

T  
620.137  
RIGe



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica**

**“Evaluación de Inhibidores de Corrosión  
Para La Protección de Estructuras de  
Hormigon Armado”**

**TESIS DE GRADO**

**Previa a la Obtención del Título de:**

**INGENIERO MECANICO**

**Presentada por:**

**ANDRES FRANCISCO RIGAIL CEDENO**

**Guayaquil - Ecuador**

**1996**

## AGRADECIMIENTO

Al Ing. Julián Peña, empresa Hormigones Hércules, Ing. Juan Peri, Centro Ecuatoriano de Calidad y Productividad y demás personas por su ayuda y colaboración para la realización de este trabajo.



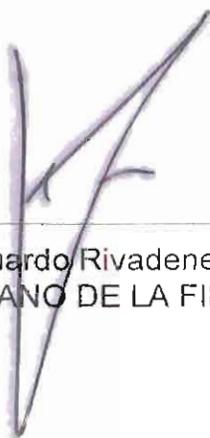
# DEDICATORIA

A DIOS

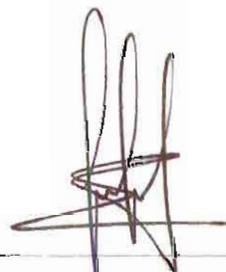
A MIS PADRES

A MI HERMANO

# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Eduardo Rivadeneira P.  
DECANO DE LA FIM



Ing. Julián Peña E.  
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Hugo Egüez  
VOCAL

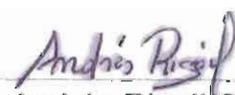


Ing. José Pacheco  
VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

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

( Reglamento de Graduación de la ESPOL )

