desprendimiento en el hormigón.

Este efecto de la corrosión de las armaduras puede llevar a roturas frágiles e imprevistas, si las fisuras longitudinales a lo largo de las armaduras se producen en la zona de anclaje de las mismas.



**Figura 1.11** Desprendimiento de la capa de hormigón en una losa.

En la corrosión que se desarrolla en ambientes con baja disponibilidad de oxígeno, el volumen de los productos de corrosión puede ser solamente hasta dos veces mayor que el volumen del acero. Tal proceso de corrosión se desarrolla a baja velocidad y, en circunstancias especiales, los productos de la corrosión pueden difundirse dentro de los huecos y poros del hormigón sin causar fisuración y desprendimiento. En estos casos singulares la corrosión de la armadura puede dar lugar a un fallo inesperado sin una manifestación exterior previa.

Dentro de los métodos de evaluación de un estado corrosivo, tenemos la medición del potencial eléctrico del acero y la medición de la resistividad eléctrica del hormigón.

### Medición de los Potenciales de Corrosión .

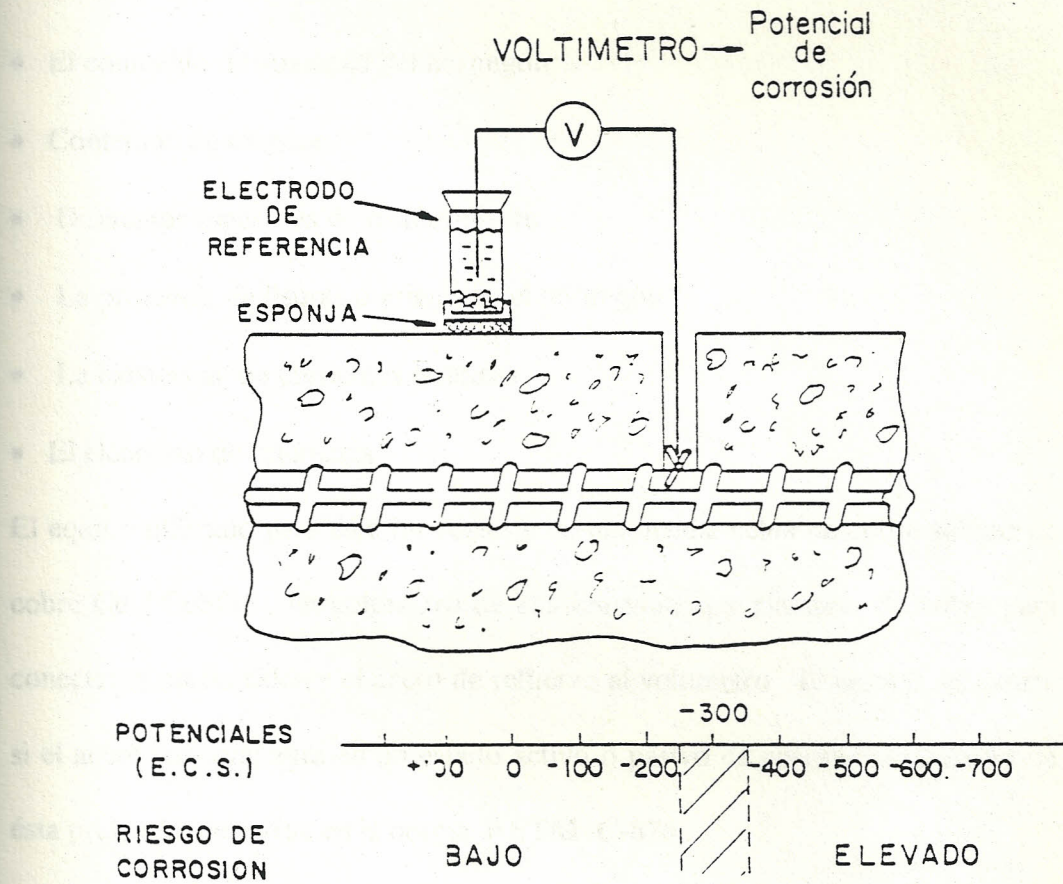
La medición del potencial del acero de refuerzo en una estructura de hormigón puede ser usado para determinar la localización de zonas activas de corrosión **pero no da** una información acerca de la razón con la cual la corrosión está ocurriendo .

Aporta indicaciones meramente cualitativas que se deben utilizar siempre como complemento de otro tipo de ensayos y nunca de forma aislada .

La medida consiste en la determinación de la diferencia de potencial eléctrico **entre el** acero de las armaduras y un electrodo de referencia que se coloca en contacto con la superficie del hormigón.

La adopción de un electrodo de referencia particular es equivalente a la elección arbitraria de un punto cero en la escala de potenciales . Como el potencial de corrosión es función de un gran número de variables ( contenido de humedad y oxígeno del hormigón , espesor de recubrimiento, etc. ) no se deben extraer conclusiones cauntitativas de su medida, ya que no da información sobre la cuantía de la corrosión, sino sólo sobre la probabilidad de que este proceso se esté produciendo o nó .

La medida de potencial de corrosión resulta imprescindible en la supervisión y posterior control de la corrosión de estructuras que van a ser o están sometidas a protección catódica.



**Figura 1.12** Esquema para la Medición de los potenciales naturales de corrosión

Medición de los potenciales de corrosión son un indicativo de la actividad corrosiva. Aquí un electrodo de cobre sulfato de cobre es usado para medir el potencial del acero de refuerzo en una probeta de hormigón armado.

Las principales circunstancias que pueden conducir a conclusiones erróneas en las medidas de potencial son:

- El contenido de humedad del hormigón
- Contenido de oxígeno
- Diferentes espesores de recubrimiento
- La presencia de fisuras o grietas en el hormigón
- La existencia de corrientes erráticas.
- El electrodo de referencia

El equipo utilizado para éste fin consiste de una media celda de cobre sulfato de cobre  $\text{Cu} / \text{CuSO}_4$  , un voltímetro de alta impedancia y alambres de cobre para conectar la media celda y el acero de refuerzo al voltímetro . El equipo determina si el acero se encuentra en un estado activo o pasivo de corrosión . Detalles de ésta prueba se muestran en la norma **ASTM C-876** .

Cambiando el electrodo de referencia , cambian también las lecturas relativas del potencial eléctrico . Mientras la celda de  $\text{Cu} / \text{CuSO}_4$  es la más común , otras pueden también ser utilizadas . El electrodo del Plata Cloruro de Plata  $\text{Ag} / \text{Ag Cl}$  en algunas veces es más utilizado por ser más estable sobre un extenso rango de temperatura , y porque en presencia de cloruros , el electrodo de cobre se pasiva .

La magnitud numérica del potencial de una media celda , usualmente indica la presencia o ausencia de corrosión de acero en un concreto , pero rara vez indica la razón exacta de la corrosión del acero .

La ASTM recomienda la interpretación de los potenciales de media celda , usando la Técnica de la Magnitud Numérica ( NMT ) , la Técnica de la Diferencia de Potencial , o ambos . Las Pruebas presentadas por la ASTM fueron realizadas por inmersión de probetas de hormigón en solución de cloruros . Las lecturas de potencial son referidas al electrodo Cu / CuSO<sub>4</sub> y este criterio no es válido para:

- Evaluar acero de refuerzo en concreto carbonatado
- Evaluar concreto que no haya sido frecuentemente humedecido
- Comparar la actividad corrosiva de un concreto donde la cantidad de oxígeno es altamente variable en el nivel del acero
- Dibujar conclusiones de la actividad corrosiva para una rehabilitación .

A continuación se presenta un cuadro que interpreta las lecturas hechas con la media celda de corrosión :

**TABLA I**

**INTERPRETACIÓN DE LOS POTENCIALES DE CORROSIÓN.**

<b>E<sub>corr</sub> ( V ) vs CuSO<sub>4</sub></b>	<b>Probabilidad de Corrosión</b>
> -0.20	< 5 %
< -0.20 pero > -0.35	alrededor del 50 %
< -0.35	> 95 %

### MEDICION DE LA RESISTIVIDAD ELECTRICA DEL HORMIGON.

La medición del potencial de acero de refuerzo en una estructura de hormigón puede ser usado para determinar la localización de zonas activas de corrosión, pero no da una información acerca de la razón con la cual la corrosión está ocurriendo.

Estudios hechos en hormigón contaminado con cloruros y hormigón carbonatado muestran que la resistividad eléctrica del hormigón es uno de los parámetros más significativos para el control de la razón de corrosión.

Las resistividades bajas en el concreto están relacionadas con altas razones de corrosión. Por lo tanto, las mediciones de resistividad hechas en conjunto con el mapeo de Potenciales pueden ser usadas para evaluar la severidad de riesgos de corrosión. La resistividad depende fundamentalmente de la humedad contenida en los poros del hormigón.

Las mediciones de resistividad indican la relativa habilidad de un medio para llevar corrientes eléctricas. Cuando una estructura metálica es inmersa en un medio conductivo, la disponibilidad del medio para llevar corrientes, podrá influir en la magnitud de corrientes galvánicas o de protección catódica. El grado de polarización del electrodo podrá afectar también el tamaño de dichas corrientes.

Esta variable puede determinarse por diversos medios, uno de los cuales es el de "los cuatro electrodos de Wenner" que se utiliza muy frecuentemente en el caso de suelos y que se muestra en la figura 1.13.

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot \frac{V}{I}, \text{ en } \Omega \times \text{m}$$

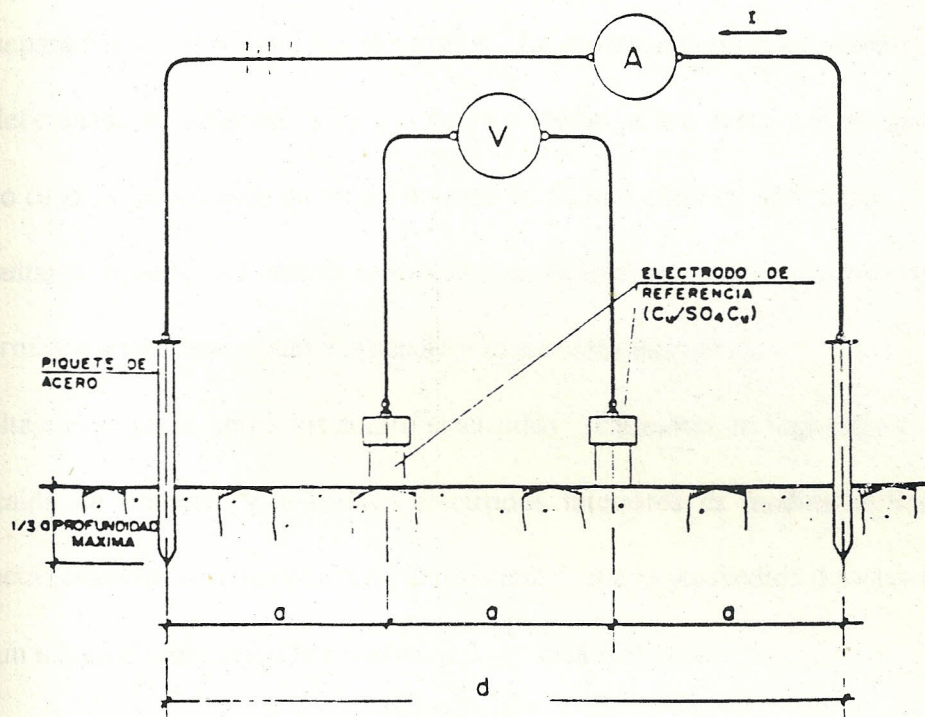


Figura 1. 13 . Esquema para la medición de la resistividad

### Norma ASTM G 57- 78 .

Este método nos permite determinar la resistividad eléctrica del hormigón y puede ser utilizado para evaluar la razón de corrosión de una estructura.

Utiliza cuatro electrodos metálicos separados por una igual distancia y ubicados en línea recta en la superficie del hormigón , y a una profundidad que no exceda el 5% de la separación mínima entre los electrodos . La separación entre los electrodos debe ser seleccionada de acuerdo a lo que se va a medir ya sea suelo u hormigón . Para nuestro caso se recomienda un espaciamiento de 50 mm entre los contactos .

La resultante resistividad medida representa la resistividad promedio de un hemisferio del hormigón en un radio igual a la separación entre los electrodos .

Un voltaje es impuesto entre los cuatro electrodos , causando un flujo de corriente  $I$  y la caída de voltaje  $V$  entre los electrodos interiores es medida utilizando un voltímetro sensible. Alternadamente , la resistencia puede ser medida directamente.

Para un material seminfinito la **resistividad**  $\rho$  está dada por:

$$\rho \text{ , } \Omega \cdot \text{cm} = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \text{ ( a en cm )}$$

$$= 191.5 a R \text{ ( a en pies )}$$

donde :

$a$  : es la separación entre los electrodos

$R$  : Resistencia en  $\Omega$

$\rho$  : resistividad eléctrica en (  $\Omega \cdot \text{cm}$  )

## LA CRITERIO DE VALORIZACION CATHODICA DEL ACERO EN

TABLA II

CUADRO DE RESISTIVIDADES ELECTRICAS ALCANZADAS POR UN HORMIGON.

Días	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Resistividad ( $\Omega \cdot cm$ )
0 a 10	0 a 200	0 a 20.000
10 a 20	50 a 250	50 a 25.000
20 a 30	100 a 400	10.000 a 40.000
30 a 40	150 a 600	15.000 a 60.000
40 a 50	180 a 700	18.000 a 70.000

TABLA III

CRITERIO DE VALORIZACION DE LA RESISTIVIDAD ELECTRICA

Resistividad ( $K \Omega \cdot cm$ )	Razón de Corrosión
< 5	muy alta
5 - 10	alta
10 - 20	moderadamente baja
> 20	baja

#### 1.4. CRITERIOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA DEL ACERO EN HORMIGÓN.

La *Protección Catódica* de una estructura consiste en situar al acero en la zona de los diagramas de Pourbaix . Ello se consigue aplicándole corriente y haciendo actuar a toda la armadura de cátodo . Se aplica mediante el empleo de los llamados <ánodos de sacrificio> (figura 1.14 A) o bien mediante el método llamado de <corriente impresa > (figura 1.14 B).

Es el único método capaz de parar una corrosión ya iniciada. Puede aplicarse sobre cualquier estructura que cumpla determinadas condiciones , como que sus armaduras tengan continuidad eléctrica . Tiene como inconvenientes que necesita un mantenimiento continuo y un personal muy calificado. Todavía no se conocen sus efectos a largo plazo sobre el hormigón , ya que la experiencia existente es relativamente breve.

La Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión ( NACE) señala la complejidad en la aplicación de un cierto criterio a la hora de proteger catódicamente una estructura en esta forma: “ Ningún criterio para evaluar la eficiencia de la protección catódica ha sido provisto satisfactoriamente para todas las condiciones. Una combinación de criterios es necesaria para una estructura singular ”.

En la selección de un criterio , un completo entendimiento de su significado es necesario. Conocer sus restricciones y limitaciones es también importante.

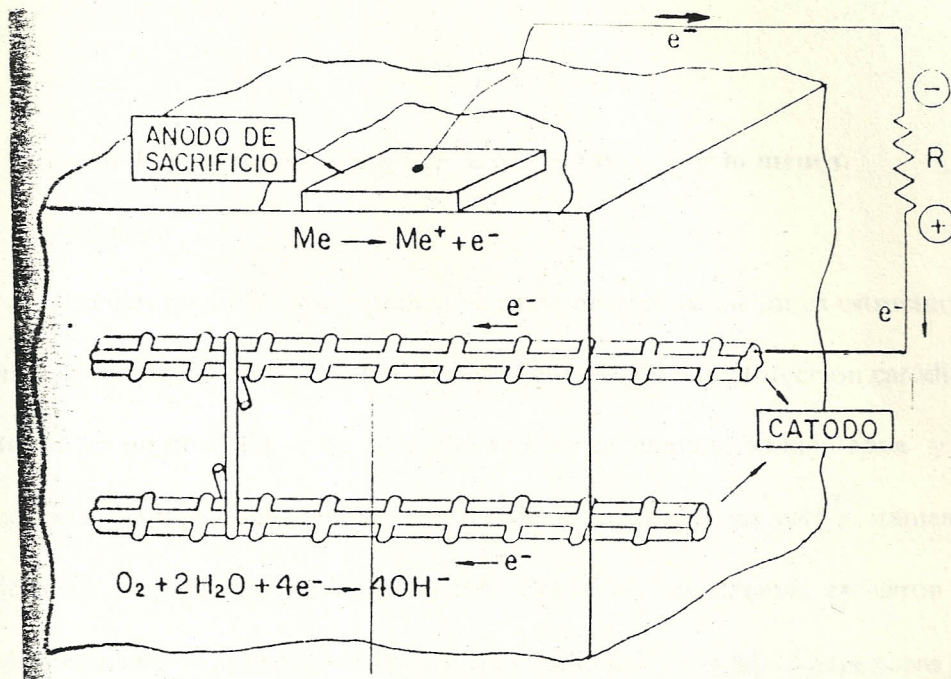


Figura 1.14 A Sistema de Protección catódica mediante "ánodos de sacrificio"

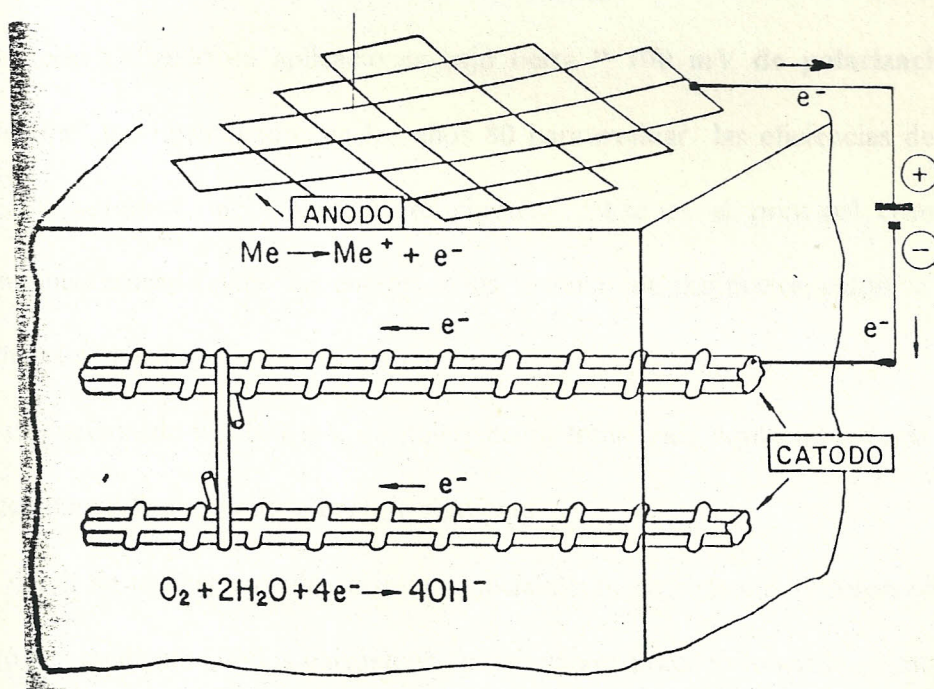


Figura 1.14 B Sistema de protección catódica por "corrientes impresas".

#### 1.4.1. Criterio de Protección Catódica transferida de por lo menos

- 100 mV.

Muchos sistemas de protección catódica han sido instalados en varias estructuras de concreto reforzado en los Estados Unidos desde 1973. La protección catódica bajo tierra es un poco diferente a la que se hace en estructuras bajo agua y el criterio para mantener un efectivo control de la corrosión no está claramente establecido. Los ingenieros de protección Catódica inicialmente aplicaron el criterio dominante en aplicaciones bajo tierra (  $-0.85 \text{ mV} / \text{Cu SO}_4$  ) para acero de refuerzo en concreto. Sin embargo este criterio requiere una considerable cantidad de corriente. Como resultado en 1983 se propuso establecer un criterio de protección catódica en base a las pruebas " E Log I " .

Otro criterio utilizado en aplicaciones bajo tierra " **100 mV de polarización transferida**" fue introducido en los años 80 para evaluar las eficiencias de la protección catódica del concreto reforzado. Ese es el principal criterio corrientemente usado para dar energía a los sistemas de protección catódica en estructuras de hormigón armado.

En la evaluación de los 100 mV de polarización transferida como un criterio de protección catódica, se puede decir lo siguiente :

1. Es difícil de utilizar cuando se trata especialmente de sistemas de protección catódica mediante ánodos galvánicos, ya que no es práctico tomar la medición del potencial instantáneo off, y en sistemas por corriente impresas con múltiples rectificadores es difícil encenderlos todos simultáneamente.

2. Se requiere un buen tiempo para la formación de la película de polarización y por ende la polarización decae.
3. Elimina el problema de considerar las caídas de voltaje
4. No es apropiado para usar en áreas donde existan corrientes parásitas.

#### **1.4.2. Criterio del potencial Instantáneo ON/OFF respecto al electrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub> de por lo menos - 850 mV.**

Este criterio es uno de los más utilizados a la hora de proteger catódicamente una estructura. Consiste en inyectar corriente al acero y estabilizar la densidad de corriente hasta lograr un potencial de protección igual o cercano a -850 mV.

Las lecturas de potencial pueden ser tomadas con aplicación de corriente y además no se necesita comparar lecturas existentes de potencial, con lecturas antes de que la protección sea aplicada.

Sin embargo este criterio es aplicable a estructuras de hormigón siempre que se encuentren sumergidas. Para acero embebido en hormigón el criterio de los -850 mV no es aplicable. Para un hormigón probablemente saturado en humedad es fácil obtener densidades de corriente tan bajas como  $25 \mu \text{ A/pies}^2$

Para puentes, donde el hormigón está comparativamente húmedo y el oxígeno es abundante, con el criterio de los -850 milivoltios pueden obtenerse densidades de corriente en un máximo de  $3 \text{ mA/pies}^2$

#### **1.4.3 Criterio de los - 300 mV transferidos al potencial natural de la estructura.**

Probablemente sea el segundo criterio de protección del acero en el concreto .

Este criterio me indica que en la estructura debe darse un cambio negativo en el voltaje de por lo menos 300 milivoltios, medición realizada entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia saturado de cobre/ sulfato de cobre en contacto con el electrolito.

Este criterio de transferencia de voltaje se aplica a estructuras que no están en contacto con metales diferentes . Además de las caídas de voltaje , los límites entre la estructura y el electrolito serán considerados.

Su aplicación más frecuente está orientada a tuberías, donde el cambio inmediato después de la energización consiste en las caídas de voltaje entre el suelo y la estructura.

Los resultados que se han obtenido son los más difíciles de evaluar y frecuentemente requiere considerable criterio y experiencia porque es necesario comparar lecturas tomadas después de la protección con lecturas tomadas antes de la protección .

## 1.5.- Cinética Electroquímica del Acero en el Hormigón.

### 1.5.1 Pasividad del Acero en el Hormigón .

Al tener lugar la corrosión en medio acuoso, se pueden originar iones en disolución, los cuales pueden participar en reacciones de equilibrio con otros del medio, incluidos los del agua. De este modo, la reacción de corrosión depende de una serie de reacciones en las que intervienen, directa o indirectamente, los iones del agua, es decir, depende del pH del medio. Como el potencial del proceso de corrosión depende de estos equilibrios, se puede establecer una relación en términos de pH, los cuales se representan gráficamente en diagramas E-pH, conocidos como diagramas de Pourbaix.

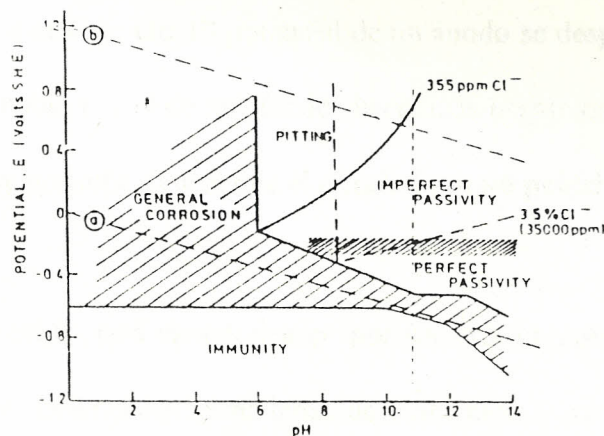


Figura 1.15 Diagrama de Pourbaix.

Los diagramas de Pourbaix establecen para cada metal las condiciones de pH y de potencial en las que el metal se corroe, se pasiva o permanece inmune. En la figura 1.15 se muestra el diagrama de Pourbaix para el Fe a 25 °C. El estado definido como de < pasividad > y que por fortuna presenta diversos metales, supone que el metal se recubre de una capa de óxidos, transparente, imperceptible y que actúa de barrera impidiendo la posterior oxidación. El metal posee la apariencia de mantenerse inalterado. En cambio, el estado de < inmunidad > supone que el metal no se corroe al no darse las condiciones termodinámicas para ello. Es el estado en el que se sitúan los metales sometidos a protección catódica.

#### 1.5.2. Polarización Electroquímica .

Se conoce como Polarización a la variación del potencial de un electrodo debido al paso de corriente , a consecuencia de efectos tales como transferencia de carga , transporte , reacción química , etc. El potencial de un ánodo se desplaza hacia valores más positivos ( más noble ) y el de un cátodo hacia más negativos ( más activo ) si esta variación es muy pequeña se dice que el electrodo es **no polarizable**.

El equilibrio de una celda está caracterizado por ser éste un potencial reversible el cual depende de los potenciales estándares de reducción y oxidación , de las concentraciones de los elementos participantes en la reacción ( por ejemplo OH<sup>-</sup>, iones Fe<sup>2+</sup>, etc. ) y de la temperatura.

Cuando una corriente fluye a través de una media celda , hay un cambio en la medida del potencial de un electrodo . Este cambio en el potencial es llamado **Polarización**.

Para una corriente dada , la polarización es alta , cuando las reacciones son irreversibles . La reacción de reducción del oxígeno es una reacción irreversibles , y puede tener un grado relativamente alto de polarización.

Hay tres tipos de polarización , los cuales son aplicados a un ánodo o a un cátodo.

Esas tres clases de polarización pueden ser aplicadas simultáneamente .

**a.) Polarización por Concentración** , ocurre cuando la concentración de el electrolito cambia en la vecindad del electrodo. Un ejemplo de esto podría ser el consumo de oxígeno en el cátodo.

**b.) Polarización Ohmica** ocurre debido a la resistencia óhmica del electrolito .

( ejemplo mezcla de hormigón ) y de muchas películas en la superficie del electrodo.. Esto produce una caída de potencial óhmico de acuerdo con la ley de Ohm.

**c.) Polarización por activación** ocurre debido a la cinética del proceso de corrosión del acero en el concreto , la cual es controlada por la naturaleza de los poros , agua , pH y varias concentraciones iónicas.

### 1.5.3 Curvas Experimentales de Polarización .

Cuando cambiamos de una condición de no-corrosión a una condición de corrosión , dos reacciones electroquímicas co-existentes en el ánodo y cátodo ocurren hasta que la razón de reducción es igual a la razón de oxidación . Stern y Geary notaron que en ningún proceso actual , ambos oxidación y reducción proceden en diferentes razones.

La diferencia en la razón de las reacciones es controlada por la polarización anódica y catódica de las reacciones parciales , la resistividad del electrolito, y la película en la superficie del metal.

La siguiente figura nos ilustra el control de la polarización anódico, catódico y mixto

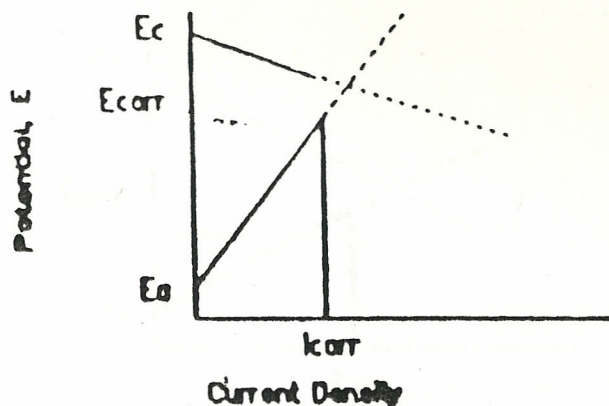


Figura 1.16 Control Anódico

El potencial de corrosión está muy lejos del potencial reversible de el ánodo , pero cerca del potencial reversible de el cátodo.

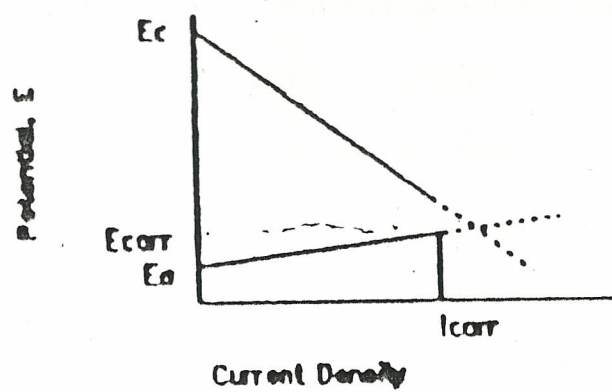


Figura 1.17 Control Catódico.

El potencial de corrosión está muy lejos del potencial reversible de el cátodo , pero cerca del potencial reversible del ánodo.

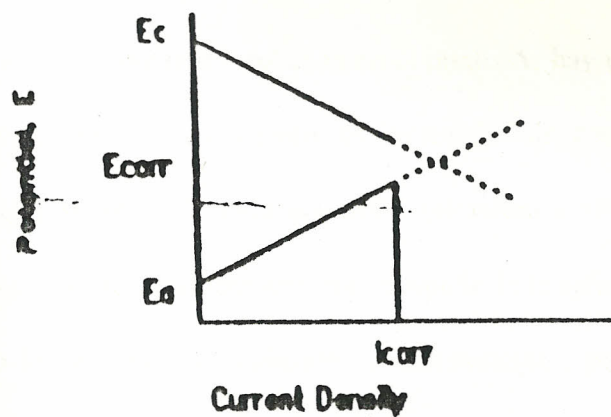


Figura 1.18 Control mixto

El potencial de corrosión está menos lejos del potencial reversible pero cerca de ambos : ánodo y cátodo.

### 1.6. Técnica de las Caídas de Voltaje en la Evaluación de los Sistemas de Protección Catódica para estructuras de Hormigón Armado.

La Protección Catódica cuando es aplicada correctamente produce un cambio en el potencial de la estructura con respecto a un electrodo de referencia colocado en el hormigón en proximidad a la armadura.

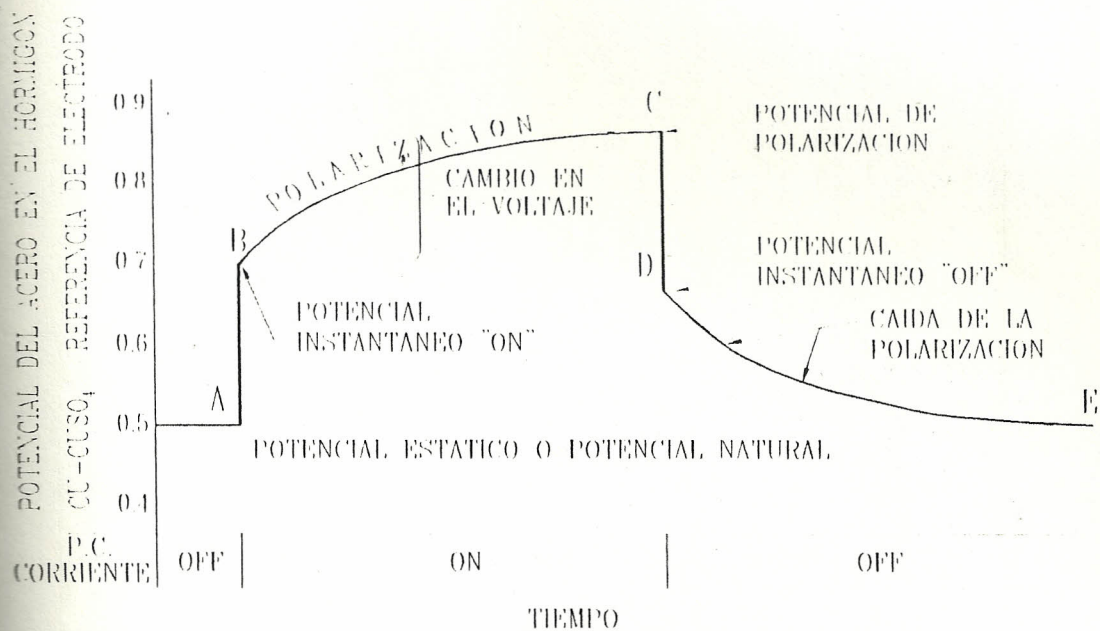
La corriente de protección catódica hace que el potencial medido sea más negativo que el "potencial natural" antes de que la corriente sea aplicada y la cantidad en el cambio es una medida de la efectividad de la protección catódica.

Existen dos cambios básicos en el potencial, los cuales deben ser considerados. Uno cuando la protección es aplicada y otro cuando la corriente es interrumpida al apagar el rectificador como se muestra en el gráfico Potencial vs. tiempo en la **figura 1.19**

Cuando la corriente es aplicada en el punto **A**, hay un cambio en el potencial y el instante en que la corriente es inyectada se representa por la línea **A-B**. El potencial en **B** es llamado potencial instantáneo " $E_{ON}$ " y es el potencial que alcanza el acero, instantáneamente después de la aplicación de la corriente.

Como la corriente es aplicada continuamente, por un periodo de tiempo, el potencial continúa incrementándose negativamente, hasta llegar al potencial de protección catódica.

Este cambio se llama "**Polarización Catódica**" y se representa en la figura por la línea **B-C**.



**Figura 1.19** Potencial del acero en hormigón vs. Tiempo de polarización durante la protección catódica.

La Polarización de una estructura es un fenómeno que ocurre sobre un largo periodo de tiempo y una estructura no puede estar enteramente polarizada ni siquiera después de que el sistema de protección catódica ha estado en continua operación por varios meses.

Si la corriente de protección catódica es interrumpida, después de que la estructura ha estado polarizada, el potencial cae negativamente, lo cual se representa en el gráfico por la línea C-D. Esto puede observarse en el potencial instantáneo " $E_{OFF}$ " en el punto D el cual es más negativo que el potencial natural del acero, pero en ese punto el potencial comienza a decaer o a desplazarse hacia el potencial natural en el punto E.

## ***CAPITULO II***

### ***PARTE EXPERIMENTAL DEL ESTUDIO***

## II. PARTE EXPERIMENTAL DEL ESTUDIO.

### 2.1 Metodología de la Experimentación.

El presente estudio está orientado a evaluar el comportamiento del acero en dos tipos de hormigón : uno de baja y otro de alta resistencia mecánica , ante la presencia de una corriente catódica.

Esto lo haremos utilizando un Sistema de Protección Catódica por Corrientes Impresas para polarizar el acero hasta llegar a potenciales de protección y posteriormente determinaremos la incidencia de la Polarización Catódica sobre la resistencia mecánica de los hormigones.

Las probetas de hormigón armado estarán expuestas a un ambiente agresivo ( agua salada ) , simulando la presencia de un pilote en agua de mar.

Algunas serán sometidas a pruebas de polarización y otras no. El tiempo de permanencia de éstas en la tina de agua salada será de seis meses , al cabo de los cuales se romperán los testigos que permitirán observar el comportamiento de hormigones con y sin protección catódica y verificar el grado de agresividad de los cloruros , lo cual va a influenciar en el estado de pasividad o de corrosión del acero de refuerzo. Cabe indicar que durante el desarrollo de esta tesis nos vamos a referir a los hormigones de alta resistencia mecánica como los **Hormigones A** y a los de baja resistencia como los **Hormigones B**.

Ademas se realizarán pruebas orientadas a determinar las propiedades físicas y químicas de los 2 tipos de hormigón.

## **2.2 Fabricación de las Probetas de Hormigón.**

### **A. Comentarios.**

Se fabricarán 25 probetas de hormigón con las características que detallaremos en el literal C de este ítem. Los materiales y equipos que utilizaremos se presentan a continuación.

### **B. Materiales y Equipos.**

- Cemento Rocafuerte Tipo II
- Agregado grueso ( tamaño 19 mm )
- Arena homogenizada
- Malla de acero que actuará como ánodo
- Malla de Titanio que actuará como ánodo.
- Barras de acero de refuerzo ANDEC de 18 mm.
- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 10 %.
- cable AWG # 24
- Pistola de soldar
- Pasta de soldar
- 48 abrazaderas
- Cinta aislante
- Soldadura de estaño
- Resistencia eléctrica de 100  $\Omega$ , 3.9 K $\Omega$  y 100 K $\Omega$ .
- 25 Encofrados de madera.

- Cepillo metálico
- 1 mezcladora de hormigón
- 1 cono de Abraham para medir el asentamiento.
- 1 balanza para pesar los materiales dosificados.
- 1 tanque para el almacenamiento de las probetas durante 7 meses.

### C. Metodología.

1. Fundir especímenes de hormigón, controlando y observando las dosificaciones utilizadas para nuestro estudio. Los parámetros del hormigón serán los siguientes:

**TABLA IV**  
**DOSIFICACIONES UTILIZADAS EN LA PREPARACIÓN DE LOS**  
**HORMIGONES.**

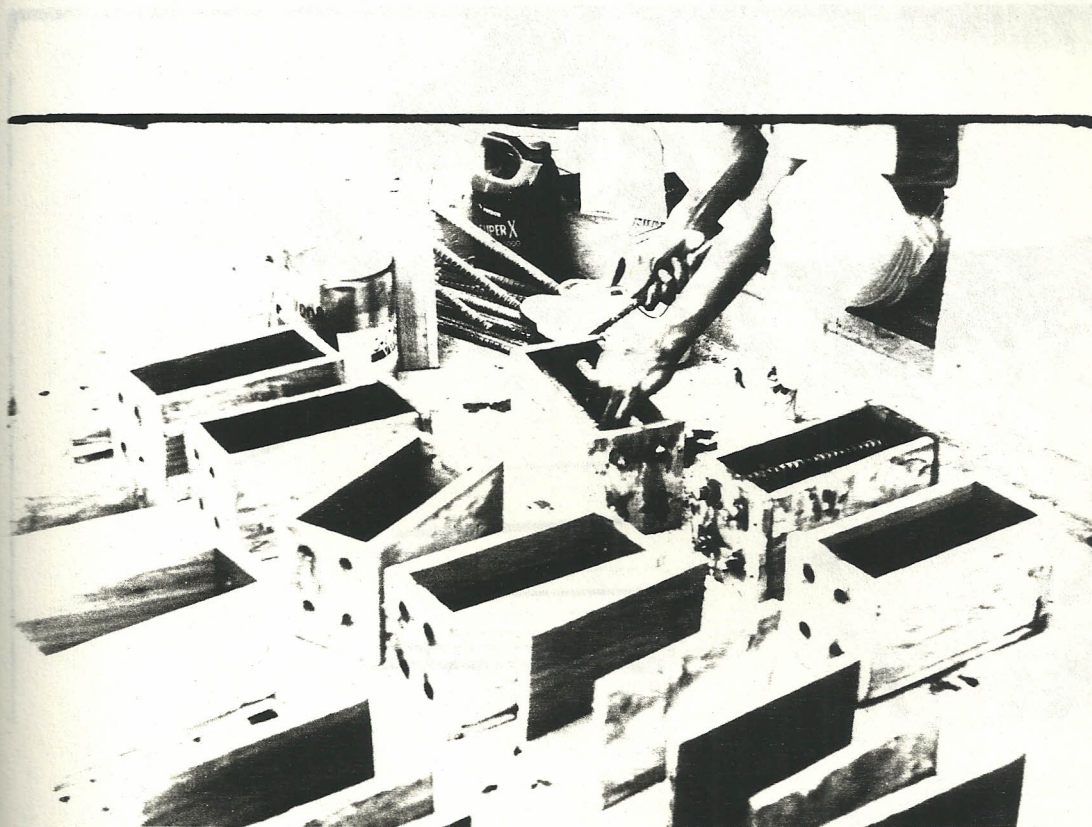
<b>Materiales</b>	<b>Hormigón A (alta resistencia)</b>	<b>Hormigón B ( baja resistencia )</b>
Cemento Tipo II	400 Kg/m <sup>3</sup>	200 Kg/m <sup>3</sup>
Agua	220 Kg/m <sup>3</sup>	220 Kg/m <sup>3</sup>
Arena Homogenizada	770 Kg/m <sup>3</sup>	1035 Kg/m <sup>3</sup>
Piedra Chispa Fina (1/2 pulgada)	895 Kg/m <sup>3</sup>	845 Kg/m <sup>3</sup>
Asentamiento mínimo	6.3 cm	15 cm
Relación Agua /Cemento	0.55	1.1

**Nota: - Hormigón de alta resistencia = A**

**- Hormigón de baja resistencia = B**

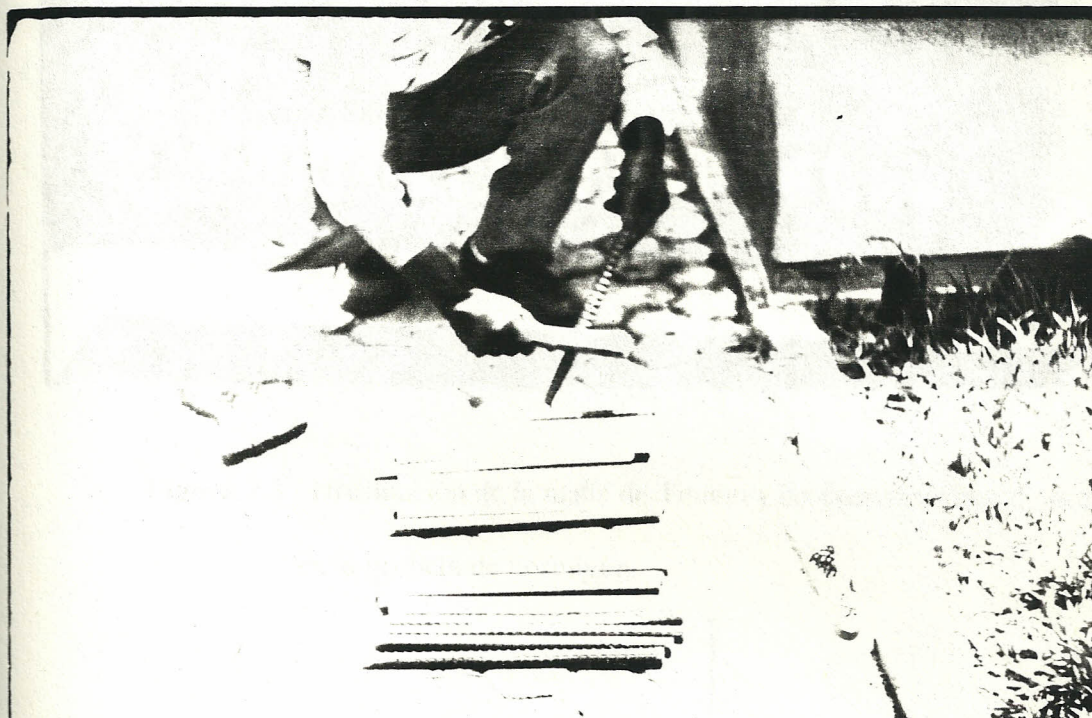
2.- El tamaño de las probetas será de 11x 6 x 4,5 pulgadas ( 279x152x144 mm ).

Un mínimo de tres réplicas deberían fabricarse , preferiblemente un gran número.



**Figura 2.1** Preparación de los encofrados de madera

3.- Las barras de acero deberán estar limpias antes de ser fundidas. Para ello son sumergidas en una solución de ácido sulfúrico al 10% durante 10 minutos. Luego se les pasa el cepillo metálico para dejar la varilla libre de óxido.



**Figura 2.2.** Decapado de las varillas de acero con Acido Sulfurico al 10 %

4.- Dentro de la probeta de hormigón irá fundida una malla de Titanio soldada a un cable y que actuará como ánodo tal como se puede observar en la figura 2.3

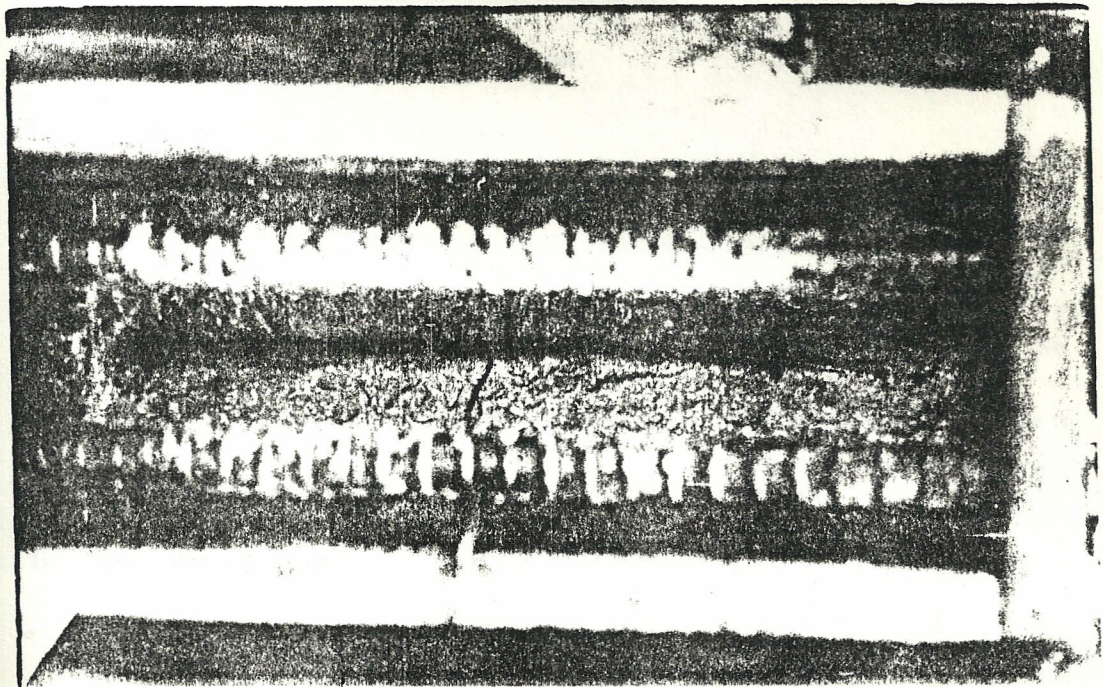


Figura 2.3 . Distribución de la malla de Titanio y las cuatro varillas de acero en la probeta de hormigón.

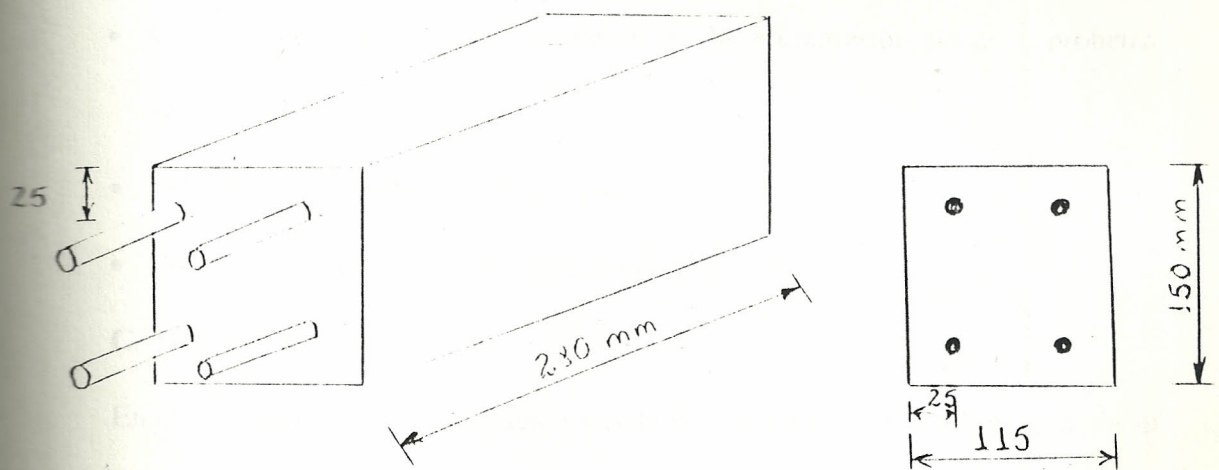


Figura 2.4 Dimensiones de la probeta de Hormigón

## **2.3 Determinación de las Propiedades del Hormigón.**

### **2.3.1 Resistencia Mecánica del Hormigón.**

#### **A. Comentarios.**

Se va a determinar la resistencia a la compresión del hormigón a través de probetas cilíndricas.

La resistencia a la compresión nos da una idea de la calidad del hormigón. Se podría decir que un hormigón de mayor resistencia es menos permeable que uno de menor resistencia y de allí su importancia en nuestro estudio.

#### **B. Materiales y Equipos.**

- Mezcladora para preparación del hormigón.
- Moldes cilíndricos para los hormigones de prueba .
- Varilla para apisonar el hormigón.
- Cámara húmeda para el curado.
- Máquina para determinar la Resistencia a la Compresión de las probetas de hormigón.
- Vibrador para compactar el hormigón.
- Cono de Abraham para medir el asentamiento

#### **C. Metodología.**

En una mezcladora son colocados los materiales componentes del hormigón en su orden: piedra, arena y se va agregando el agua poco a poco mientras gira la mezcladora hasta lograr que toda la mezcla sea homogénea y de una consistencia deseada en el diseño o dosificación.

Luego se mide el asentamiento mediante el llamado Cono de Abraham.



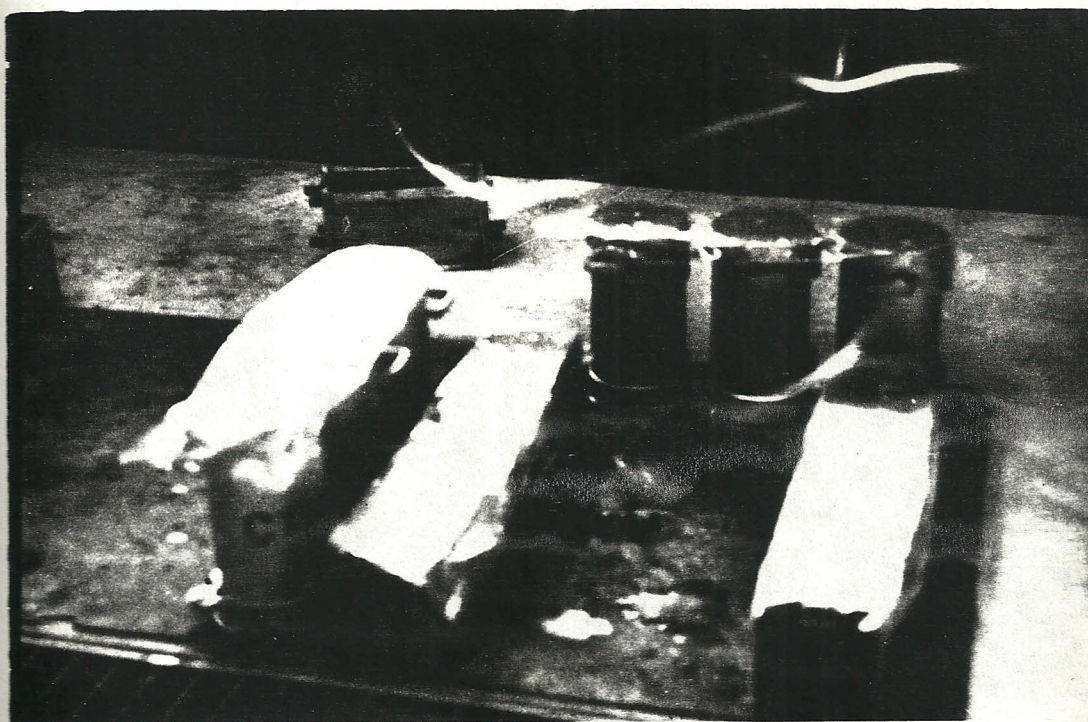
**Figura 2.5.** Medición del Asentamiento en el Hormigón.