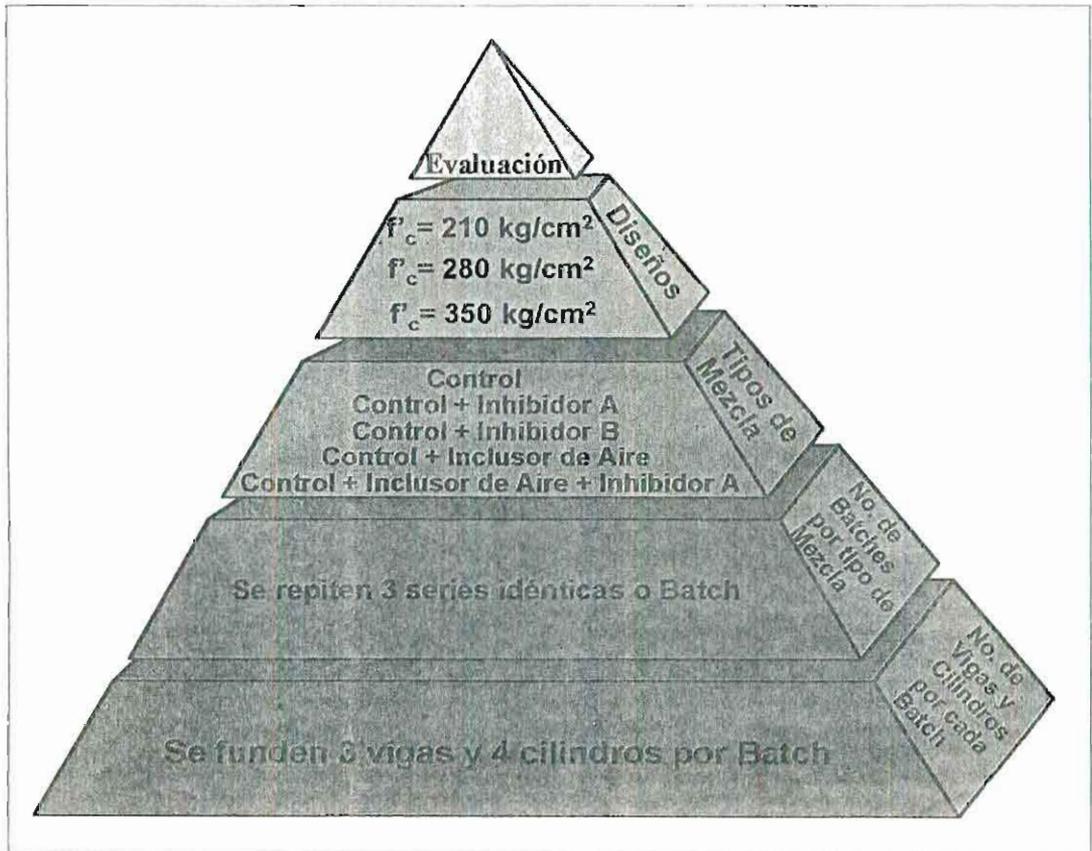
  
\_\_\_\_\_  
Andrés Rigail Cedeño

## RESUMEN

Los graves problemas de corrosión ocurridos en estructuras de hormigón armado en el edificio del Terminal Terrestre de Guayaquil, Puente 5 de junio, Acueducto Guayaquil-Salinas y postes de alumbrado público en Guayaquil, han originado grandes pérdidas económicas y ponen en peligro la seguridad de las vidas humanas, esto ha motivado a estudiar inhibidores de corrosión como una solución alternativa para rehabilitar y proteger el acero de refuerzo de las estructuras.

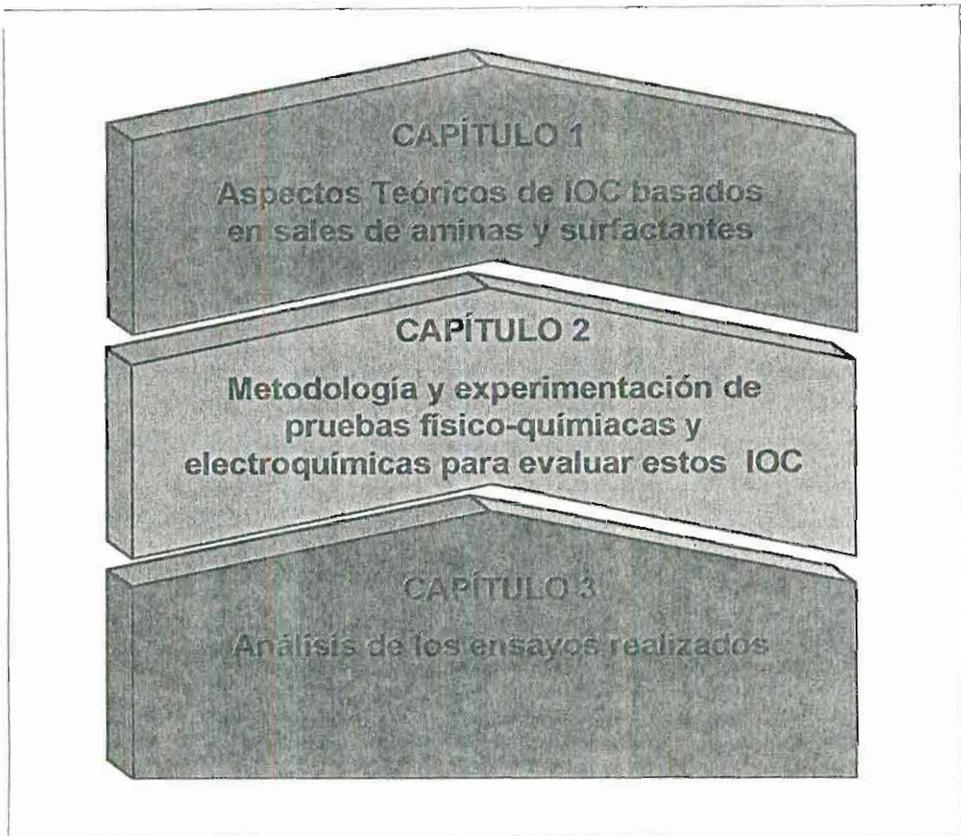
Es esta tesis se evaluarán dos inhibidores orgánicos de corrosión (IOC), un aditivo al hormigón fresco y un líquido para tratamientos superficiales al hormigón endurecido basados en sales de aminas y surfactantes, que protejan estructuras nuevas y extiendan el servicio de vida útil de estructuras contaminadas con cloruros con procesos activos de corrosión.

Como se observa en la **figura R.1** para evaluar los inhibidores se fundirán especímenes basados en tres diseños de hormigones, cada diseño tendrá cinco tipos de mezclas como parámetros de comparación y cada mezcla se repetirá tres veces y en cada vez se fundirán tres vigas y cuatro cilindros.