1. El diámetro máximo de las partículas de agregado grueso usadas en las mezclas para moldes de 6 pulgadas de diámetro por 12 de altura no debe ser mayor de dos pulgadas.
2. Las superficies de los moldes de la base metálica que entren en contacto con la muestra de hormigón fresco mientras fragua, deben estar ligeramente lubricadas para evitar que el hormigón se pegue en el molde.
3. El hormigón se coloca dentro del molde en tres capas, cada una de las cuales debe tener 4 pulgadas de espesor. Cada capa debe ser apisonada con 25 golpes de varilla, repartidas uniformemente. La superficie de la última capa se

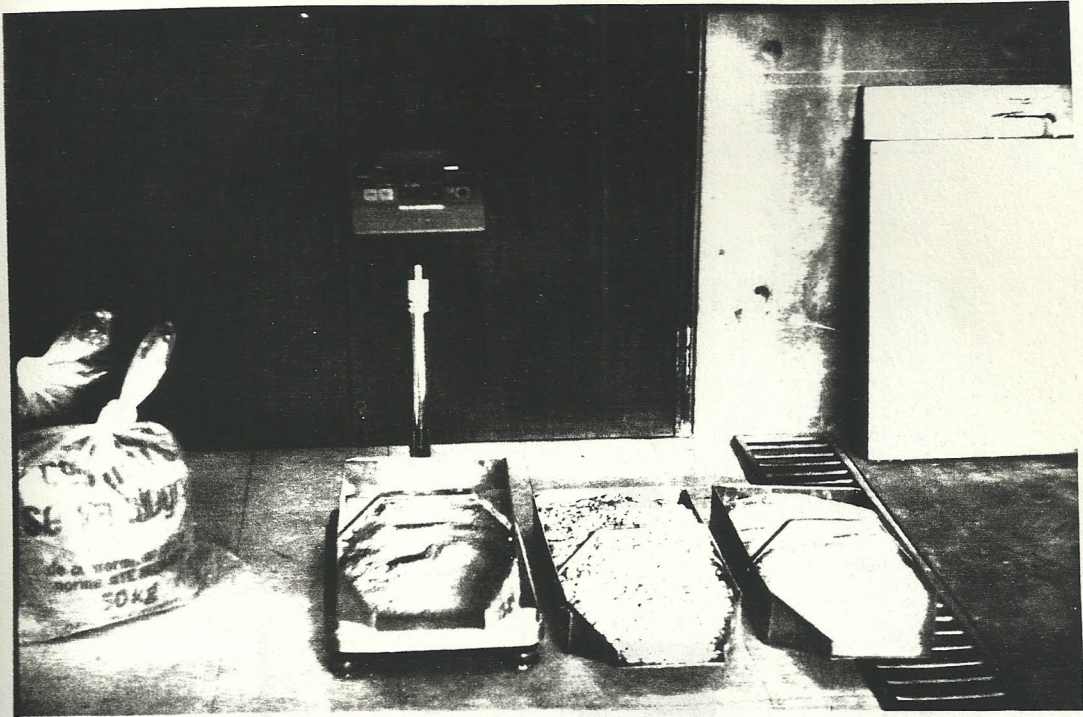
empareja con el palustre y se cubre el molde con un plástico ( funda ), para evitar la evaporación ( pérdida de humedad ).

4. Una vez colocada la muestra en los moldes esperamos doce horas para que alcancen resistencia y los desencoframos .

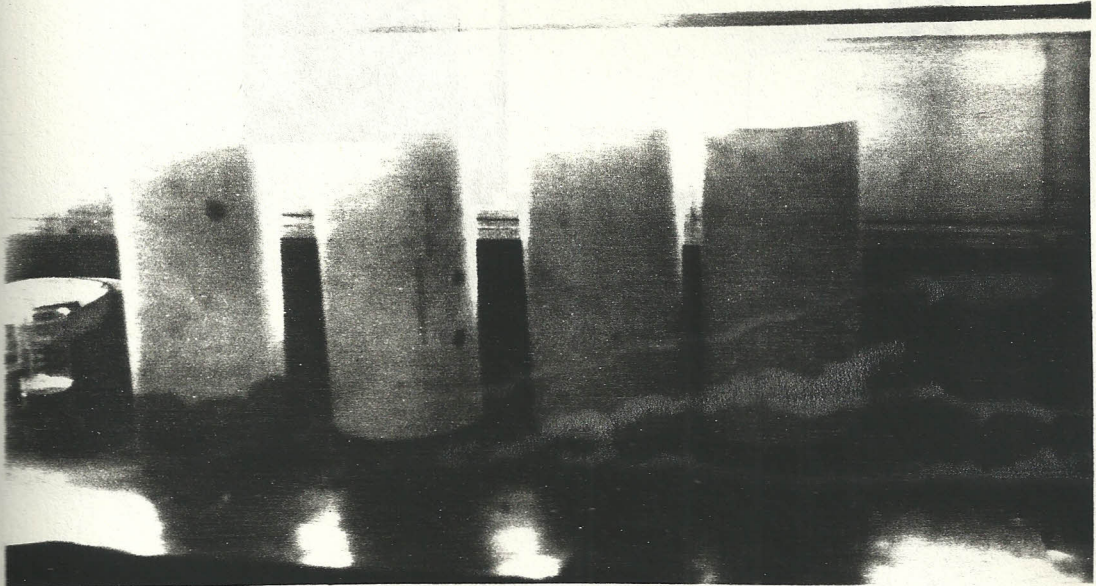
5. A continuación las probetas y los cilindros son colocados en una cámara húmeda, de tal forma que adquieran resistencia en agua. Se retirarán dos cilindros a los 7, 14 y 28 días y se les determinará su resistencia mecánica en las máquinas destinadas a realizar los ensayos de compresión , tal como lo indica la Norma ASTM C 31-44 que se refiere al curado de especímenes para ensayo de compresión.



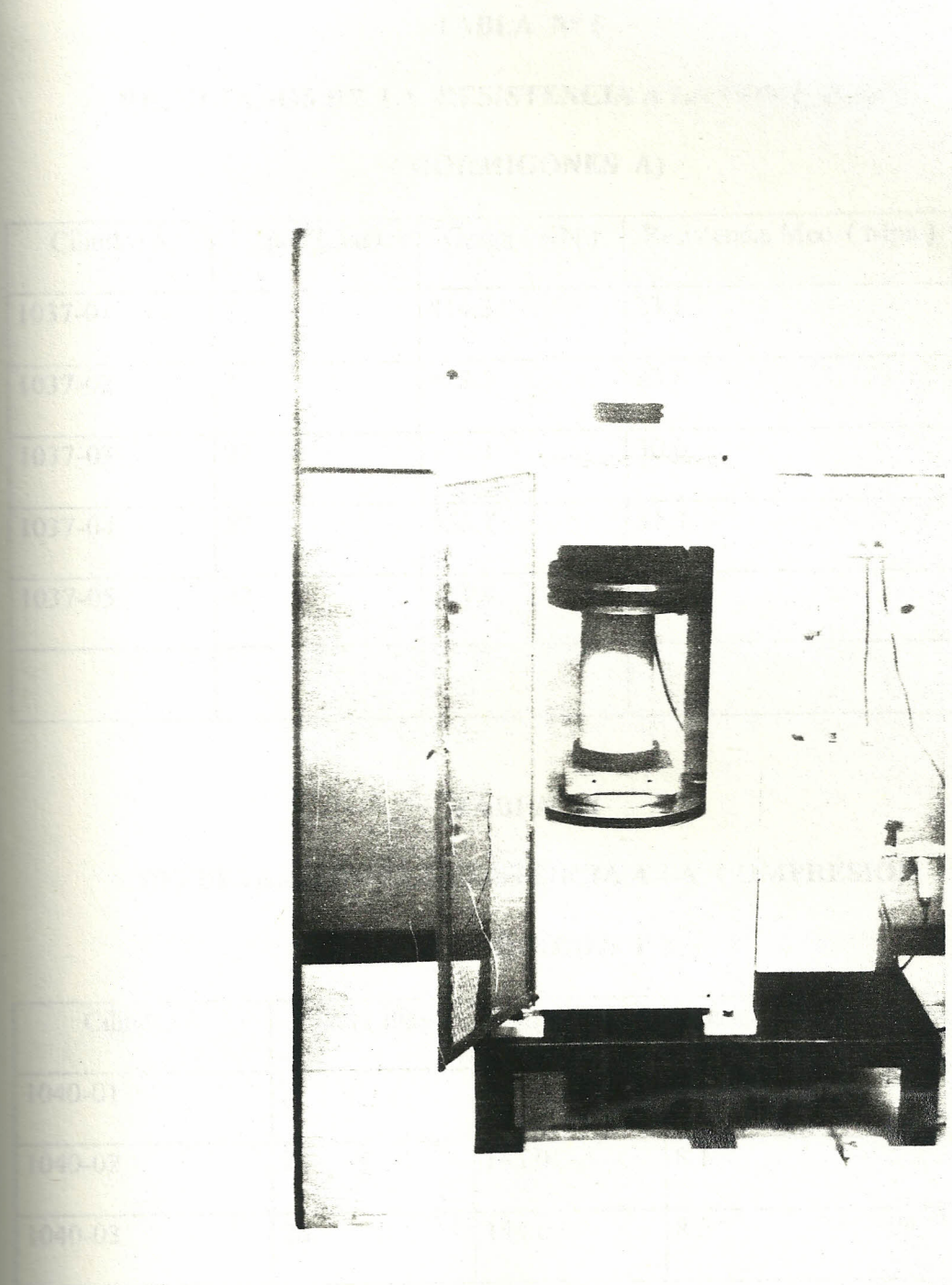
**Figura 2.6** Probetas y cilindros antes y después de la fundición .



**Figura 2.7** Control del peso de los materiales del Hormigón



**Figura 2.8** Cilindros listos para el Ensayo de Resistencia a la Compresión



**Figura 2.9** Medición de la Resistencia a la Compresión

**TABLA N° 5**  
**RESULTADOS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION**  
**( HORMIGONES A )**

Cilindro #	Edad (días)	Carga ( KN )	Resistencia Mec. ( Mpa )
1037-01	7	414.3	23.1
1037-02	7	422.5	23.8
1037-03	27	530.1	30.0
1037-04	27	556.7	31.3
1037-05	42	261.4	32.1

**TABLA VI**  
**RESULTADO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**  
**( HORMIGONES B )**

Cilindro #	Edad ( días )	Carga ( KN )	Resistencia Mecánica ( MPa)
1040-01	7	53.1	3.1
1040-02	28	143.0	8.1
1040-03	28	144.6	8.2

### 2.3.2 Porosidad y Densidad del Hormigón.

#### A. Comentarios.

La medida de porosidad de un hormigón se puede realizar mediante métodos muy sofisticados que permiten conocer no solo la porosidad total sino también el diámetro de los poros y el volumen porcentual de cada diámetro. Todos los métodos de medida que actualmente se utilizan son destructivos en cierta medida o no aportan datos completamente exactos, ya que el material que se introduce en el hormigón, afecta en cierto modo a su estructura interna y la falsea.

El valor de la porosidad de un hormigón nos puede aportar indicaciones sobre la calidad del mismo y puede ser un índice indirecto de su permeabilidad.

La prueba de porosidad la realizaremos utilizando muestras de hormigón extraídas de las probetas que están sumergidas en agua salada y que no están sometidas a polarización catódica, es decir se realizarán en los especímenes testigos.

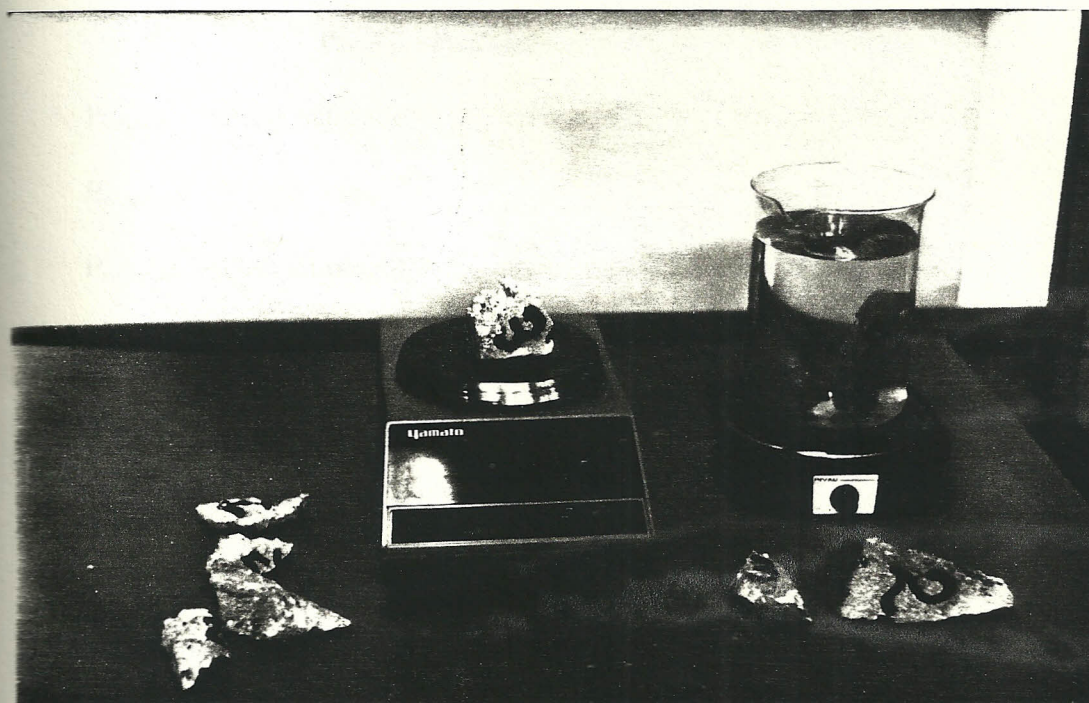
#### B. Materiales y Equipos.

- Muestras de hormigón ( de los dos tipos )
- Agua potable
- Balanza electrónica
- Vasos de 2 lt de capacidad
- Pinzas y piola

- Estufa

### C. Procedimiento.

1. Una porción de hormigón íntegra y libre de grietas y de un tamaño considerable que permita realizar el ensayo dentro del vaso , se deseca en una estufa a 105 °C hasta peso constante. El periodo de permanencia en el horno será de 24 horas, luego se introduce en un desecador hasta que adquiere la temperatura ambiente y en estas condiciones se pesa , a este peso lo llamaremos peso seco ( $P_{seco}$ ).
2. Después se sumerge en un vaso con suficiente cantidad de agua para que la cubra por completo .



**Figura 2.10** Determinación de la Porosidad del Hormigón .

3. El vaso con la muestra es llevado a una estufa donde herviremos la muestra dentro siempre de agua durante 2 horas. Se deja enfriar la muestra durante 12 horas y luego se seca superficialmente antes de pesarla ( $P_{\text{saturado}}$ ).
4. Luego se vuelve a introducir en el agua y se vuelve a pesar suspendiendo la muestra directamente de la balanza con una piola y sin extraerla del agua ( $P_{\text{sumergido}}$ ).

La porosidad por volumen del hormigón se calcula mediante la expresión siguiente:

$$\text{Porosidad} = \frac{P_{\text{saturado}} - P_{\text{seco}}}{P_{\text{saturado}} - P_{\text{sumergido}}} \times 100, \text{ donde:}$$

$$P_{\text{saturado}} - P_{\text{sumergido}}$$

$$P_{\text{saturado}} = \text{Peso saturado}$$

$$P_{\text{seco}} = \text{Peso seco}$$

$$P_{\text{sumergido}} = \text{Peso sumergido}$$

$$P_{\text{muestra}} = \text{Peso de la muestra}$$

Con estos valores también es posible calcular la densidad aparente y real del hormigón a través de las fórmulas:

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{P_{\text{seco}}}{P_{\text{saturado}} - P_{\text{sumergido}}}$$

$$P_{\text{saturado}} - P_{\text{sumergido}}$$

$$P_{\text{seco}}$$

Densidad Real = -----

$$P_{\text{seco}} - P_{\text{sumergido}}$$

Por último utilizaremos los siguientes criterios de valoración para evaluar la porosidad encontrada en las muestras.

**TABLA VII**

**CRITERIOS DE VALORIZACION DE LA POROSIDAD**

Porosidad ( % )	Estado del Hormigón
< 10 %	Hormigón de buena calidad y compacto.
10 % < Porosidad < 15 %	Buen hormigón pero permeable y no adecuado para ambientes agresivos
>15 %	Hormigón muy permeable,

TABLA VIII

## DETERMINACION DE LA POROSIDAD DEL HORMIGON.

Muestra	P <sub>muestra</sub> (gr)	P <sub>seco</sub> (gr)	P <sub>sumergido</sub> (gr)	P <sub>saturado</sub> (gr)	P <sub>orosidad</sub> (%)
A1	161.2	148.7	71.4	164.3	16.79
A2	225.8	211.1	99.0	228.9	13.70
A3	115.4	108.7	50.5	116.4	11.68
A4	208.4	194.2	92.9	211.5	14.58
B1	69.9	64.5	32.2	70.6	15.88
B2	54.2	50.2	25.5	56.3	17.85
B3	127.7	119.3	56.5	128.5	12.77
B4	99.5	92.1	43.5	100.5	14.73
B5	56.5	51.9	25.1	57.8	18.04

**TABLA DE RESULTADOS IX**

**DENSIDAD DEL HORMIGON**

<b>Muestra</b>	<b>P<sub>sumergido</sub></b>	<b>P<sub>seco</sub></b>	<b>P<sub>saturado</sub></b>	<b>Densidad Aparente</b>	<b>Densidad Real</b>
A1	71.4	148.7	164.3	1.600	1.923
A2	99.0	211.1	228.9	1.625	1.883
A3	50.5	108.7	116.4	1.649	1.864
A4	92.9	194.2	211.5	1.637	1.917
B1	32.2	64.5	70.6	1.679	1.996
B2	25.5	50.2	56.3	1.652	2.003
B3	56.5	119.3	128.5	1.656	1.899
B4	43.5	92.1	100.5	1.615	1.895
B5	25.2	51.9	57.8	1.587	1.936

### 2.3.3. Contenido en Humedad del Hormigón.

#### A-Comentarios.

El contenido de humedad del hormigón es la variable que controla tanto el acceso de oxígeno u otros gases ( carbónico, sulfuroso ,etc. ) , hasta la armadura como la resistividad del hormigón, es decir es la variable que incide más directamente sobre la velocidad de corrosión. Así, los poros están saturados de humedad , aunque la resistividad del hormigón será lo más baja posible , el acceso de oxígeno estará dificultado al tener que llegar hasta la armadura por difusión a través del agua. Cuando los poros están casi secos, el oxígeno llega con facilidad pero la resistividad será muy elevada permitiendo velocidades de corrosión muy bajas . Los contenidos de humedad que permitan una resistividad baja, pero no saturen los poros serán las que permitirán las velocidades de corrosión máximas.

En ambientes permanentemente secos (  $HR < 60\%$  ) el riesgo de corrosión es bajo, incluso si el hormigón está carbonatado , dado que el proceso de electrolítico está impedido. La corrosión es posible , en caso de que haya alto contenido en cloruros , incluso en ambientes secos debido a los efectos higroscópicos de los cloruros, que aumentan el contenido de agua del hormigón.

En hormigones permanentemente saturados de agua el riesgo de corrosión es bajo debido a la carencia de oxígeno , incluso si el hormigón está fuertemente contaminado por cloruros.

Si la estructura o elemento estructural está total o parcialmente saturada o sumergida, se debe tener en cuenta el posible riesgo de que distintas zonas de la superficie actúen anódica y catódicamente.

Las condiciones más favorables para la corrosión del acero en el hormigón son los ciclos de humedad -sequedad en combinación con altas temperaturas.

#### **B.- Metodología.**

El contenido en humedad de un hormigón se calcula mediante la simple diferencia entre el peso de la muestra sometido a una humedad ambiental concreta y el peso después de estar la muestra 24 horas en estufa a 105 °C .

Si se conoce el valor de la porosidad de una muestra gemela de hormigón o se efectúa el ensayo con posterioridad al de la determinación de la humedad, es posible obtener datos porcentuales de la saturación en humedad de los poros a partir del peso de la muestra saturada de agua. Así como, el porcentaje de saturación en humedad podría expresarse como:

$$\% \text{ de Saturación} = 100 \times \frac{P_{\text{muestra}} - P_{\text{seco}}}{P_{\text{saturacion}} - P_{\text{seco}}}$$

**TABLA X**  
**CONTENIDO EN HUMEDAD DEL HORMIGON.**

Muestra	Pmuestra	Psaturacion	Pseco	% Saturación
A1	161.2	164.3	148.7	80.1
A2	225.8	228.9	211.1	82.5
A3	115.4	116.4	108.7	87.0
A4	208.4	211.5	194.2	82.0
B1	69.9	70.6	64.5	88.5
B2	54.2	56.3	50.2	61.1
B3	127.7	128.5	119.3	91.3
B4	99.5	100.5	92.1	88.0
B5	56.5	57.8	51.9	79.3

## 2.4 Pruebas Químicas.

### **2.4.1 Profundidad de carbonatación**

#### **A. Comentarios.**

El dióxido de carbono del aire penetra a través de la red de poros del hormigón y reacciona con los constituyentes alcalinos del cemento, sobre todo con el hidróxido cálcico. Este proceso conduce a la formación de carbonatos cálcicos y alcalinos y a una reducción del pH de la solución acuosa contenida en los poros, que resulta finalmente con un valor de pH cercano a la neutralidad.

Similar fenómeno de reducción del pH se produce si el hormigón está en contacto con agua en circulación o ligeramente ácida. En este caso el pH se reduce por un efecto de "deslavado" que lixivia todas las sales contenidas en los poros y en último extremo puede provocar la desintegración del propio hormigón.

La profundidad de la capa superficial carbonatada o deslavada se llama "**profundidad de carbonatación**" y la reducción de su pH se hace visible para el cambio de color de un indicador apropiado .

Como indicador más adecuado se utiliza una disolución al 1% de fenolftaleína en alcohol etílico.

Esta solución es incolora en pH inferior a 8 . Para valores de pH superiores a 9,5 se torna de color rojo púrpura . Entre 8 y 9,5 el indicador forma una coloración del rosa al rojo púrpura según evoluciona el pH desde a 8 a 9,5.

#### **B. Materiales y Equipos.**

- 3 muestras de hormigón tipo A.
- 3 muestras de hormigón tipo B.
- Solución de 1 % de fenolftaleína en alcohol etílico.
- Cámara fotográfica.

#### **C. Metodología**

Vamos a determinar la presencia de carbonatación y su profundidad en muestras de hormigón extraídas de las probetas expuestas en agua salada. Para ello utilizaremos un método visual mediante la aplicación de fenolftaleína, la

reducción del pH del hormigón se hace visible por el cambio de color del indicador.

1. Se toman 6 muestras de hormigón extraídas de las probetas expuestas en agua salada, tomando en cuenta lo siguiente: la extracción se debe realizar en seco, no es necesario que las porciones tengan una geometría particular, basta que tengan dimensiones suficientes para averiguar desde uno de los lados, que debe ser la superficie de la estructura, la posible profundidad de la capa carbonatada
2. Perpendicular a la superficie de la muestra de hormigón, se pulveriza la solución de fenoftaleína al 1 %.
3. Pasados 1 ó 2 minutos para que tome color el indicador se mide el espesor de la capa incolora.

Las fotografías son una ayuda completamente muy valiosa en estas medidas.

**TABLA XI**

**CRITERIO DE VALORACION DE FENOFTALEINA EN CONTACTO  
CON EL HORMIGON.**

<b>COLORACION</b>	<b>INDICATIVO</b>
INCOLORA	pH 8
ROSADO A ROJO PURPURA	pH entre 8 y 9.5
ROJO PURPURA	pH > 9.5

**TABLA XII**  
**RESULTADOS DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONATACION**  
**OBTENIDA EN HORMIGONES DESPUES DE 7 MESES DE**  
**EXPOSICION**

MUESTRA	PROFUNDIDAD DE CARBONATACION
Muestra 1 A	1.1 mm
Muestra 2 A	1.0 mm
Muestra 3 A	1.1 mm
Muestra 1 B	1.25 mm
Muestra 2 B	1.2 mm
Muestra 3 B	1.2 mm

#### 2.4.2 Contenido de Cloruros.

##### A.- Comentarios.

Los cloruros se pueden encontrar dentro del hormigón de dos formas: como cloruros "libres", es decir en forma de iones en el agua contenida en los poros, que son los que pueden ser agresivos para las armaduras, y como cloruros "combinados", formando parte de las fases hidratadas del cemento, fundamentalmente como cloroaluminatos. La suma de libres y combinados se suele llamar cloruros "totales".

Estos iones pueden ser encontrados en los ingredientes de la mezcla de hormigón o pueden por difusión entrar en el concreto desde el ambiente marino. En presencia de humedad y oxígeno los cloruros inducen la corrosión del acero y causan en el hormigón agrietamientos, y fractura, llegando en algunos casos al colapso de la estructura como se observa en la figura N° 2.11. En la presente prueba se va a determinar los "cloruros solubles en agua o libres" por el método de Mohr, un método de solubilidad en agua y sensitivo a los procedimientos de ensayo. Esto nos ayudará a estimar el grado de contaminación del hormigón; por comparación con los valores permisibles por las normas internacionales. Los valores de contenido en cloruros se presentan en porcentaje por peso de hormigón.