**Figura R.1** Esquema de la evaluación de los inhibidores

El contenido de la tesis esta estructurada de la siguiente manera: el capítulo 1 se describirán los aspectos teóricos de estos IOC para el hormigón armado; el capítulo 2 detallará la metodología y experimentación donde se efectuarán pruebas de propiedades físicas y electroquímicas para evaluar el efecto y eficiencia de estos inhibidores; y en el capítulo 3 se realizará un análisis de los ensayos físico químicos, electroquímicos incluyendo un análisis económico comparativo usando los IOC versus el reemplazo de la misma ( ver **figura R.2** )



**Figura R.2** Contenido resumido de cada capítulo de la tesis

Finalmente se realizarán conclusiones y recomendaciones con el objeto de reducir el deterioro de nuevas estructuras y extender la vida útil de las existentes.

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
RESUMEN.....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	XIX
SIMBOLOGIA.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XX
INTRODUCCION.....	1

### **I. LOS INHIBIDORES ORGÁNICOS Y SU INCIDENCIA EN LA**

#### **CORROSION DEL HORMIGÓN ARMADO**

1.1 Aspectos electroquímicos de la corrosión del acero de refuerzo....	3
1.2 Alternativas para combatir la corrosión en el hormigón.....	10
1.3 Acción de los inhibidores en el hormigón armado.....	12
1.4 Mecanismo de inhibición.....	18
1.5 Mecanismo de difusión a través del concreto.....	20
1.5.1 Medición por la técnica del isótopo radioactivo.....	26
1.5.2 Medición por la técnica del electrodo selectivo.....	38
1.6 Efectividad de las moléculas de los Inhibidores en el Hormigón Armado.....	47
1.7 Experiencias en pruebas electroquímicas.....	69

## **VII. DISEÑO EXPERIMENTAL**

2.1 Metodología de la investigación.....	77
2.2 Mezclas de diseño.....	85
2.3 Preparación de vigas testigos.....	106
2.4 Pruebas electroquímicas.....	117
2.4.1 Potenciales de corrosión.....	119
2.4.2 Corrientes de corrosión.....	123
2.5 Pruebas físico-químicos.....	153
2.5.1 Porosidad.....	153
2.5.2 Contenido de Cloruros.....	159

## **III. EVALUACIÓN DE RESULTADOS**

3.1 Respecto a ensayos electroquímicos.....	161
3.2 Respecto a ensayos físico-químicos del concreto.....	188
3.3 Análisis Económico.....	195

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>199</b>
--	------------

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>207</b>
--------------------------	------------

## SIMBOLOGIA

pH	=	Potencial de hidrógeno
$S_p$	=	Area relativa de aceros pasivos
$S_a$	=	Area relativa de aceros activos
$P_p$	=	Velocidad de corrosión de aceros pasivos
$P_a$	=	Velocidad de corrosión de aceros activos
a/mc	=	Relación agua/material cementoso
a/c	=	Relación agua/cemento
$i_{corr}$	=	Densidad de corrosión
$E_{corr}$	=	Potencial de corrosión
$I_{corr}$	=	Corriente de corrosión
TC	=	Total Corrosión ( Corrosión Total )
CTC	=	Corriente total de corrosión
IE	=	Inhibit Eficiencia (eficiencia de inhibición )
RC	=	Reducción de la corrosión
$P_{sat}$	=	Peso de la probeta saturada
$P_{seco}$	=	Peso de la probeta seca
$P_{sumerg}$	=	Peso de la probeta saturada y sumergida en agua
P	=	Porosidad
$E_{corr}$	=	Potencial de corrosión
f'c	=	Fuerza de compresión de diseño de hormigón

- $M_{eq}$  = Mil equivalente o peso molecular (gr.) dividido para mil
- $N_{titul}$  = Normalidad del titulante
- $\Delta E_0$  = Diferencia de potenciales de corrosión de los aceros pasivos
- $R$  = Resistencia óhmica entre los aceros
- $P_p$  = Velocidad de corrosión de los aceros pasivos
- $P_a$  = Velocidad de corrosión de los aceros activos
- $S_p$  = Area relativa en los aceros pasivos
- $S_a$  = Area relativa en los aceros activos
- $I_{galv}$  = Corriente de una macrocelda de corrosión