**Figura 2.11** Tubería de Hormigón pretensado colapsada por la presencia de cloruros dentro de la mezcla de hormigón

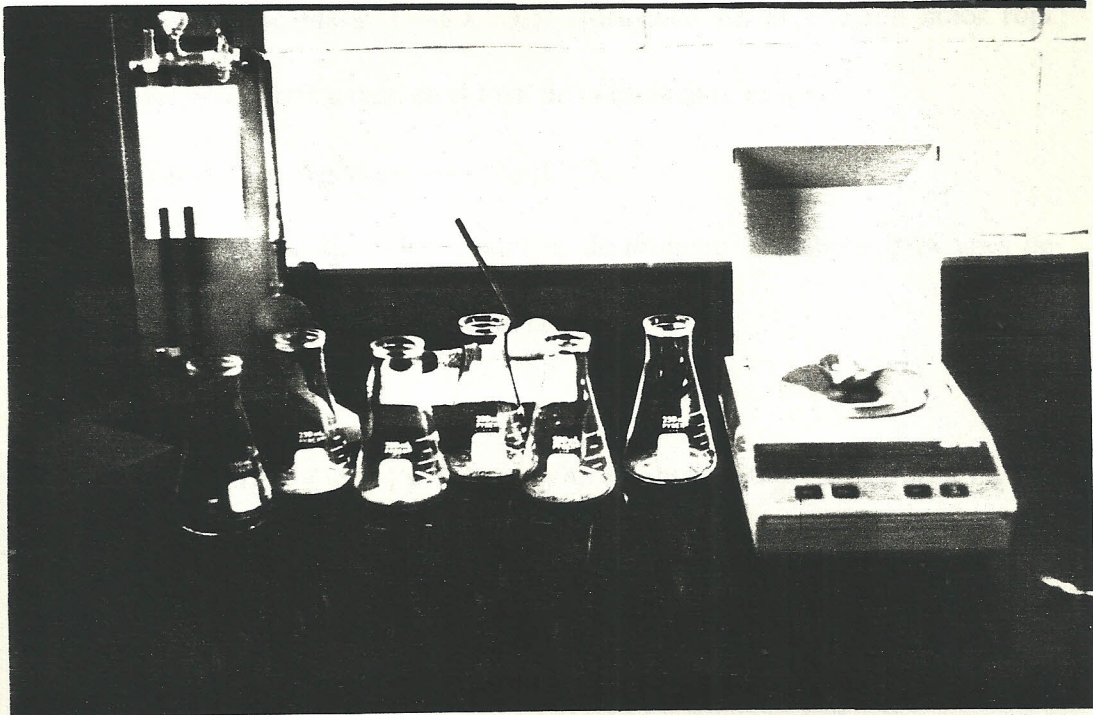
**B.- Materiales y Equipos.**

- 6 muestras de hormigón triturado.
- agua destilada
- papel filtro
- cromato de potasio ( $K_2CrO_4$ ).
- Nitrato de Plata ( $AgNO_3$ ), pureza 99.8%.
- Molino de rodillo
- Tamíz N° 16
- Estufa
- Balanza electrónica
- Vasos erlenmeyer (capacidad 250 ml )

**C.- Metodología.**

- 1.- Al menos 100 gr. de muestra seca , se tritura hasta que pase por el tamíz N° 16.
- 2.- Posteriormente se homogeniza cuidadosamente y se vuelve a secar en estufa a 105 °C.
- 3.- Se toma mediante cuarteo de la muestra triturada y seca, una porción de unos 5 gramos pesados con aproximación de 1 mg.
- 4.- Introducir en un Erlenmeyer de 250 ml . provisto de boca esmerilada . Se adicionan a la muestra unos 50 ml. de agua destilada. Se agita bien durante

una hora hasta disolver la muestra lo más posible. Esto se puede reemplazar dejando la muestra en agua destilada por 24 horas.



**Figura 2.12** Determinación del contenido de Cloruros en el Hormigón .

- 5.- Se filtra la mezcla usando papel filtro de porosidad media y se mide el volumen del filtrado.
- 6.- Luego se le agrega Cromato de Potasio ( $K_2CrO_4$ ), que va a actuar como indicador, tornando de un color amarillenta la solución.
- 7.- A continuación se añade una solución de Nitrato de Plata ( $AgNO_3$ , 0.10002 N). La reacción que se produce a continuación es la siguiente:



Primeramente la plata del  $AgNO_3$  reacciona con todos los cloruros insolubles formando el cloruro de plata ( $AgCl$ ), que se lo puede apreciar visualmente

como un precipitado blanco . Cuando todos los AgCl se han precipitado de forma inmediata , los iones cromato reaccionan con la Ag del AgNO<sub>3</sub> para formar cromato de plata ( Ag<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> ) , formando un precipitado color rojo ladrillo, lo que nos indica que es el final de la titulación, es decir:



8.- Se toman anotación de los mililitros de titulante empleados para fines de cálculo, aplicando la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} \% \text{ de Cl} = & (\text{mol / litro}) \times (35.45 \text{ g/mol}) \times (\text{litro}/1000\text{ml}) \times (\text{alícuota}) \times \\ & (1/\text{peso muestra}) \times 100. \end{aligned}$$

donde:

mol / litro = centímetros cúbicos del titulante empleado

alícuota = 50 mililitros

peso de la muestra = 5 gramos.

9.- Por último se valora los resultados obtenidos . A fin de tener un parámetro de comparación podemos considerar la tabla N°12 .

10.- Con los resultados obtenidos también se va a determinar un perfil de cloruros que nos permitirá establecer conclusiones sobre la difusión de los iones cloruros desde el exterior hasta el interior del hormigón.



**Figura 2.13** Titulación de las muestras de Hormigón para determinar la cantidad de cloruros absorbida durante los primeros 7 meses de exposición .

#### **Criterios de Valoración.**

Los resultados del contenido de cloruros dan una idea del grado de contaminación y de la evolución posible del daño, pero no se pueden tomar como un límite matemático sin la interpretación de otras variables como por ejemplo: la proporción de cemento por  $m^3$  de hormigón, humedad, la disponibilidad de oxígeno , etc.

De acuerdo a los actuales conocimientos y atendiendo a las recomendaciones del Comité ACI 222 , quines sugirieron los siguientes límites de ión cloruro ( $Cl^-$ ) para hormigón, antes de quedar expuesto a las condiciones de servicio , los valores se expresan como porcentaje por peso de cemento.

**TABLA XIII**  
**CRITERIO DE VALORACION DE CLORUROS.**

CONTENIDO DE CLORUROS ( % )	INDICATIVO
> 0.1 % en relación al peso del hormigón	Cantidades suficientes de Cloruros para despasivar el acero en un ambiente húmedo
> 0.06 % en relación al peso del hormigón	Cantidad suficiente de cloruros para despasivar el acero en un hormigón presforzado.

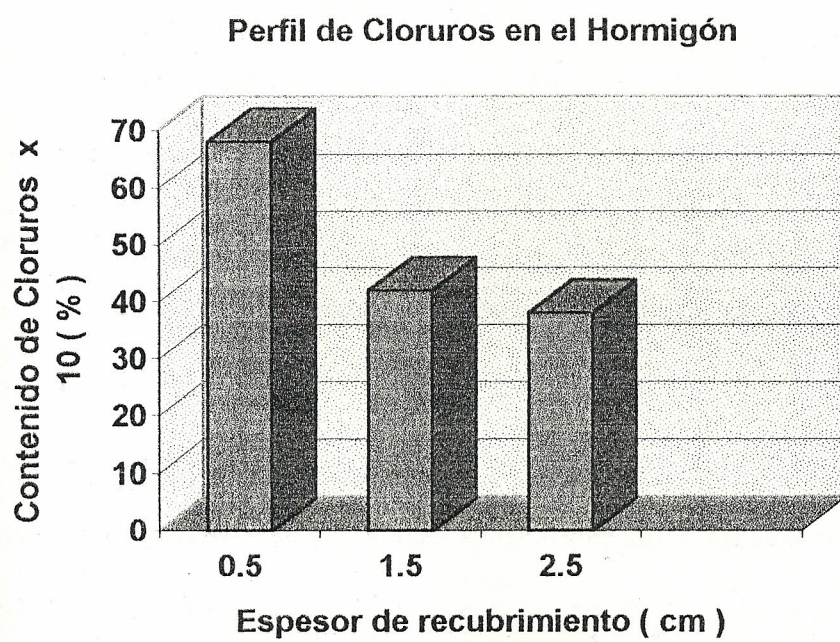
**TABLA XIV**  
**CONTENIDO DE CLORUROS EN LAS PROBETAS DE HORMIGON.**  
**PERFIL DE CLORUROS.**

PROBET	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
A			
B1	0,957	0,851	0,531
A1	0.691	0,443	0,34

**Nota:** **Muestra 1:** hormigón de la capa externa de la probeta ( 5 cm)

**Muestra 2:** hormigón de la capa intermedia (15 cm )

**Muestra 3:** hormigón de la capa interior de la probeta (25 cm ).



**Figura 2.14** Perfil de Cloruros en el recubrimiento del Hormigón

## **2.5. PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS**

El estudio de la Polarización catódica lo orientaremos a :

- Determinar los potenciales naturales y de protección del acero de refuerzo.
- Estimar la mínima cantidad de corriente requerida para prevenir la corrosión del acero en hormigón la resistencia eléctrica del circuito.
- Construir las Curvas de Polarización Catódica.
- Determinar las Caídas de Voltaje mediante ensayos ON/OFF, ya que nos dan una idea de cómo actúa la Protección Catódica.

### **2.5.1 Polarización catódica del Acero en las probetas de Hormigón mediante ensayos ON/OFF.**

#### **A. Comentarios.**

Un sistema de protección catódica por corrientes Impresas es aquel que utiliza una fuerza electromotriz proveniente de una fuente de corriente continua ( Rectificador ) para imprimir la corriente necesaria para proteger una estructura considerada.

Las pruebas de Polarización serán conducidas siguiendo el criterio de protección de los -850 milivoltios con respecto al electrodo Cu/CuSO<sub>4</sub> en combinación con las técnicas de las caídas de voltaje mediante ensayos ON/OFF, para evaluar la eficiencia de los sistemas de protección Catódica del acero en el hormigón .

La Investigación la realizaremos utilizando una “ *Celda de Polarización Catódica* “ como muestra la figura 2.15 en la cual estamos simulando la presencia de un pilote de hormigón en agua de mar .

La *Celda de Polarización Catódica* por corrientes impresas consta de un rectificador que es la fuente capaz de convertir la corriente alterna en corriente continua y suplir al sistema de una densidad de corriente capaz de proteger al acero de refuerzo contra la corrosión.



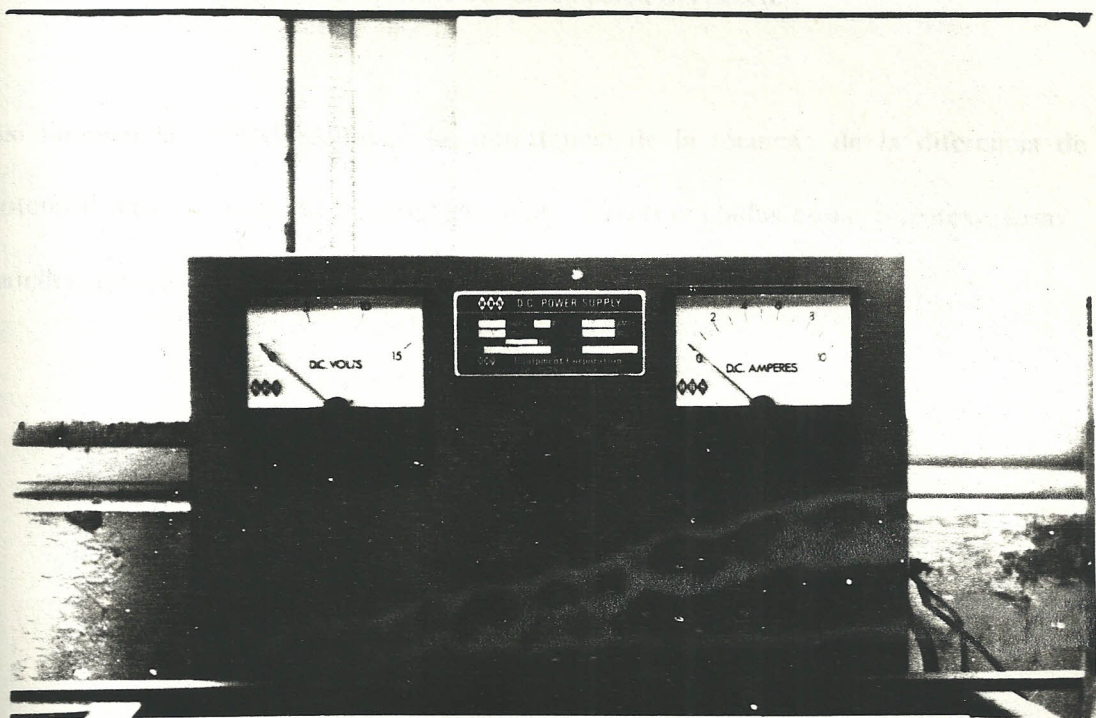
**Figura 2.15.** Celda de Polarización Catódica .

Cuatro varillas de acero representan al acero de refuerzo en la estructura sumergida en solución salina de cloruro de sodio al 3% y que actuarán como **cátodos** ( elemento a proteger ) en la celda de polarización .

Como **ánodo** tenemos una malla de Titanio la cual será fundida dentro del hormigón y soldada a unos cables conductores.

Una resistencia eléctrica de  $3.9\text{ K}\Omega$ . se ha colocado a la salida del rectificador para medir las caídas de voltaje y poder entonces a través de la Ley de Ohm cuantificar la cantidad de corriente inyectada al sistema . Para ello colocamos el voltímetro en paralelo con la resistencia eléctrica.

$$\text{Voltaje } V = \text{resistencia } R \times \text{corriente } I$$



**Figura 2.16.** Rectificador de corriente empleado para la polarización catódica .

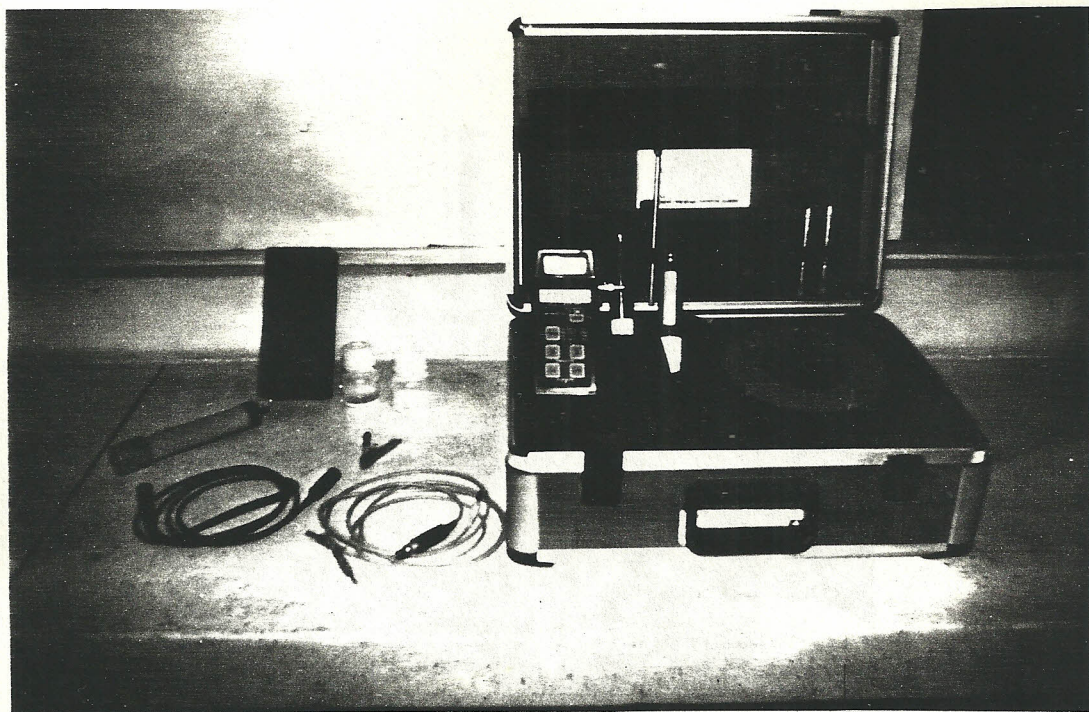
### **Determinación de los potenciales de corrosión**

La magnitud numérica de los potenciales de electrodo usualmente nos indican la presencia o no de corrosión. Pero raramente la magnitud numérica de un potencial de electrodo indica la razón de corrosión.

La **ASTM** cuestiona que el criterio de medición de potenciales no es válida para :

1. Evaluar acero de refuerzo embebido en hormigón carbonatado.
2. Evaluar interior de un hormigón que no está húmedo
3. Comparar la actividad corrosiva de estructuras de hormigón donde la humedad y la cantidad de oxígeno son altamente variables cerca del acero.

Así también la **ASTM** reconoce la importancia de la técnica de la diferencia de potencial para la medición de extensas áreas interconectadas como puentes, losas, muelles, pilotes, vigas, etc.



**Figura 2.17** Equipo utilizado para medir potenciales de corrosión.

Datos Técnicos acerca del equipo de medición de potenciales así como también recomendaciones para su uso , podremos encontrar en el Anexo 1 de esta Tesis.

A continuación se presentan los resultados del comportamiento que tuvieron varias probetas de los dos tipos de hormigón durante los cuatro primeros meses de exposición .

Tabla XV

Variación de los potenciales naturales de corrosión



**Figura 2.18 .** Medición del potencial de corrosión de las probetas de hormigón.

**Tabla XV.**

Variación de los potenciales naturales de corrosión.

<b>PROBETA # A1</b>	
<b>Tiempo de exposición (días)</b>	<b>Ecorr (mV)</b>
0	-555
15	-568
30	-575
45	-605
60	-650
90	-655
75	-622
95	-619
105	-682
115	-666
120	-664

**Tabla XVI**

Variación de los potenciales naturales de corrosión.

<b>PROBETA # B1</b>	
<b>Tiempo de exposición (días)</b>	<b>Ecorr (mV)</b>
0	-555
15	-563
30	-587
45	-620
60	-660
90	-675
75	-671
95	-622
105	-696
115	-674
120	-676

**Tabla XVII**  
Variación de los Potenciales naturales de Corrosión .

<b>PROBETA # A2</b>	
<b>Tiempo de exposición (días )</b>	<b>Ecorr (mV)</b>
0	-555
15	-560
30	-578
45	-610
60	- 628
90	-675
75	- 598
95	-620
105	- 668
115	-669
120	- 673

**Tabla XVIII**  
Variación de los Potenciales naturales de Corrosión .

<b>PROBETA # B2</b>	
<b>Tiempo de exposición (días )</b>	<b>Ecorr (mV)</b>
0	-555
15	-572
30	-588
45	-623
60	- 658
90	-680
75	-663
95	-632
105	-670
115	-672
120	-675

**Tabla XIX.**  
Variación de los Potenciales naturales de Corrosión .

<b>PROBETA # A3</b>	
<b>Tiempo de exposición (días )</b>	<b>Ecorr (mV)</b>
0	-555
15	-585
30	-558
45	-601
60	- 626
90	-628
75	- 596
95	-627
105	- 640
115	-671
120	-678

**Tabla XX.**  
Variación de los Potenciales naturales de Corrosión .

<b>PROBETA # B3</b>	
<b>Tiempo de exposición (días )</b>	<b>Ecorr (mV)</b>
0	-555
15	-582
30	-594
45	-622
60	- 648
90	-675
75	-668
95	-638
105	-660
115	-688
120	-687

**Tabla XXI.**  
Variación de los Potenciales naturales de Corrosión .

<b>PROBETA # A4</b>	
<b>Tiempo de exposición (días )</b>	<b>Ecorr (mV)</b>
0	-555
15	-560
30	-572
45	-608
60	- 643
90	-637
75	-678
95	-632
105	- 687
115	-668
120	-675

**Tabla XXII.**  
Variación de los Potenciales naturales de Corrosión .

<b>PROBETA # B4</b>	
<b>Tiempo de exposición (días )</b>	<b>Ecorr (mV)</b>
0	-555
15	-562
30	-592
45	-627
60	- 660
90	-665
75	-683
95	-639
105	-692
115	-674
120	-682

### Determinación de la densidad de corriente de protección. ( $D_c$ )

La densidad de corriente de protección es uno de los parámetros más importantes para el dimensionamiento de un sistema de protección catódica.

Por densidad de corriente de protección se entiende la intensidad de corriente eléctrica por unidad de área de superficie a proteger. La unidad de uso más corriente es el miliamperio por metro cuadrado ( $\text{mA}/\text{m}^2$ )

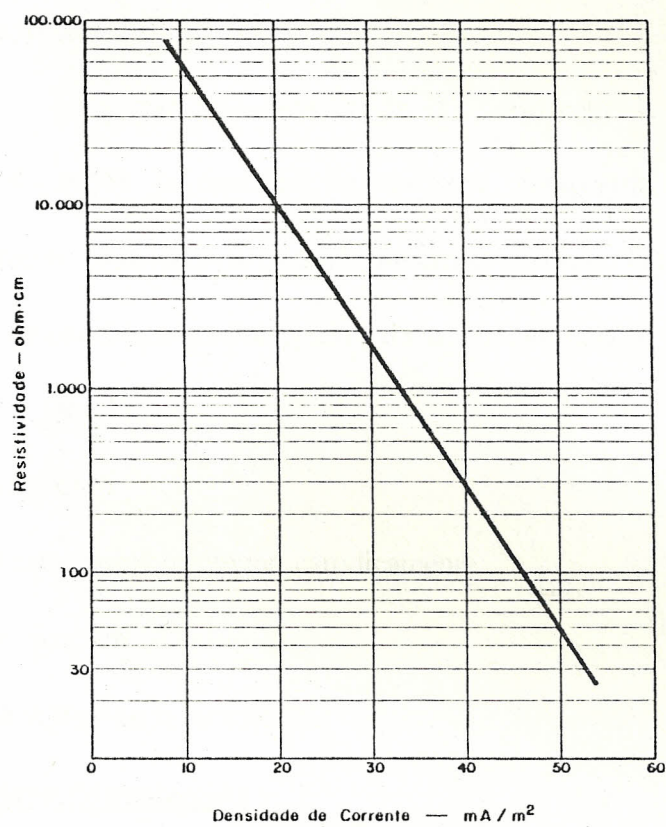
Un valor de densidad de corriente de protección a ser adoptado en un proyecto depende de muchos factores, principalmente de la resistividad eléctrica del medio, (electrolito) y del tipo de material que se desea proteger.

La densidad de corriente recomendada para el acero embebido en el hormigón es de  $5 \text{ mA}/\text{m}^2$ . Este valor nos dará una idea de cómo actuará la protección catódica.

El escoger un método de protección depende de las condiciones ambientales. La resistividad eléctrica que presente el hormigón es muy importante al momento de diseñar un sistema de protección ya que está relacionada con la facilidad con que la corriente pueda viajar dentro del hormigón y actuar eficazmente.

La densidad de corriente la determinaremos utilizando el siguiente cuadro que relaciona la resistividad eléctrica de un hormigón con la densidad de corriente de protección.

En un hormigón parcial o totalmente húmedo es más fácil polarizar el acero que en un hormigón seco.



**Figura 2.19** . Variación de la densidad de corriente de protección del acero en función de la resistividad eléctrica del medio.

En el transforectificador se puede ajustar la cantidad de corriente y el voltaje de salida mediante un reóstato. La capacidad del transforectificador utilizado en nuestra investigación es de 15 voltios y 10 amperios de corriente.

Una resistencia eléctrica se ha colocado a la salida del rectificador para medir las caídas de voltaje y poder entonces a través de la Ley de Ohm cuantificar la cantidad de corriente aplicada al sistema .

$$\text{Voltaje } V = \text{resistencia } R \times \text{corriente } I.$$

Otra forma de medir la cantidad de corriente inyectada al sistema por el transforectificador es colocando un amperímetro en serie con la resistencia eléctrica.

La **densidad de corriente** la calcularemos de la siguiente forma.

$$Dc = I / A$$

**I** = corriente aplicada

**A** = área de la estructura a proteger catódicamente.

**R** = resistencia eléctrica

$\Delta V$  = caída de voltaje en la resistencia.

#### Cálculo del Area de protección :

$$\text{Area Total} = N^{\circ} \text{ varillas } \times \text{Area de una varilla}$$

$$\text{Area de la varilla} = 2 \times \pi \times \text{radio} \times \text{longitud.}$$

$$= 2 \times \pi \times (0.9 \text{ cm}) \times 27 \text{ cm}$$

$$= 152,68 \text{ cm}^2$$

$$\text{Area Total} = 4 \text{ varillas } \times 152,68 \text{ cm}^2 / \text{varilla .}$$

$$= 610,72 \text{ cm}^2 .$$

## B. Materiales y Equipos.

- Rectificador de corriente
- Cable AWG # 24
- Resistencias eléctricas  $3.9\text{ K}\Omega$  ,  $100\ \Omega$  , y  $100\text{ K}\Omega$
- Multímetro **FLUKE MODELO 25**
- Equipo de Medición de potenciales de corrosión . **Modelo BL-90-M**
- Electrodo de Referencia  $\text{Cu/CuSO}_4$
- Electrodo de Referencia  $\text{Ag/ AgCl}$
- Mordazas conectoras
- Tina de Agua salada ( cloruro de sodio al 3% )

## C.- Metodología.

1. Antes de empezar a polarizar el acero debemos constatar de que existe continuidad eléctrica entre todas las varillas para verificar que la corriente inyectada por el transformador está polarizando a todo el acero de la probeta, esto lo haremos utilizando el multímetro en la escala destinada para realizar este tipo de mediciones.
2. Estando el rectificador apagado montamos el sistema de protección tal como se muestra en la figura N° .
3. Instantáneamente después de cerrar el circuito de protección, si nosotros medimos la caída de voltaje en la resistencia observaremos que verdaderamente existe , esto lo podemos atribuir a la diferencia de potencial existente entre las varillas de acero

y la malla de protección. Esta diferencia de potencial genera una corriente galvánica que produce el efecto de protección del acero que irá disminuyendo hasta alcanzar el equilibrio y poder empezar con el proceso de polarización.

4. Esperar que se atenúe la corriente de corrosión galvánica ( $I$  de la malla por el tiempo de un día) . Esto conlleva a proteger catódicamente por inyección de corriente con una densidad de corriente constante de  $5 \text{ mA/m}^2$ .

Es decir, con este procedimiento preliminar disminuirémos el efecto de superposición de corrientes por actividad galvánica de la malla que actúa como ánodo.

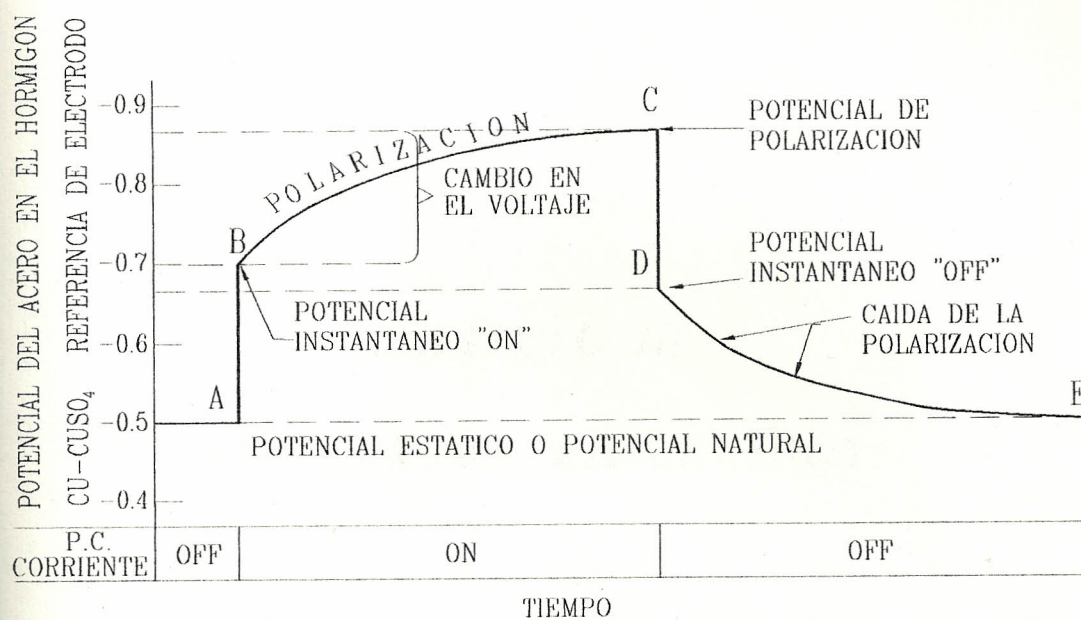
5. Una vez verificado que la corriente de protección ( $i_{\text{prot}}$ ) en el acople malla/varilla es mínima ( aproximadamente  $3 \text{ mA/m}^2$  ), proceder a prender el rectificador manteniendo la densidad de corriente ( $5 \text{ mA/m}^2$ ) hasta polarizar a  $-850 \text{ mV}$ .

6. En el instante en que es aplicada la corriente se produce un cambio en el potencial de la estructura con respecto al electrodo de referencia que deberá ser colocado en el hormigón en proximidad a la armadura .

7. La corriente de protección catódica hace que el potencial medido sea más negativo que el "potencial natural " antes de que la corriente sea aplicada y la cantidad en el cambio es una medida de la efectividad de la protección catódica . Existen dos

cambios básicos en el potencial, los cuales deben ser considerados. Uno cuando la protección es aplicada y otro cuando la corriente es interrumpida al apagar el rectificador, tal como se muestra en la figura 2.20.

8. Cuando la corriente es aplicada en el punto **A**, hay un cambio en el potencial y el instante en que la corriente es inyectada se representa por la línea **A-B**. El potencial en **B** lo llamaremos **potencial instantáneo "E<sub>on</sub>"** y es el potencial que alcanza el acero instantáneamente después de la aplicación de la corriente.
9. Como la corriente es aplicada continuamente, por un periodo de tiempo, el potencial continúa incrementándose negativamente, hasta llegar al potencial de protección catódica ( -850 mV ) **E<sub>prot</sub>**. Este cambio se llama "Polarización catódica" y se representa por la línea **B-C**.
10. Una vez que la estructura ha sido polarizada hasta alcanzar el potencial de protección catódica, apagaremos el rectificador, haciendo que el potencial de la estructura se vuelva menos negativo en el instante del apagado. Este cambio está representado por la línea **C-D**. El punto "**D**" se lo conoce como el **potencial instantáneo "E<sub>off</sub>"** pero es más negativo que el potencial natural y es en este punto donde empieza a decaer o a despolarizarse el acero de refuerzo hasta llegar a su potencial natural en el punto **E**.



**Figura 2.20** Potencial del Acero en el Hormigón versus tiempo de Polarización durante la Protección Catódica .

*CAPITULO III*  
*ANÁLISIS DE RESULTADOS*

### 3.1 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN.

Dentro de las propiedades analizadas se encuentran la Resistencia a la compresión, la porosidad, la densidad y el contenido en humedad del hormigón.

- Resistencia Mecánica.

Son muchos los factores que influyen en la resistencia alcanzada por un hormigón. Entre ellos se encuentran: la cantidad de cemento que es importante y con ella la relación agua / cemento.

En los Hormigones **A** la relación agua/ cemento utilizada fue 0.55, mientras que en los hormigones **B** fue de 1.1.

El contenido de cemento de un hormigón del tipo **A** es el doble que el de un hormigón tipo **B**.

El asentamiento medido durante la preparación de la mezcla da una idea de la resistencia mecánica que alcanzarán los dos tipos de hormigón con el transcurso del tiempo. Así en un hormigón del tipo **A** presentó un asentamiento de 6.3 cm, mientras que el del tipo **B** un asentamiento de 15 cm.

En los hormigones tipo **B** se utilizó menos cantidad de cemento y más cantidad de arena que en los del tipo **A**.

Todos estos factores deben ser considerados al interpretar los resultados de la resistencia mecánica alcanzada por los hormigones.

En la figura 3.1 se puede observar que el hormigón fue adquiriendo resistencia mecánica mientras transcurría los días de curado. La resistencia a la compresión en las probetas se midió a los 7, 14, 28, días .

Para los hormigones de alta resistencia los valores alcanzados varían desde 10 Mpa hasta 40 Mpa y los de baja resistencia presentan valores de resistencia mecánica entre los 3 Mpa y los 10 MPa .

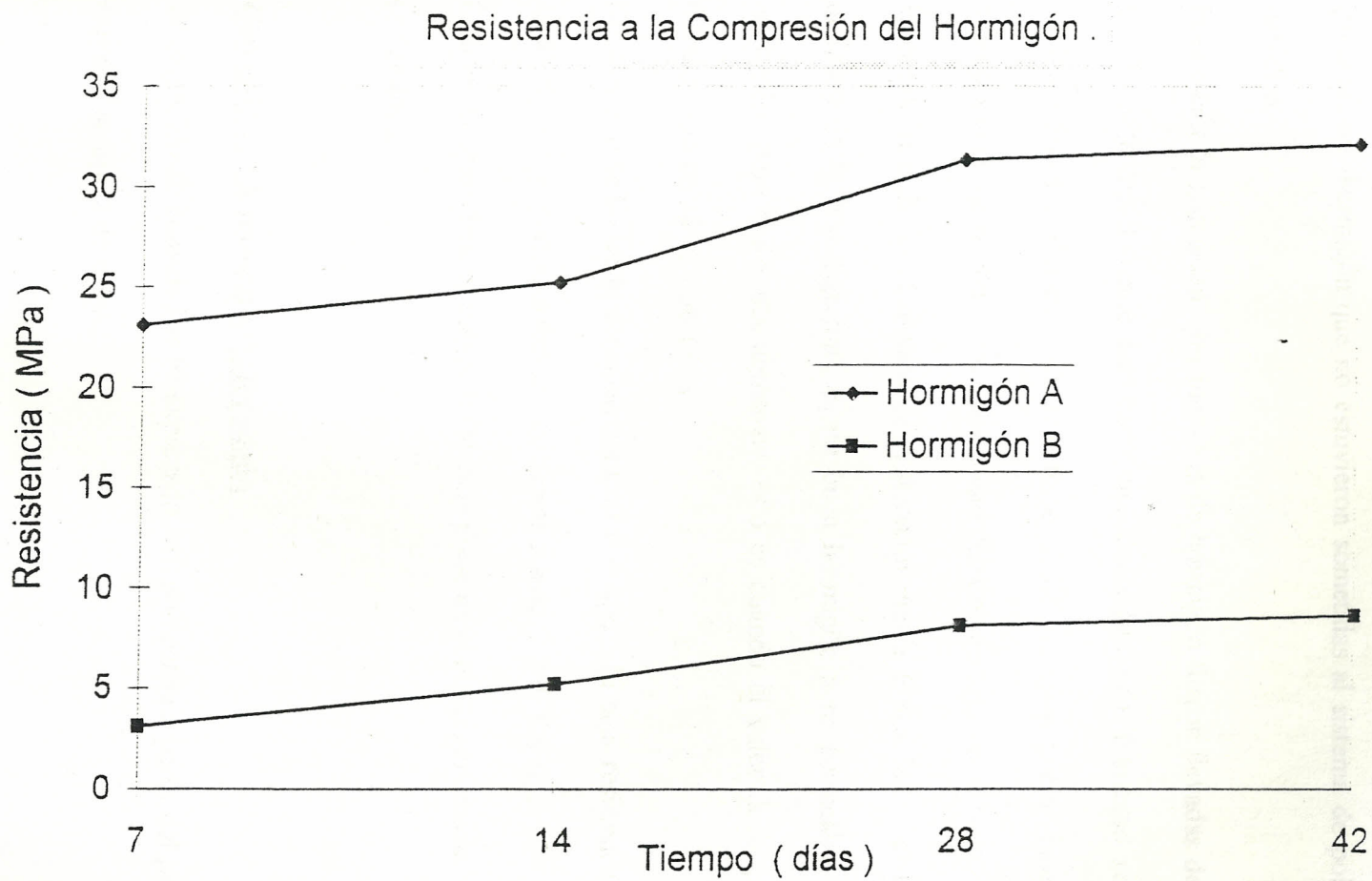


Figura 3.1 Variación de la Resistencia Mecánica del Hormigón.

- **Porosidad y Densidad del Hormigón**

En la determinación de la porosidad se utilizaron especímenes testigos, es decir probetas de hormigón que no estuvieron sometidas al sistema de polarización catódica.

Para medir la porosidad, las muestras de hormigón fueron llevadas desde una condición completamente seca hacia una condición de alta humedad relativa.

En los resultados obtenidos claramente se puede observar que un hormigón de alta resistencia presenta menor porosidad que uno de baja resistencia.

Haciendo uso de los Criterios de Valoración de la Porosidad el hormigón utilizado en la investigación es un buen hormigón pero permeable, y no es adecuado para ambientes agresivos, esto es cuando el valor de la porosidad fluctúa entre un 10 % y un 15 %.

El valor promedio de la densidad para un hormigón de baja resistencia fue de  $2,185 \text{ Kg/m}^3$  y para uno de alta resistencia fue de  $2,260 \text{ Kg/m}^3$ .

Esto indica que mientras mayor resistencia presente el hormigón mayor será su densidad.

- **Contenido en humedad del Hormigón**

El contenido de humedad se ha expresado en porcentaje a partir del peso de la muestra saturada de agua.

### PORCENTAJE DE SATURACION DEL HORMIGÓN

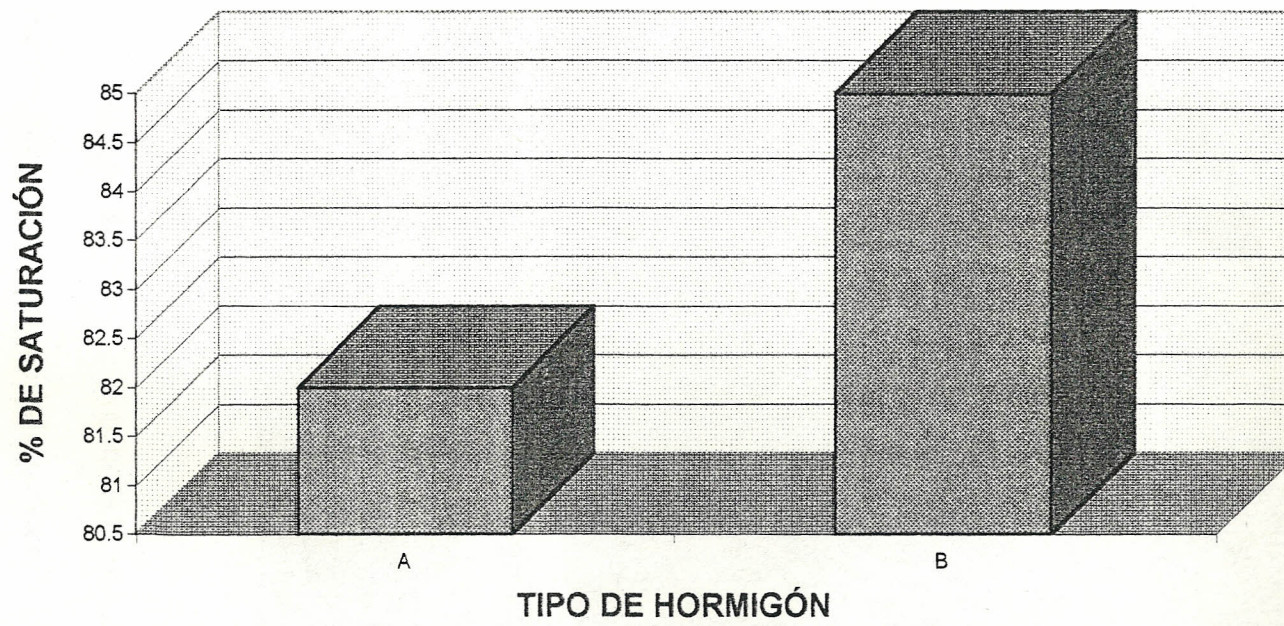
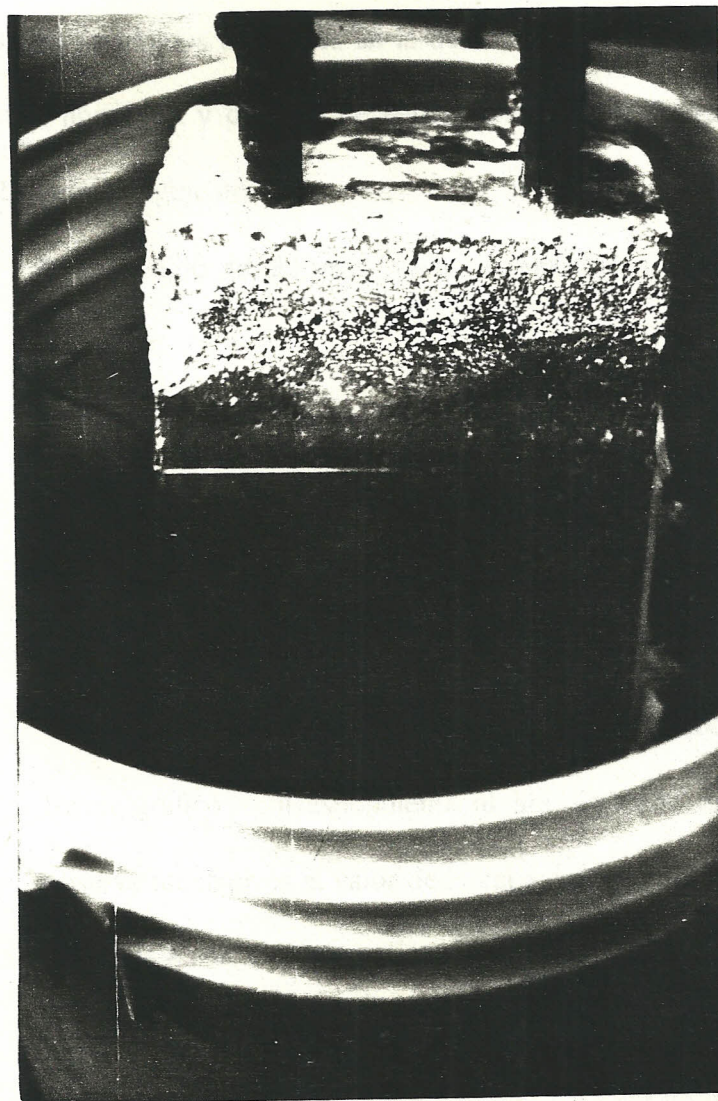


Figura 3.2 A Porcentaje de Saturación del Hormigón .



**Figura 3.2 B**      Probeta de Hormigón en ambiente salino.

Es evidente que el hormigón de baja resistencia presenta un mayor porcentaje de saturación, pues por su permeabilidad, le es más fácil absorber al agua del medio que el hormigón de alta resistencia ( baja permeabilidad )

### 3.2 PRUEBAS QUÍMICAS.

- Contenido de Cloruros .

De los resultados obtenidos en la determinación del contenido de cloruros en el hormigón y después de aplicar los criterios de valoración se puede observar lo siguiente:

- El contenido de cloruros se ha expresado en porcentaje en peso de hormigón .
- El contenido de cloruros en los dos tipos de hormigón es mayor desde afuera hacia adentro del recubrimiento . Esto verifica el criterio del proceso de difusión de los cloruros.
- Para determinar el perfil de cloruros se extrayeron muestras de tres capas del hormigón, desde el exterior hasta el interior de la probeta.
- En el gráfico correspondiente al hormigón de baja resistencia se observa un error en el valor de la capa externa, esto se puede atribuir a un error en la titulación durante la determinación del contenido de cloruros.
- En el hormigón de mayor resistencia , el proceso de difusión ha sido más lento que en el de baja resistencia .

Después de romper las probetas para su análisis se ha observado el estado que presentan las varillas de acero y se han tomado unas macrografías , en las cuales se puede observar claramente los puntos de corrosión

provocados por la presencia de iones cloruro en esas zonas. Esta corrosión es de tipo localizada.

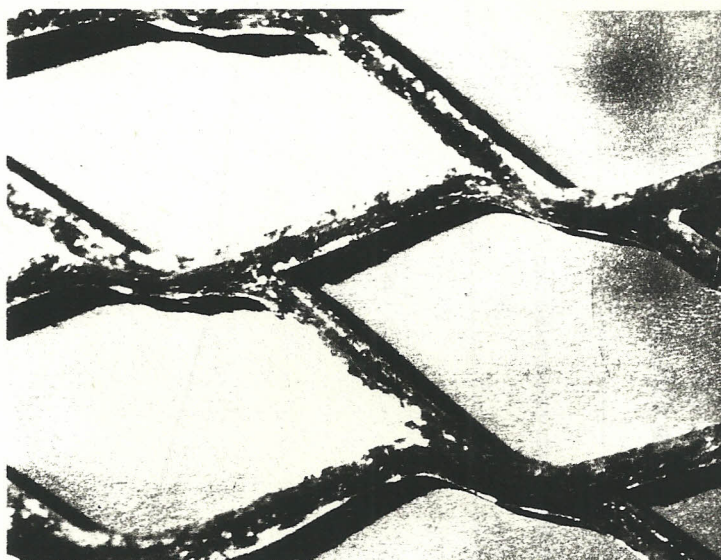
El tiempo que tardarán los cloruros en llegar hasta la armadura o " periodo de iniciación " depende de :

- la concentración de cloruros en el medio exterior.
- calidad del hormigón : tipo de cemento, relación agua/cemento, etc.
- temperatura
- ancho y número de fisuras



**Figura 3.3** . Macrografía tomada a la varilla de acero después de 7 meses, dichos punto negros representan la corrosión presente en el acero de refuerzo.

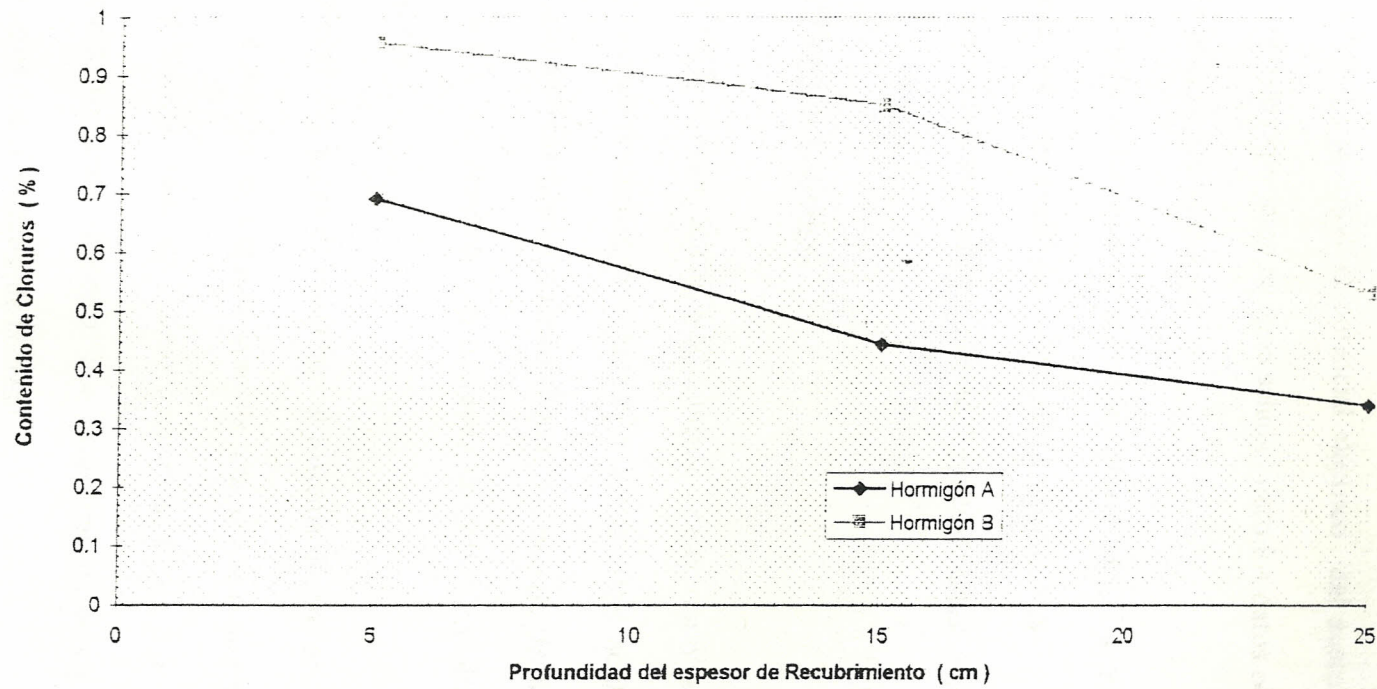
También es muy interesante observar el estado final de la malla que actuó como ánodo. En la macrografía ( Figura 3.4 ) se observa el desgaste de la malla así como también manchas de corrosión. Las manchas blancas corresponden a restos de hormigón.



**Figura 3.4** . Macrografía tomada a la malla que actuó como ánodo.

La disminución del contenido de cloruros desde el exterior del recubrimiento hacia el acero de refuerzo, se debe a que durante el proceso de curado del hormigón, los poros tienen un tamaño considerable, y a medida que pasa el tiempo el hormigón va ganando resistencia mecánica y los poros se van cerrando; esto hace más lento el proceso de difusión de los iones cloruros hacia el interior del hormigón, y de ahí la respuesta a nuestros resultados.

PERFIL DEL CONTENIDO DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN



Muestra 1: hormigón de la capa externa de la probeta ( 5 cm )

Muestra 2: hormigón de la capa intermedia ( 15 cm )

Muestra 3: hormigón de la capa interior de la probeta ( 25 cm )

Figura N° 3.5 Perfil del Contenido de Cloruros en el Hormigón

### 3.3 PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS .

- **Medición de Potenciales**

Es difícil cuantificar el potencial eléctrico del acero alcanzado durante el tiempo de exposición en agua salada, pero los datos obtenidos dan una idea de cómo varía el mismo .

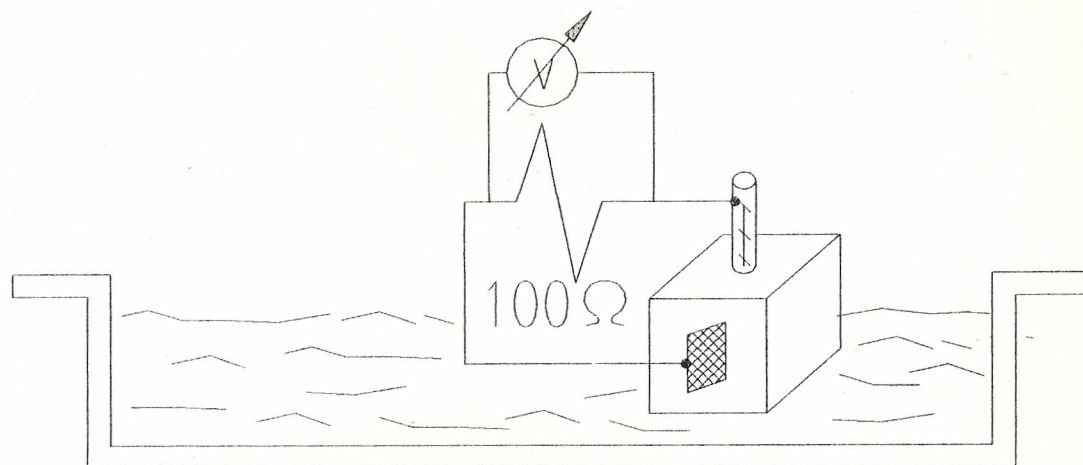
Las lecturas tomadas un potencial natural para el acero de  $-550$  mV y un potencial promedio de  $-700$  mV después de 7 meses de exposición ( lectura tomada inmediatamente después de sacar la probeta del agua ) .

- **Polarización Catódica.**

Una varilla puede actuar anódicamente respecto a otras y corroerse dentro de una celda de corrosión . Este tipo de corrosión se dio antes de iniciar el proceso de polarización cuando al cerrar el circuito de la celda sin conectar el rectificador se observó que a través de éste circulaba una corriente de corrosión.

Efectivamente, antes de conectar el Sistema de protección Catódica , si se cierra el circuito conectando la malla con el acero de refuerzo a través de una resistencia eléctrica como muestra la figura 3.6 y valiéndose de un voltímetro se puede observar que existe una diferencia de potencial inicial entre estos dos elementos de la celda.

Esta diferencia de potenciales naturales genera una corriente de corrosión galvánica



**Figura 3.6** Acople malla/ acero de refuerzo para determinar corriente de corrosión galvánica.

La malla utilizada en esta prueba fue de acero galvanizado.

Mientras la varilla actúa como un cátodo, la malla de acero galvanizado actúa como ánodo, produciéndose una protección catódica galvánica que irá disminuyendo con el tiempo hasta que los dos lleguen a un equilibrio, pues la densidad de corriente de protección no es constante como se muestra y el comportamiento tanto de la malla como el de la varilla de acero se muestra en la figura 3.7.

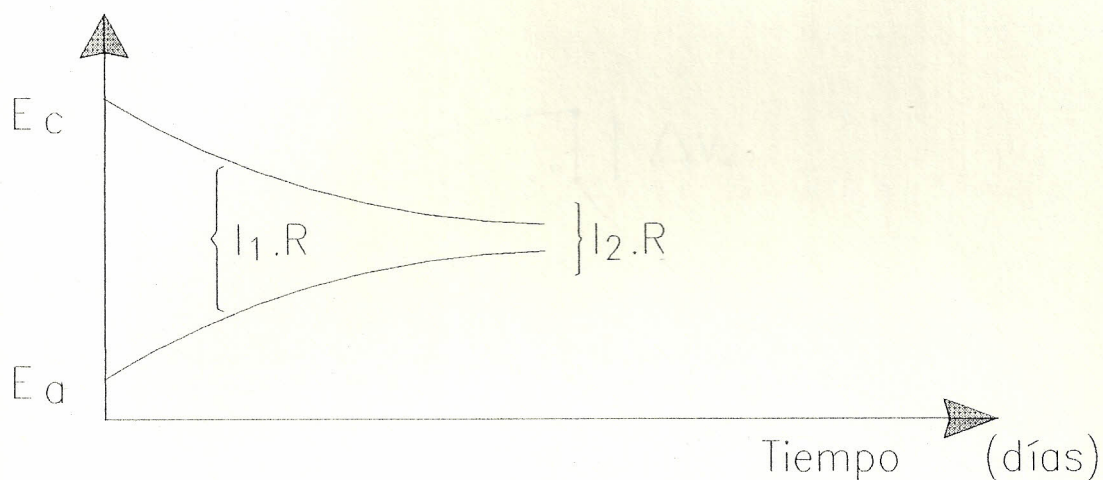
TABLA XXIII

VARIACIÓN DE LA CORRIENTE DE CORROSIÓN GALVÁNICA ENTRE LA MALLA Y EL ACERO DE REFUERZO.

Probeta	Resistencia Eléctrica ( $\Omega$ )	Eo ( mV )	Dco (mA/m <sup>2</sup> )	Io ( mA )	Ef ( mV )	Dcf ( mA/m <sup>2</sup> )	If (mA )
A2	100	106	17.35	1,06	0.023	3.76 X10 <sup>-3</sup>	2.3 x10 <sup>-4</sup>
B2	100	64	10.48	0.64	0.035	5.73x10 <sup>-3</sup>	3.5x10 <sup>-4</sup>
B3	100	27	4.42	0.27	0.054	8.84X10 <sup>-3</sup>	5.4X10 <sup>-4</sup>
B4	100	84	13.75	0.84	0.062	10.15x10 <sup>-3</sup>	6.2X10 <sup>-4</sup>

donde:

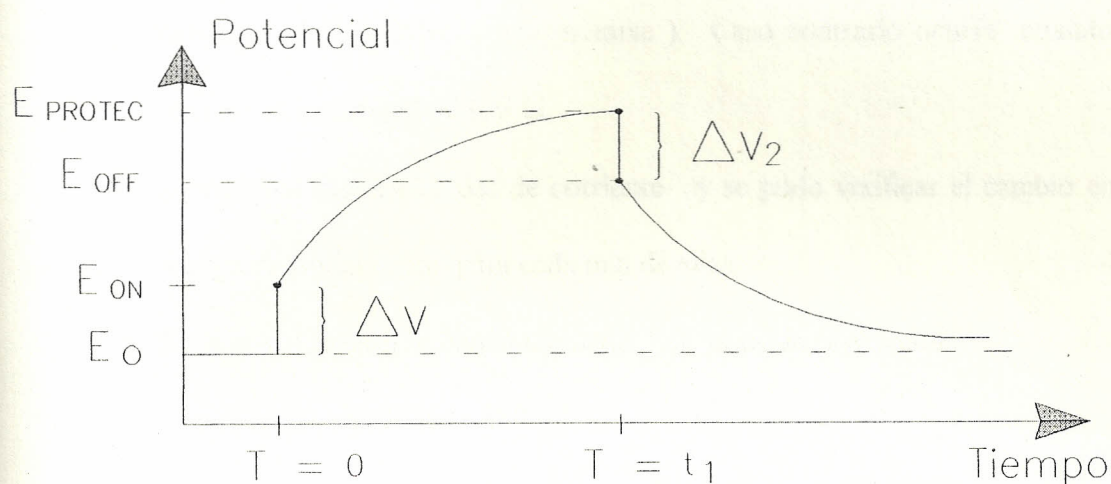
- Eo : Diferencia de Potencial inicial ( mV )
- Dco : Densidad de corriente inicial ( mA/m<sup>2</sup> )
- Io : corriente inicial mA
- Ef : Diferencia de potencial final ( mV )
- Dcf : Densidad de corriente final ( mA / m<sup>2</sup> )
- If : corriente final. ( mA )



**Figura 3.7** Disminución de la corriente de corrosión galvánica antes de la polarización del acero

En las pruebas se ha determinado esperar un día para que se atenúe esa corriente de corrosión galvánica y después de ese tiempo conectar el Sistema de Protección catódica y empezar a polarizar el acero mediante la inyección de corriente. En los resultados también se puede observar que :

- Mientras mayor sea el voltaje de salida de la fuente ( rectificador de corriente ) las variaciones de potencial eléctrico  $\Delta V_1$  y  $\Delta V_2$  serán mayores; esto se debe a que al aumentar el voltaje de salida lo que se logra es que aumente la corriente de protección .



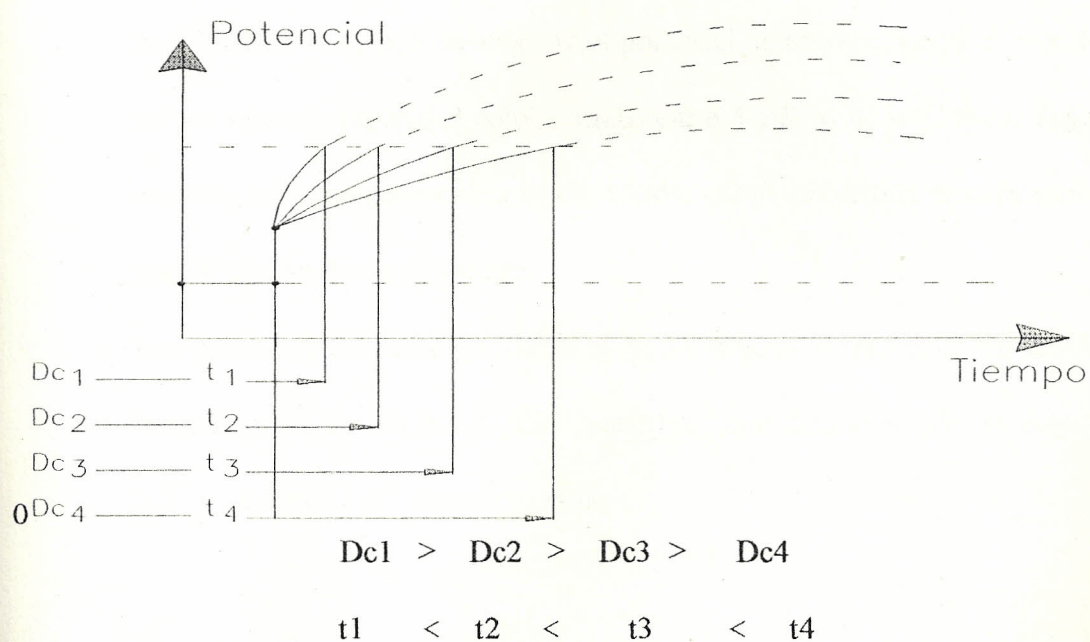
**Figura 3.8** Polarización del acero y caídas en el voltaje de Polarización .

Como el flujo de corriente  $I$  está relacionado con la cantidad de electrones que van a polarizar la estructura ( acero de refuerzo ), a mayor corriente mayor será la cantidad de electrones que viajarán a depositarse sobre la superficie de la varilla alcanzando rápidamente el potencial de protección.

- Este voltaje de salida también influye en el tiempo de polarización , es así como se observa que mientras mayor sea el voltaje de salida menor será el tiempo que la estructura necesita para alcanzar la polarización .
- Los electrones tienden a moverse por donde haya menor resistencia eléctrica; es por esta razón que cuando se coloca una resistencia mayor ( por ejemplo  $100 \text{ k}\Omega$  ), el tiempo de polarización es muy alto y la varilla de acero tarda en

cargarse eléctricamente ( polarizarse ). Caso contrario ocurre cuando la resistencia es de apenas  $100 \Omega$ .

- Se variaron las densidades de corriente y se pudo verificar el cambio en el tiempo de polarización para cada una de ellas.
- En la investigación se han combinado 2 criterios de protección:
  - el de los  $-850 \text{ mV}$
  - las caídas de voltaje mediante ensayos ON/OFF
- A medida que aumenta la densidad de corriente se puede observar que es más rápido llegar a potenciales de protección ; esto es el tiempo de polarización catódica se vuelve más corto.



**Figura 3.9** Variación en la Corriente de Polarización Catódica

- Cuando el potencial medido está por encima de los  $-1100$  mV se empieza a generar evolución de hidrógeno ( ampollamiento) , produciéndose un efecto de corrosión sobre el acero. Esto es lo que se llama una Sobreprotección .

Por esta razón la densidad de corriente es un factor que debe ser controlado.

- La primera pregunta formulada al comienzo de la investigación fue: ¿ Qué cantidad de corriente se debe utilizar para alcanzar el potencial de protección sin tener que llegar a una sobreprotección del acero ?.

Entonces se varió el voltaje de salida del rectificador desde valores altos ( 5 voltios ) hasta valores bajos ( 1 voltio) con intervalos de 0,5 voltios .

Lo que se observó fue que mientras mayor era el voltaje de salida del rectificador el tiempo en alcanzar el potencial de protección era más corto , así por ejemplo cuando el voltaje estaba entre 4 y 5 voltios el acero llegaba en poco tiempo a potenciales entre  $-1100$  y  $-1300$  milivoltios en cada caso y seguía creciendo negativamente.

- Los valores de corriente utilizados en la investigación para polarizar el acero estuvieron entre los 0.2 y 0.3 amperios , con densidades de corriente de 3.3 y 4.9 mA / m<sup>2</sup> respectivamente .

- Hemos escogido  $5 \text{ mA/m}^2$  como densidad apropiada, porque después de los ensayos realizados se ha comprobado que es la mínima cantidad de corriente necesaria para proteger catódicamente el acero permitiéndonos alcanzar el potencial de protección después de dos días de exposición y manteniéndose invariable durante una semana .

El voltaje de salida del rectificador es uno de los principales parámetros al momento de determinar la mínima cantidad de corriente que necesitamos para proteger al acero de la corrosión.

- Es así como se fueron variando los voltajes de salida y con ello la densidad de corriente , también las resistencias eléctricas.
- Empezamos por un voltaje alto ( 7.5 Voltios ) que nos representaba una Densidad de corriente (  $D_c = 1200 \text{ mA/m}^2$  ) y en solo dos minutos alcanzó el acero lo  $-850 \text{ mV}$  , pero este potencial siguió incrementándose negativamente .

Este criterio nos sirvió para determinar la mínima cantidad de corriente necesaria para proteger catódicamente una estructura de hormigón armado.

Si mayor es la cantidad de corriente suplida por el rectificador mayor será la variación en el voltaje respecto al potencial natural.

Para cada voltaje de salida del rectificador hay una densidad de corriente aplicada .

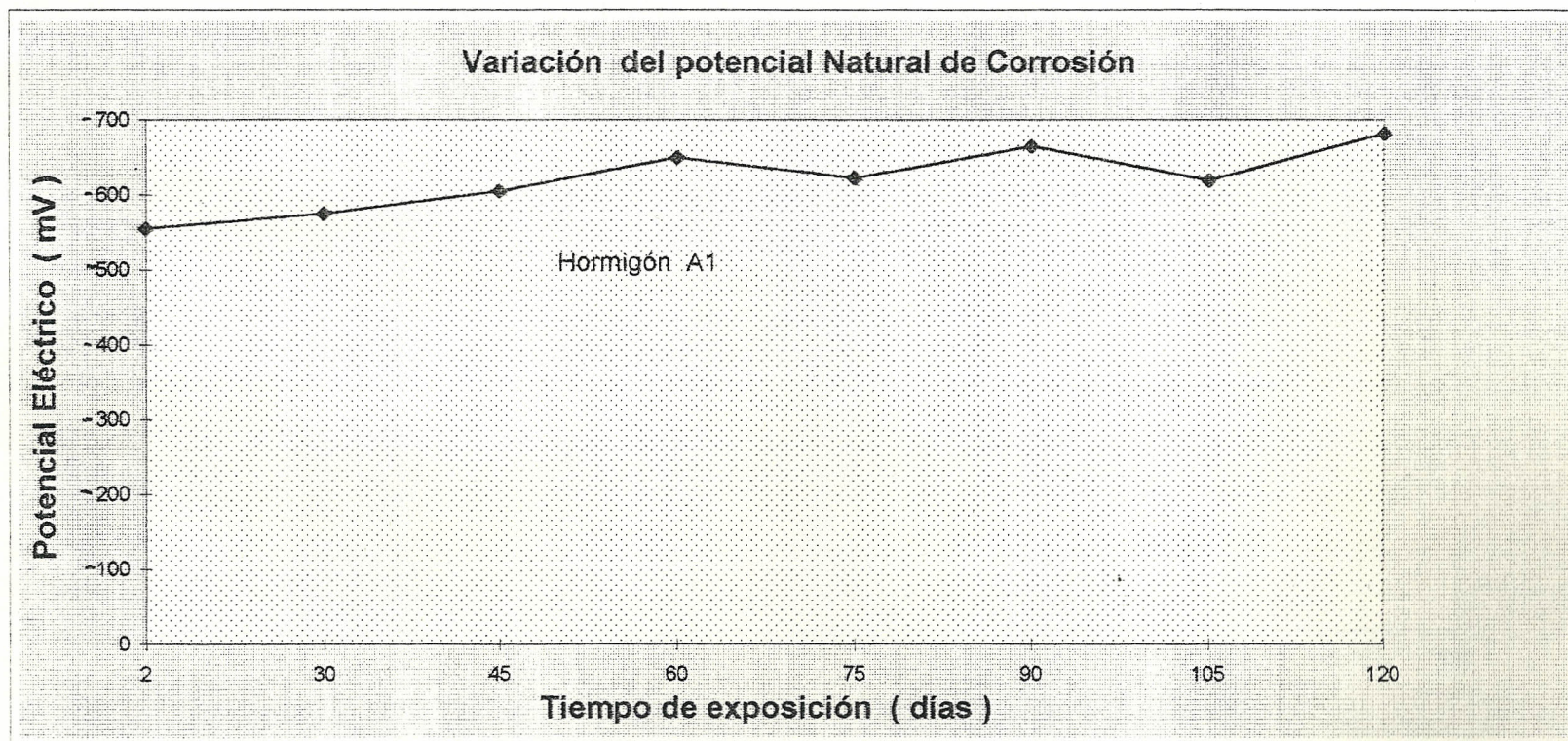
- Mantener la densidad de corriente constante fue uno de los requerimientos de nuestro sistema y uno de los inconvenientes con el que nos encontramos , para ello

el valor de la resistencia eléctrica juega un papel importante , pues su valor influye en la resistencia eléctrica total del circuito al paso de la corriente .

- Las unidades utilizadas para expresar la densidad de corriente son los miliamperios por metro cuadrado ( mA / m<sup>2</sup> ) , pero para conversiones es necesario conocer que:

$$1 \text{ mA} / \text{m}^2 = 0,1 \text{ } \mu\text{A} / \text{cm}^2$$

- Como las densidades de corriente que manejamos son muy pequeñas , en el orden de los 5 mA / m<sup>2</sup> ( 0.5  $\mu\text{A} / \text{cm}^2$  ) ; éstas se ven influenciadas por las caídas de voltaje del medio que rodea nuestro sistema ( por ejemplo si se prende un ventilador , una lámpara , un motor un acondicionador de aire , etc ) . Por ello se tuvo que cambiar la resistencia eléctrica de 100 ohmios utilizada al comienzo de la investigación por una de 3920 ohmios, que sí nos permitió lograr nuestro objetivo : el mantener la densidad de corriente constante ( 5 mA / m<sup>2</sup> ) .



Electrodo de referencia : Cu/CuSO<sub>4</sub>  
Medio agresivo : agua salada (ClNa al 3 % )

Figura 3.10 Potencial Natural de Corrosión ( Probeta A1 )

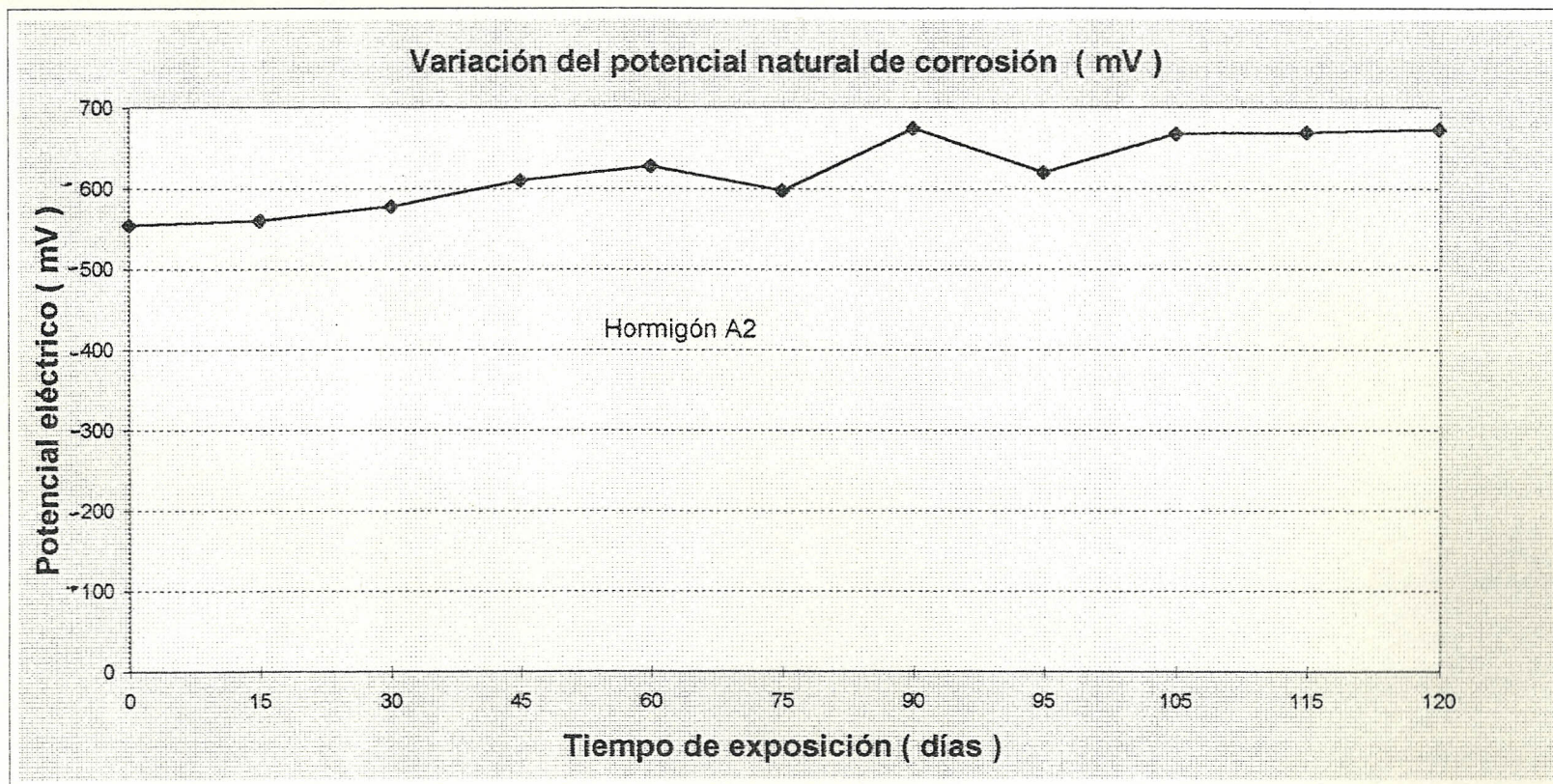
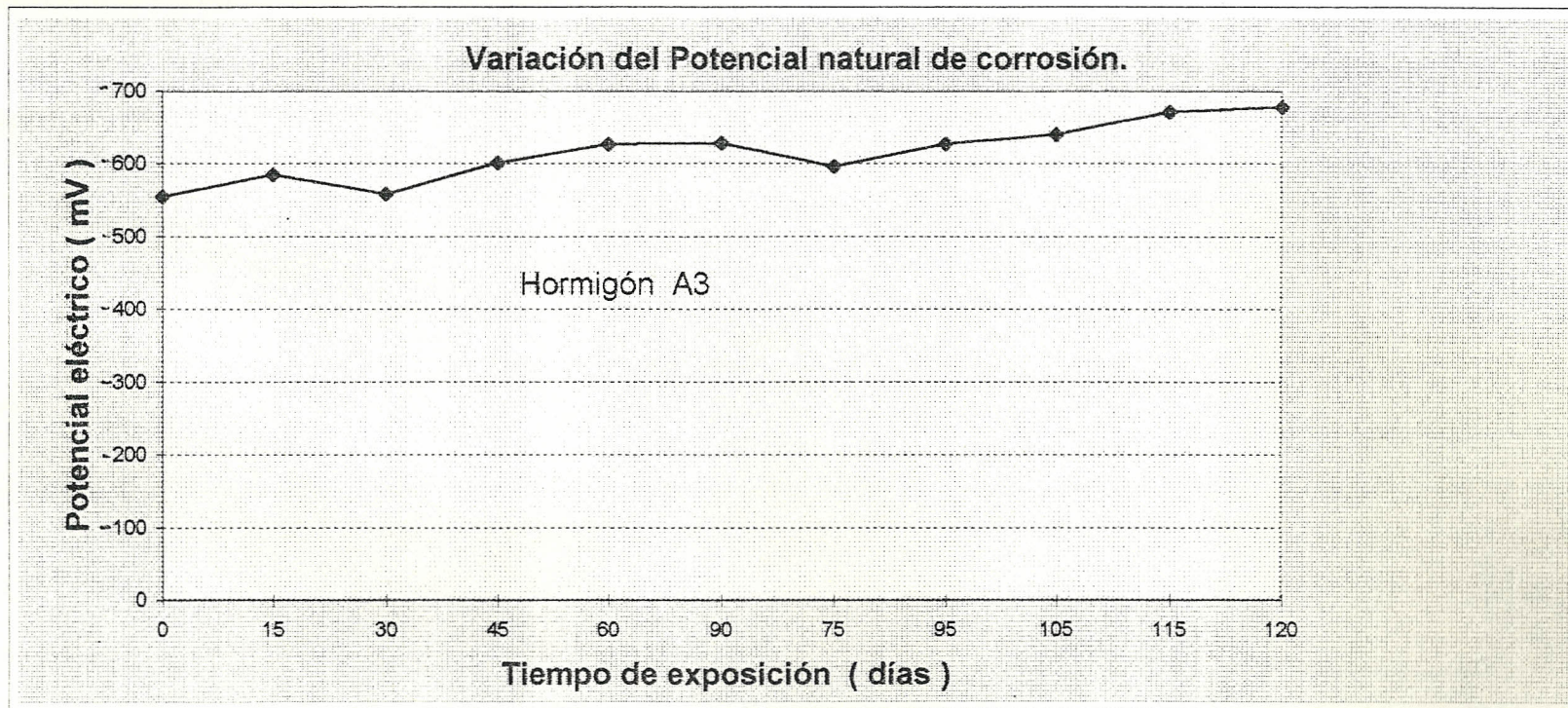


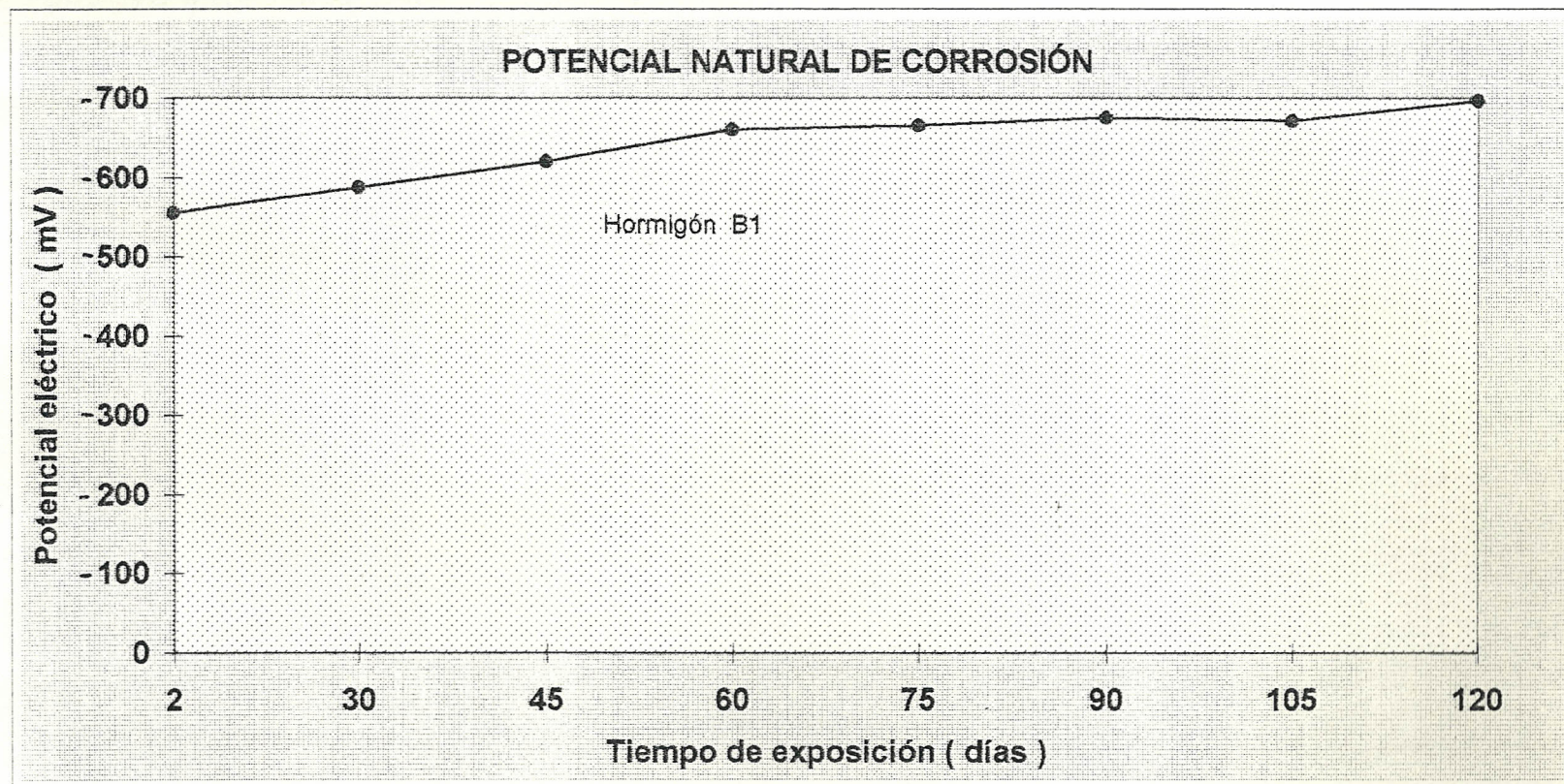
Figura N°3.11 Potencial natural de corrosión ( Probeta A2 )

311



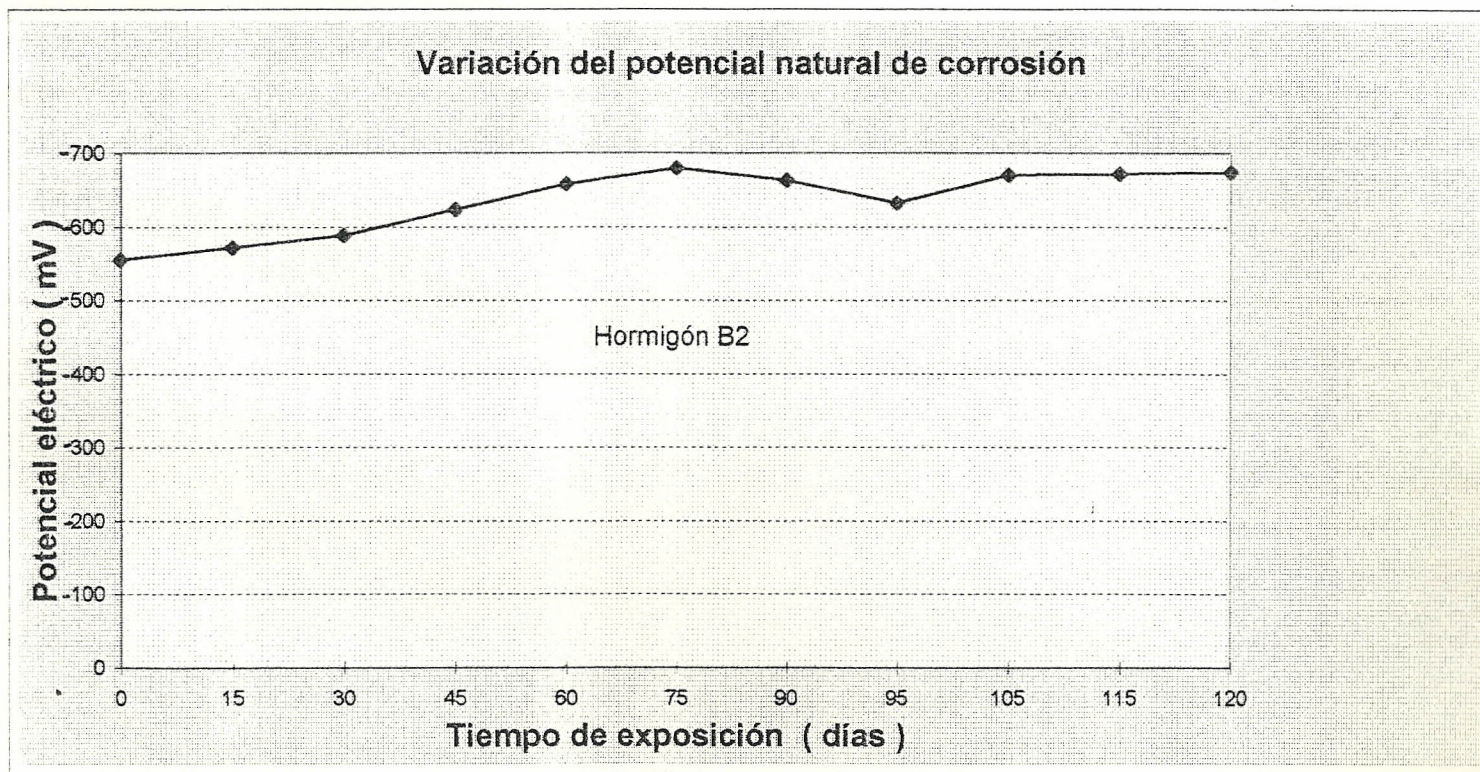
Electrodo de Referencia : Cu/ CuSO<sub>4</sub>  
 Medio agresivo : agua salada ( ClNa al 3 % )

Figura 3.12 Potencial Natural de corrosión ( Probeta A3 )



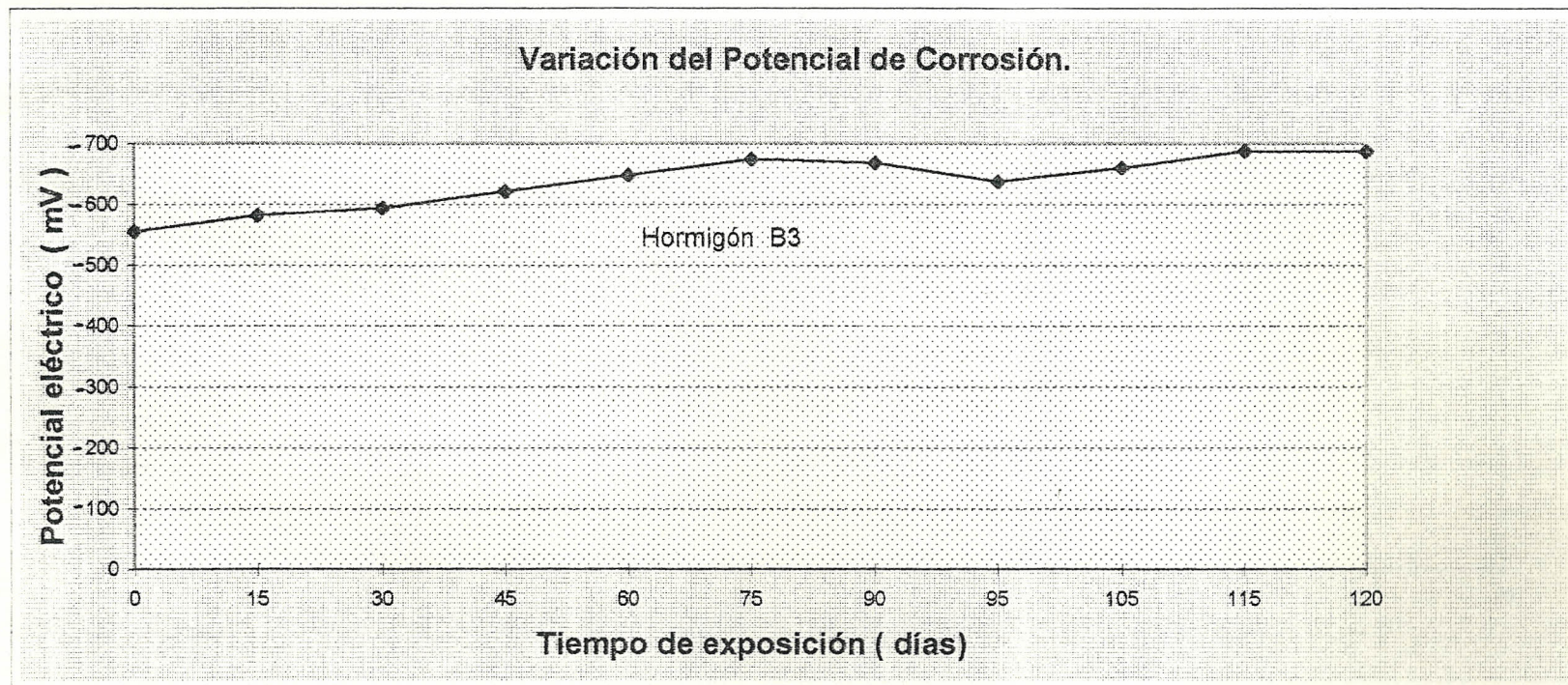
Electrodo de referencia : Cu/CuSO<sub>4</sub>  
Medio agresivo : agua salada ( ClNa al 3% )

Figura 3.13 Potencial Natural de corrosión ( Probeta B1 )



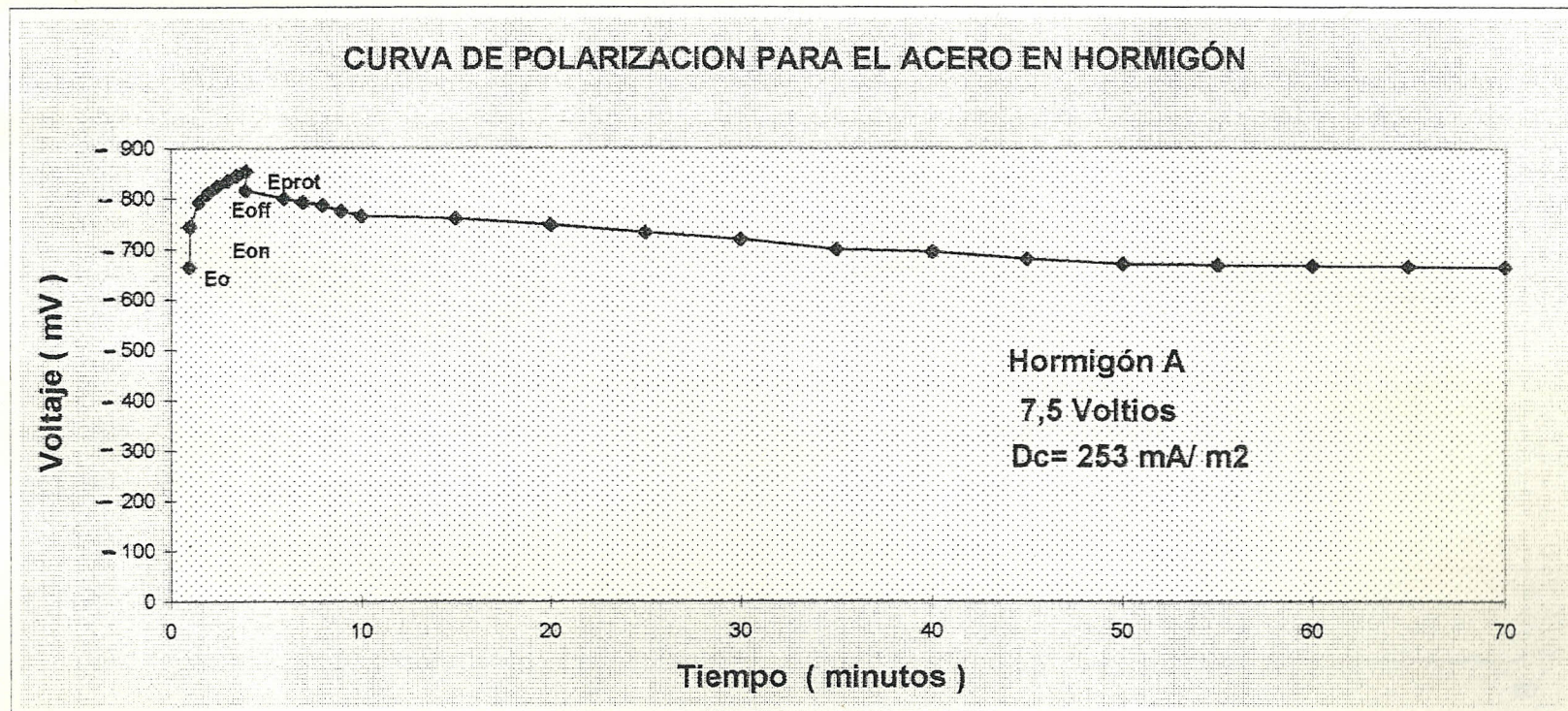
Electrodo de Referencia : Cu / CuSO<sub>4</sub>  
Medio agresivo : agua salada ( ClNa al 3 % )

Figura 3.14 Potencial Natural de corrosión ( Probeta B2 )



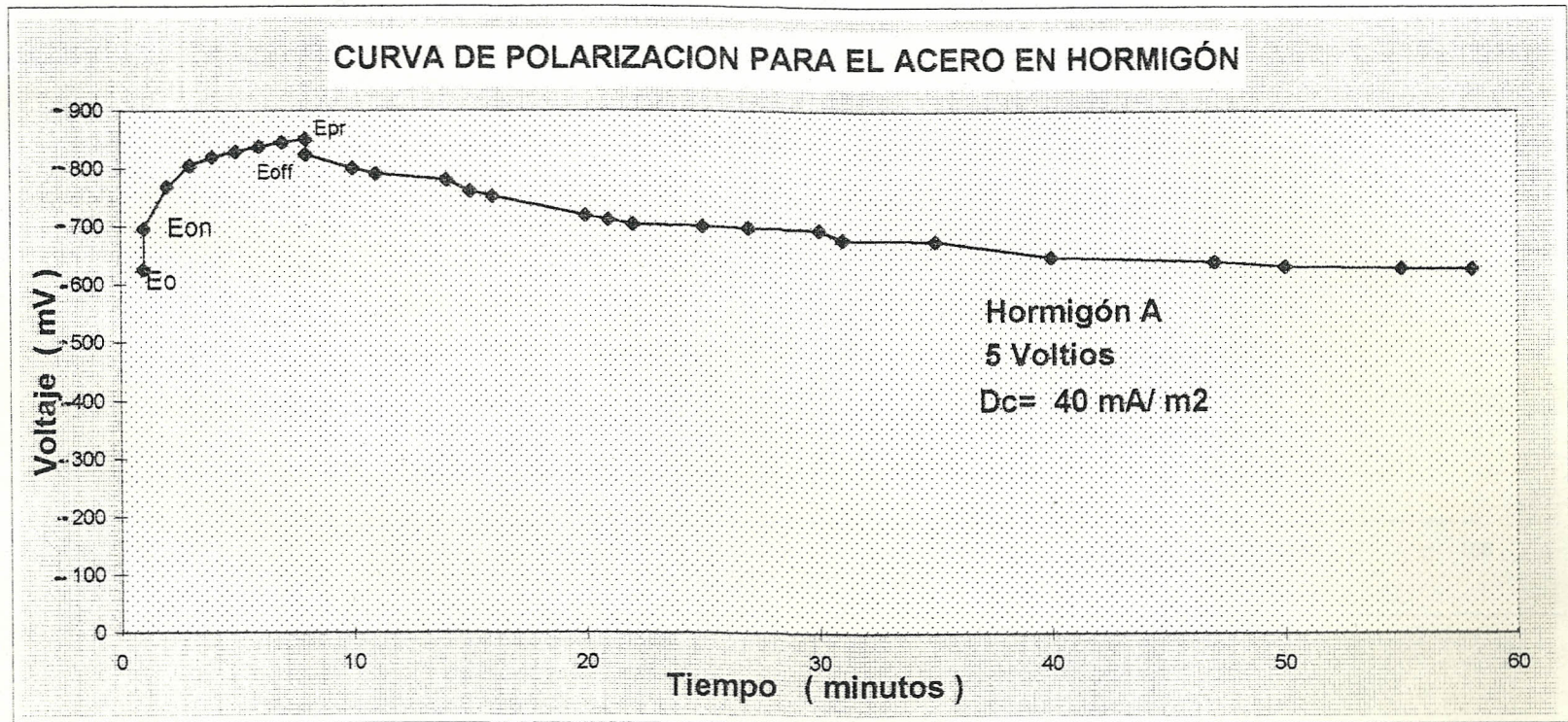
Electrodo de referencia : Cu / Cu SO<sub>4</sub>  
Medio agresivo : agua salada ( Cl Na al 3 % )

Figura 3.15 Potencial Natural de Corrosión ( Probeta B3 )



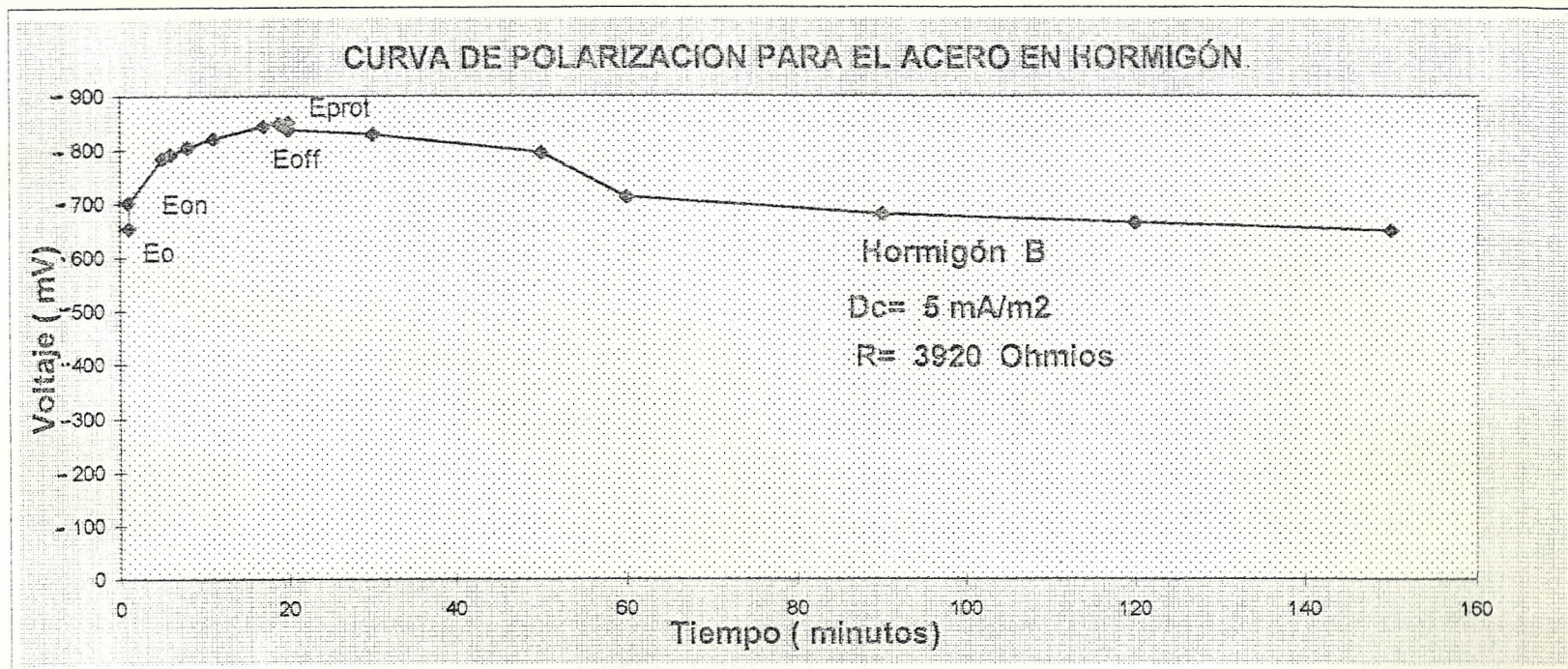
Voltaje de salida del rectificador : 7,5 Voltios  
 Probeta : Hormigón A  
 Tiempo de Polarización : 4 minutos  
 Tiempo de despolarización : 66 minutos  
 Caída de Voltaje 1 : 0.080 V  
 Caída de Voltaje 2 : 0.038 V  
 Resistencia Eléctrica : 100 Ohmios

**Figura 3.16 Curva de Polarización del acero en hormigón.**  
**( Dc = 253 mA/m2 Hormigón A )**



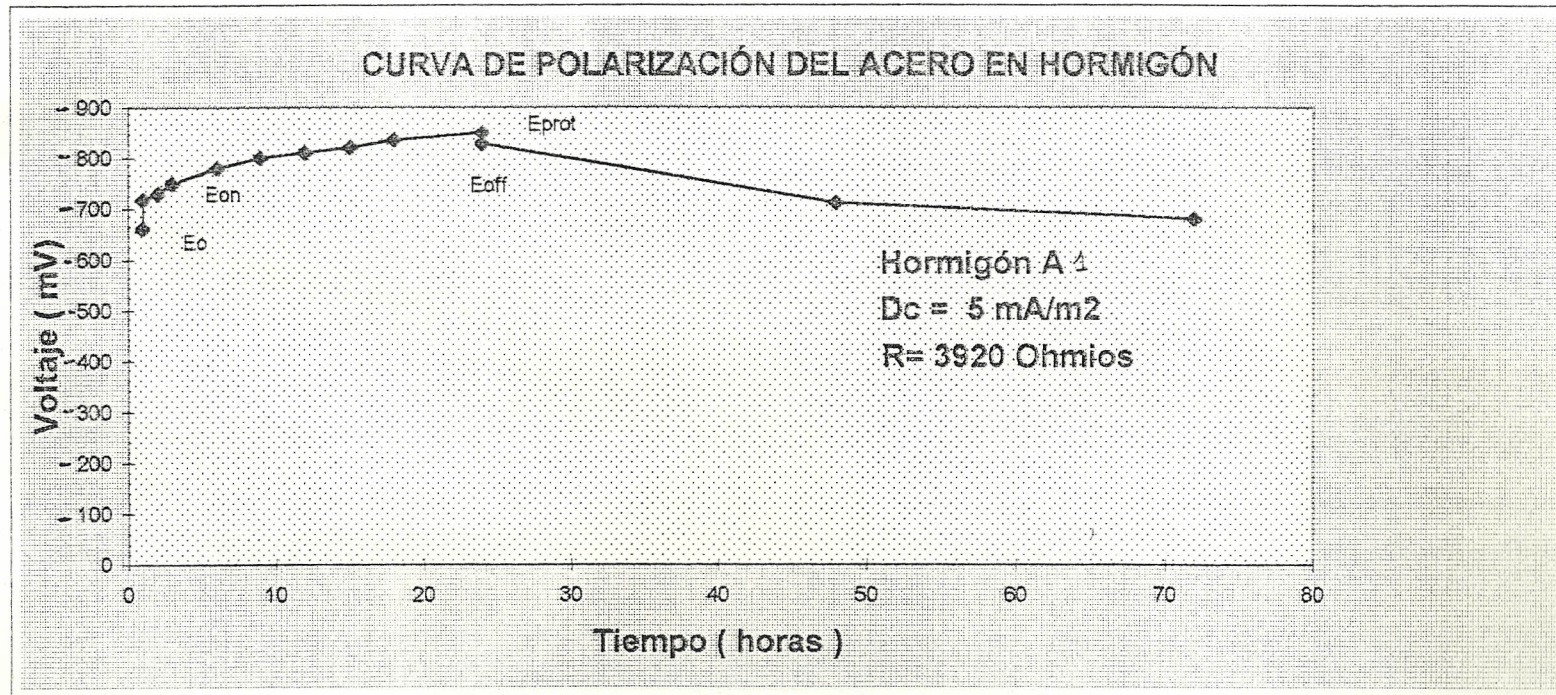
Voltaje de salida del rectificador : 5 V  
 Probeta: Hormigón A  
 Tiempo de Polarización : 8 minutos  
 Tiempo de despolarización : 50 minutos  
 Caída de voltaje 1: 0.070 V  
 Caída de voltaje 2 : 0.026 V

**Figura 3.17** Curva de Polarización del acero en hormigón  
 ( Dc= 40 mA /m2      Hormigón A )



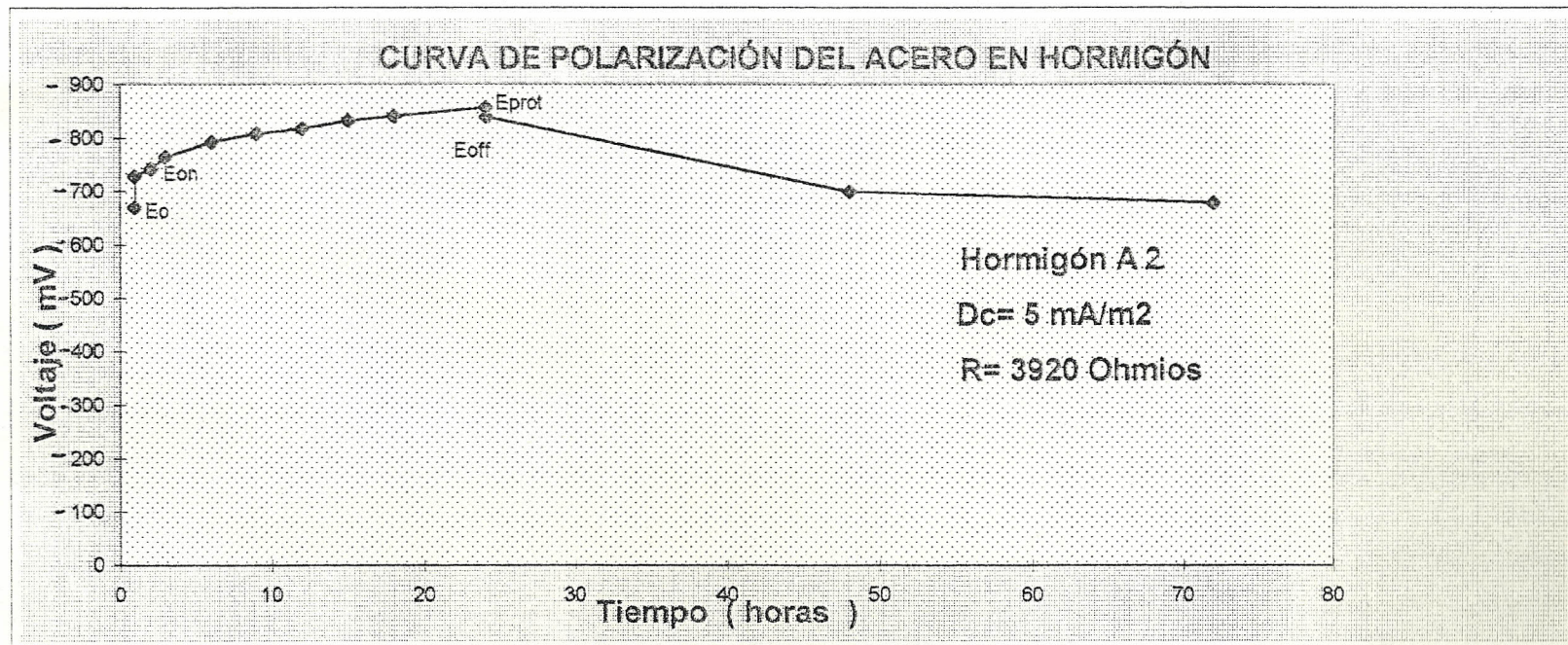
Voltaje de salida del Rectificador : 5 Voltios  
 Probeta: Hormigón B  
 Tiempo de polarización : 20 minutos  
 Tiempo de despolarización : 140 minutos  
 Caída de Voltaje 1: 0.048 V  
 Caída de Voltaje 2 : 0.014 V  
 Resistencia eléctrica : 3920 Ohmios

Figura 3.18 Curva de Polarización del acero en Hormigón .  
 ( Dc = 5 mA/ m<sup>2</sup> Hormigón B2 )



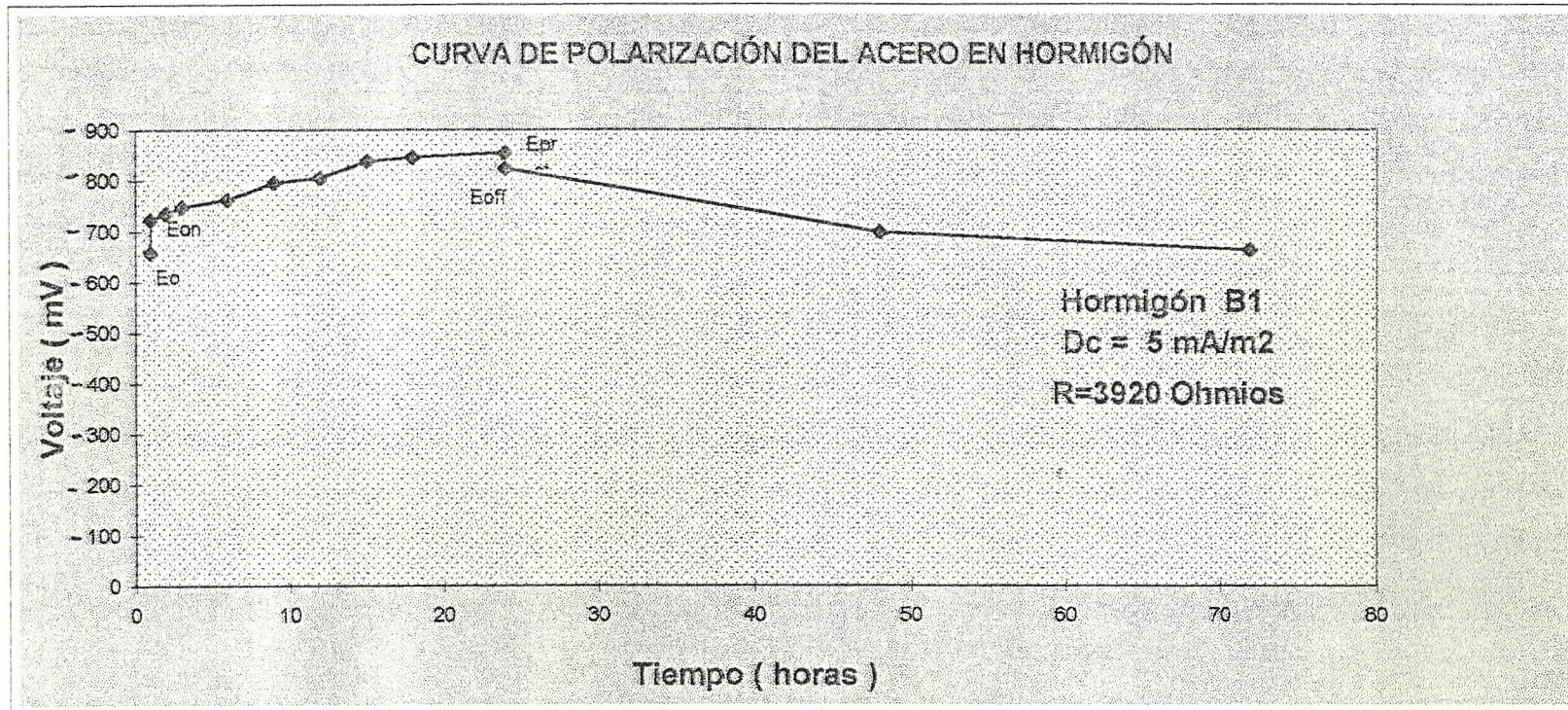
Electrodo de referencia : Cu/CuSO<sub>4</sub>  
 Caída de Voltaje 1 = E<sub>o</sub> - E<sub>on</sub> = 0.056 V  
 Caída de Voltaje 2 = E<sub>off</sub> - E<sub>prot</sub> = 0.022 V  
 Probeta: Hormigón A 1  
 Tiempo de Polarización : 24 horas  
 Tiempo de despolarización : 48 horas

Figura 3.19 Curva de Polarización del acero en hormigón  
 ( Dc = 5 mA/m<sup>2</sup> Hormigón A1 )



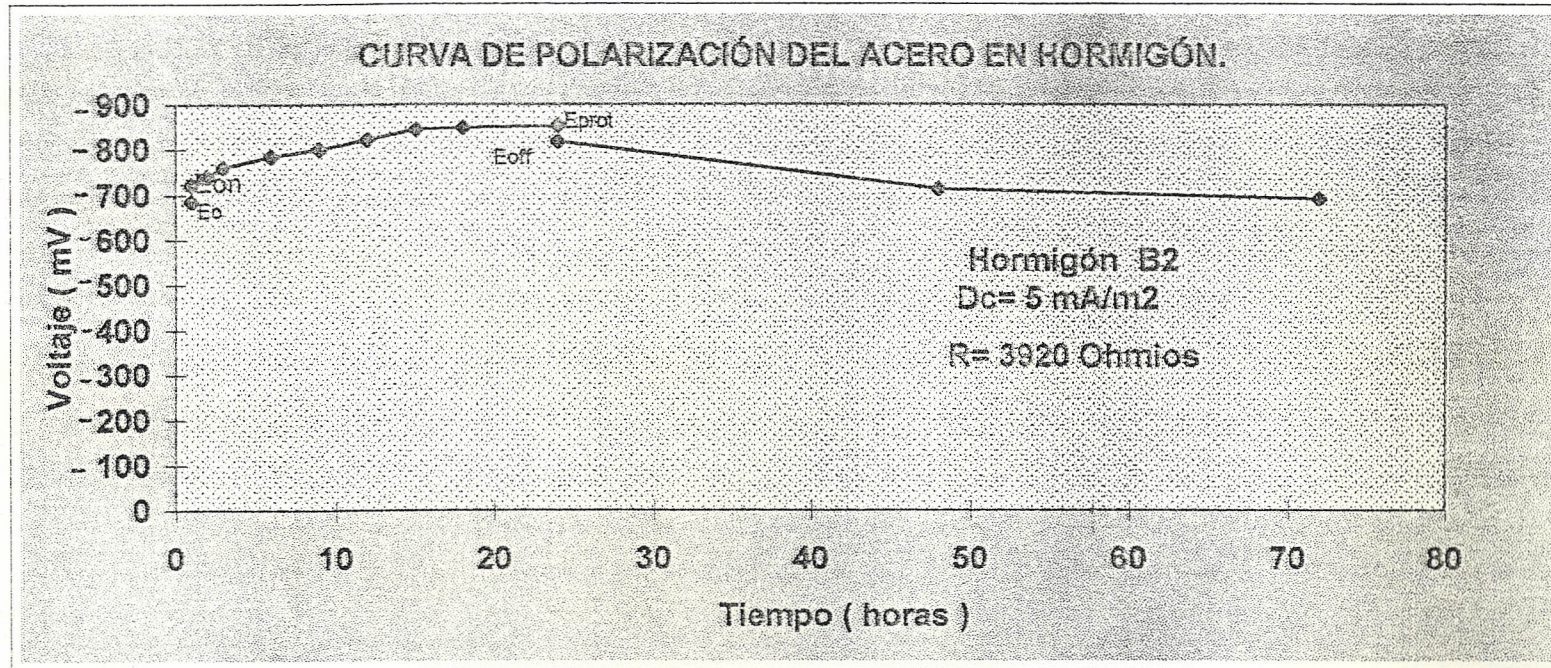
Electrodo de Referencia : Cu/CuSO4  
 Densidad de Corriente : 5 mA/m<sup>2</sup>  
 Caída de Voltaje 1 :  $E_o - E_{on} = 0.058 \text{ V}$   
 Caída de Voltaje 2 :  $E_{off} - E_{prot} = 0.018 \text{ mV}$   
 Probeta : Hormigón A2  
 Tiempo de Polarización : 24 horas  
 Tiempo de despolarización : 48 horas

**Figura 3.20 Curva de Polarización del acero en Hormigón**  
 (  $D_c = 5 \text{ mA/m}^2$  Hormigón A2 )



Electrodo de Referencia : Cu /CuSO4  
 Densidad de Corriente : 5 mA/m2  
 Caída de Voltaje 1 :  $E_o - E_{on} = 0.065 \text{ V}$   
 Caída de Voltaje 2 :  $E_{off} - E_{prot} = 0.030 \text{ V}$   
 Probeta : Hormigón B1  
 Tiempo de Polarización : 24 Horas  
 Tiempo de despolarización : 48 Horas

Figura 3.21 Curva de Polarización del acero en hormigón .



Electrodo de referencia : Cu/CuSO<sub>4</sub>  
 Densidad de Corriente = 5 mA/m<sup>2</sup>  
 Caída de Voltaje 1 =  $E_o - E_{on} = 0.037$  V  
 Caída de Voltaje 2 =  $E_{off} - E_{prot} = 0.035$  V  
 Probeta: Hormigón B2  
 Tiempo de Polarización : 24 Horas  
 Tiempo de despolarización : 48 Horas

**Figura 3.22** Curva de Polarización del acero en hormigón  
 ( Dc = 5 mA/m<sup>2</sup> Hormigón B2 )

## CONCLUSIONES

### CAPITULO IV

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### IV CONCLUSIONES

1. Los Sistemas de Protección Catódica se constituyen en la única técnica capaz de detener una corrosión ya iniciada.
2. La medición del potencial del acero en una estructura de hormigón puede ser utilizado para determinar la localización de zonas activas de corrosión, pero no da una información acerca de la razón por la cual se está produciendo.
3. Las medidas de los potenciales de corrosión se ven influenciadas por ciertos factores como por ejemplo:
  - el contenido de humedad del hormigón y su porosidad
  - el contenido de oxígeno.
4. La medición de potenciales entre  $-350\text{ mV}$  y  $-600\text{ mV}$  con respecto el electrodo de  $\text{Cu/CuSO}_4$  indican que el acero se encuentra en un estado de activación permanente.
5. La resistencia a la compresión de un hormigón da una idea de la calidad del mismo. Así un hormigón de alta resistencia será menos permeable y menos poroso que uno de baja resistencia, en el cual hay probabilidad de transmisión iónica a través de los poros.

6. Un hormigón con una mayor relación agua /cemento presentará menor resistencia mecánica que un hormigón con menor relación agua/cemento.
7. Los iones cloruros se pueden encontrar en los ingredientes de la mezcla de hormigón o pueden por difusión entrar en el hormigón desde el ambiente exterior.
8. Dentro de un hormigón una varilla de acero puede actuar anódicamente respecto a otras y corroerse dentro de una celda de corrosión, previo a la instalación de un Sistema de Protección Catódica.
9. La protección catódica puede aplicarse a cualquier estructura de hormigón que cumpla ciertas condiciones como por ejemplo que sus armaduras tengan continuidad eléctrica.
10. La corriente de protección catódica hace que el potencial medido sea más negativo que el " potencial natural " antes de que la corriente sea aplicada y la cantidad en el cambio es una medida de la efectividad de la protección catódica.
11. Mientras mayor sea la corriente de protección aplicada en el sistema mayor será la cantidad de electrones que se depositarán en la superficie de la varilla y menor será el tiempo de polarización.

12. La Resistencia Mecánica de un hormigón influye en la Polarización del acero. De esta manera un hormigón de menor resistencia presentará más facilidad al paso de la corriente a través del mismo hasta llegar a la varilla de acero, que uno de alta resistencia.
13. Mientras mayor sea la densidad de corriente aplicada al sistema de protección, mayores serán las caídas de voltaje, menor será el tiempo de polarización y mayor será el tiempo de despolarización del acero.
14. Para proteger catódicamente al acero embebido en hormigón se deberán aplicar densidades de corriente entre  $3 \text{ mA/m}^2$  y  $5 \text{ mA/m}^2$ .
15. El contenido de iones cloruro en un hormigón no deberá ser mayor al 0,1% en relación al peso del hormigón, puesto que es cantidad suficiente de cloruros para despolarizar al acero en un ambiente salino.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda la aplicación de sistemas de protección catódica en estructuras de hormigón armado tales como: tuberías de hormigón pretensado, puentes, tanques de almacenamiento, muelles, muros de contención y demás construcciones presentes en un ambiente agresivo.
2. Se recomienda el uso de los sistemas de protección catódica en aquellas estructuras donde los gastos por reparación representan la única alternativa de demolición y reconstrucción.
3. Es importante indicar el tipo de electrodo de referencia que se utilice al momento de realizar una medición de potenciales.  
  
Se recomienda utilizar el electrodo  $\text{Ag}/\text{AgCl}$  cuando se trate de estructuras en presencia de iones cloruros, ya que el electrodo de  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$  se pasiva en presencia de estos iones.
4. Cuando se realiza una medición de potenciales en el hormigón es importante la forma como se conecta el voltímetro. El polo negativo se deberá conectar siempre a la estructura a la que se le va a medir el potencial y el polo positivo se conectará al electrodo de referencia en base al cual se va a realizar la medición del potencial eléctrico de dicha estructura.

## ANEXO A

### ANEXOS TÉCNICOS DEL EQUIPO DE MEDICIÓN DE DIFERENCIALES

Mini Circuit Diagram

Mapas de Potenciales

## ANEXOS

## ANEXO A

### DATOS TÉCNICOS DEL EQUIPO DE MEDICION DE POTENCIALES

<u>Equipo:</u>	Mini Great Dane Equipo para Mapeo de Potenciales . Tipo : BL -90- M versión manual .
<u>Tipo de electrodo:</u>	Ag/AgCl en solución saturada de KCl (solución debe contener siempre cristales de KCl)
<u>Potencial de electrodo:</u>	-110 mV +10 mV con respecto al electrodo Cu/CuSO <sub>4</sub> .

#### Mantenimiento:

El electrodo deberá permanecer siempre lleno de la solución de cloruro de Potasio. No deberán existir burbujas de aire en el interior del electrodo. El electrolito deberá estar saturado de cristales de KCl.

#### Operación:

Para obtener mediciones correctas las barras de acero deberán estar eléctricamente conectadas en el área .La medición se realiza presionando la esponja al final del electrodo contra la superficie del hormigón Los procesos de humectación afectan las lecturas de potenciales .Cuando el hormigón está más húmedo,

la lectura de potencial es más negativa .El siguiente ejemplo indica la relación para varios grados de humedad.

	mV	Kohm
Superficie humedecida y medida después de 4 minutos	200 mV	1400 Kohm
Superficie humedecida siempre y medida después de 10 minutos	10 mV	500 Kohm
Superficie humedecida por tercera vez y medida después de 20 minutos	- 210 mV	5 Kohm
Superficie humedecida por cuarta vez y medida después de 30 minutos.	- 215 mV	4 Kohm

Este ejemplo muestra la necesidad de medir los potenciales junto con la resistencia eléctrica del medio .

Una alta resistencia eléctrica puede indicar la presencia de fisuras. Una baja resistencia eléctrica en el hormigón ( 0-2 Kohm ) puede indicar la presencia de poros así y por ende la presencia de iones cloruros dentro del hormigón .

#### Calibración :

El electrodo de referencia necesita calibración y mantenimiento. Para ello se debe disponer de dos electrodos iguales . Uno de ellos se utilizará como estándar . En nuestro equipo de medición disponemos de ambos electrodos.

Para calibrar el equipo colocamos los dos electrodos tope a tope y medimos la diferencia de potencial entre ambos.

La diferencia de potencial entre los dos electrodos deberá ser menor a 0.02 voltios. Si es mayor se debe descargar la solución de KCl, limpiar el tubo con agua destilada y rellenarlo con solución fresca y cristales de sulfato de cobre.

Los electrodos usualmente necesitan ser limpiados cada dos a tres meses.

## ANEXO B

### SERIE GALVÁNICA PRÁCTICA.

<u>Material</u>	<u>Potencial aproximado ( Voltios) respecto al electrodo Saturado Cobre-Sulfato de Cobre. ( Cu / CuSO<sub>4</sub> )</u>
Magnesio puro comercial	- 1.75 voltios
Aleaciones de magnesio (6% Al,3% Zn,15 Mn )	- 1.60
Zinc	- 1.10
Aleaciones de aluminio (5% Zinc)	- 1.00
Aluminio puro comercial	- 0.80
Cadmio	- 0.80
Hierro fundido	- 0.50
Plomo	- 0.50
Estaño	- 0.50
Acero Inoxidable Tipo 305 ( estado activo )	- 0.50
Acero Templado en Concreto ( Estado Activo)	-0.35 (o más negativo)
Acero Templado en Concreto ( Estado Pasivo)	- 0.20(o más positivo )
Cobre, Bronce ,latón.	- 0.20
Titanio	-0.20
Níquel	+0.10 a -0.25
Plata, soldadura (40% Ag)	-0.10
Acero Inoxidable , Tipo 304 ( Estado Pasivo)	+0.10
Oro	+0.20
Carbón, Grafito, Coque	+0.30

## ANEXO C

VARIACION DE LAS CAIDAS DE VOLTAJE EN FUNCION DE LA  
CORRIENTE APLICADA. ( R = 102,3  $\Omega$  )

V ( voltios )	I ( miliamperios )	Resistencia eléctrica ( Ohmios )
0.020	0.195	102.3
0.025	0.240	102.3
0.030	0.290	102.3
0.035	0.340	102.30
0.040	0.390	102.3
0.050	0.480	102.3
0.070	0.680	102.3
0.090	0.880	102.3
0.150	1.460	102.3
0.200	1.950	102.3
0.250	2.440	102.3
0.300	2.930	102.3
0.350	3.420	102.3
0.400	3.910	102.3
0.450	4.390	102.3
0.500	4.880	102.3

## ANEXO D

VARIACION DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE ( $D_c$ ) EN FUNCION  
DE LA CORRIENTE APLICADA (  $R = 102.3 \Omega$  )

I (mA)	$D_c$ ( mA / m <sup>2</sup> )	R ( $\Omega$ )
0.1857	3.33	102.3
0.1955	3.22	102.3
0.24	3.92	102.3
0.29	4.74	102.3
0.31	5.00	102.3
0.34	5.56	102.3
0.39	6.38	102.3
0.48	7.85	102.3
0.68	11.13	102.3
0.88	14.41	102.3
1.46	23.91	102.3
1.95	31.92	102.3
2.44	39.95	102.3
2.93	47.97	102.3
3.42	55.99	102.3
3.91	64.02	102.3

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- ZUAZNABAR, J. CORROSION DEL HORMIGON Y HORMIGON ARMADO. SU PROTECCION. Seminario Internacional auspiciado por La Facultad de Ingeniería Mecánica de la ESPOL, y el Centro de Materiales de la construcción de La Habana - Cuba. Guayaquil, Ecuador. 1995.
- 2.- FELIU, S. INSPECCION DE OBRAS DAÑADAS POR CORROSION. Manual. Programa temático del Consejo Superior de Investigaciones Científicas "Corrosión y protección de Metales". 1ra. ed. Madrid, España. 1989, 110 pp.
- 3.- ASTM. ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. Philadelphia, 1991. Ensayos : C-876 , D- 1411, C-39-44, C- 31-44, C-78- 44.
- 4.- ACI. DURABILIDAD DEL CONCRETO. (ACI-201). Instituto Americano del Concreto. 4ta. ed. Editorial Limusa, S.A. de C.V. México. 1989, 86 pp.
- 5.- ACI. CORROSION OF METALS IN CONCRETE ( ACI 222 R-89). American Concrete Institute, Detroit, 1989, 30 pp.
6. OBANDO, H. CORROSION DE ARMADURAS DE HORMIGON PARA POSTES DE ALUMBRADO ELECTRICO DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL. Tesis. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador. 1994, 163 pp
- 7.- WHEAT, H. SOME ELECTROCHEMICAL ASPECTS OF CORROSION OF STEEL IN CONCRETE. NACE. National Association of Corrosion Engineers. Houston, USA. November, 1985, pp 640 - 645.
- 8.- POLDER, R and NUITEN, P. A MULTI-ELEMENT APPROACH FOR CATHODIC PROTECTION OF REINFORCED CONCRETE. Materials and Performance. NACE Publication. Houston, USA. Jun 1994, Volume 33, Number 6. pp 11- 14.

- 9.- VALLANCE , C . UNDERWATER EVALUATION OF REBAR CORROSION IN STRUCTURAL CONCRETE. Materials and Performance. NACE Publication. Houston , USA . April 1994, Volume 33, Number 4 , - pp 34 - 37.
- 10.-HONG, D. STUDY AND APPLICATION OF CURRENT CATHODIC PROTECTION TECHNIQUE FOR ATMOSPHERICALLY EXPOSED SALT-CONTAMINATED REINFORCED CONCRETE STRUCTURES. ACI Materials Journal . January-February 1993, pp 3- 7.
- 11.-GEHO. ARMADURAS. PROTECCION DEL ACERO EN EL HORMIGON-MECANISMOS DE CORROSION Y FACTORES PRINCIPALES QUE INCIDEN EN LOS PROCESOS. Grupo Español del Hormigón. Ciencia y Técnica Publicaciones, pp 6- 13.
- 12.-HOWELL, K. and KELDSEN , J. CORROSION CONTROL OF ATMOSPHERICALLY EXPOSED STEEL IN CONCRETE STRUCTURES. The HARCO Corrosion Engineering and Cathodic Protection Library. Paper HC -66, Medina , Ohio, USA, pp
- 13.-GARRITY , K. PHYSICAL MAINTENANCE OF CATHODIC Library PROTECTION SYSTEMS FOR REINFORCED CONCRETE BRIDGES DECKS. The Harco Corrosion Engineering and Cathodic Protection. Paper HC-61 , Medina , Ohio , USA. Pp
- 14.-HUSOCK, P and WILSON , R. OVERVIEW OF REBAR CORROSION PROBLEM. The Harco Corrosion Engineering and Cathodic Protection Library. Paper NO. HC-53. Medina, Ohio , USA, pp
- 15.-HUSOCK, P. EVALUATION OF CATHODIC PROTECTION CRITERIA. The Harco Corrosion Engineering and Cathodic Protection Library. Paper HC-58 . Medina , Ohio, USA. 12 pp.
- 16.-FUNAHASHI, P and BUSHMAN, P. TECHNICAL REVIEW OF 100 mV POLARIZATION SHIFT CRITERION FOR REINFORCING STEEL IN CONCRETE. NACE. National Association of Corrosion Engineers. CORROSION '90 . Las Vegas, Nevada, April ,1990. 10 pp.