## INDICE DE FIGURAS

	Pág.	
Figura R.1	Esquema de la evaluación de los inhibidores	
Figura R.2	Contenido resumido de cada capítulo de la tesis	
Figura 1.1	Macrocela de corrosión.....	5
Figura 1.2	Estructura semisumergida forma una macrocela de corrosión.....	6
Figura 1.3	Macrocela después de una reparación.....	7
Figura 1.4	Microcela o Pitting ocasionado por cloruros.....	7
Figura 1.5	Microcela ocasionada después de una reparación...	8
Figura 1.6	Actividades de Macrocelas y Microcelas de corrosión.....	9
Figura 1.7	Fracturas antes de repararse.....	10
Figura 1.8	Mecanismo de acción de los VCI.....	17
Figura 1.9	Mecanismo de inhibición de los VCI.....	19
Figura 1.10	Detalle del electrodo de Amonia.....	28
Figura 1.11	Celda de difusión para inhibidor de superficie.....	31
Figura 1.12	Mortero para ensayos de difusión del aditivo inhibidor.	33
Figura 1.13	Celda de difusión para inhibidor de superficie para espécimen de la 1.12 b).....	34
Figura 1.14	Correlación entre el coeficiente de Permeabilidad de un gas y el coeficiente de difusión del inhibidor.....	36

Figura	1.15	Experimento mediante el Método 1.....	42
Figura	1.16	Experimento mediante el Método 2.....	43
Figura	1.17	Calle Randolph / I-35R, Saint Paul, MN-USA.....	48
Figura	1.18	Viga del «Cracked Beam Corrosion Test».....	55
Figura	1.19	Gráfica Corriente Total de Corrosión vs. Tiempo.....	57
Figura	1.20	Vigas del «Southern Climate Accelerated Test».....	58
Figura	1.21	Mediciones de corrientes de corrosión y potenciales instantáneos en la muestra A.....	60
Figura	1.22	Mediciones de corriente de corrosión y potenciales instantáneos en la muestra B.....	61
Figura	1.23	Espécimen con una triada a) Vista de planta y b) Vista lateral.....	64
Figura	1.24	Espécimen con dos triadas a) Vista de planta y b) Vista lateral.....	65
Figura	1.25	La $E_{corr}$ es afectada al modificar simultáneamente varios factores de corrosión.....	73
Figura	1.26	Relaciones $i_{corr}$ y $E_{corr}$ obtenidos en estructuras en diferentes medios.....	74
Figura	1.27	Forma de tomar las lecturas de potenciales de corrosión.....	76
Figura	2.1	Viga según la norma ASTM G 109-92.....	78

Figura 2.2	Vista lateral de la viga con sus dimensiones.....	79
Figura 2.3	Cronograma de actividades desde Diciembre/95 hasta finales de Febrero de 1996.....	83
Figura 2.4	Cronograma de actividades desde finales de Febrero/96 hasta finales de Octubre de 1996.....	84
Figura 2.5	Viga con código para fácil manipulación.....	89
Figura 2.6	Inhibidores usados en las vigas.....	96
Figura 2.7	Prueba de asentamiento.....	96
Figura 2.8	Prueba de contenido de aire.....	101
Figura 2.9	Materiales y equipos utilizados. ....	109
Figura 2.10	Preparación de molde donde se fundirán las vigas....	109
Figura 2.11	Limpieza con agua antes de colocarse en el reservorio con ácido fosfórico.....	110
Figura 2.12	Varillas luego de permanecer en la tina con ácido fosfórico fueron cepilladas y lavadas con agua.....	110
Figura 2.13	Muestreo de las tinas donde se realizo la limpieza de las varillas.....	111
Figura 2.14	Para eliminar distorsiones en los extremos, estos fueron pintados con pintura epóxica.....	111
Figura 2.15	Vibrado del hormigón en los moldes de las vigas.....	112

Figura 2.16	Enlucido de las vigas luego del vibrado.....	112
Figura 2.17	Muestreo de vigas y cilindros después de un día de trabajo.....	113
Figura 2.18	Las vigas y cilindros permanecieron 28 días para su curado.....	113
Figura 2.19	Para pegar los reservorios de plywood se utilizó silicona.....	114
Figura 2.20	Los reservorios de plywood se pegaron en la cara superior.....	114
Figura 2.21	Vigas antes de pintar las caras laterales.....	115
Figura 2.22	Vigas después de pintar las caras laterales .....	115
Figura 2.23	Cepillado de uno de los extremos de las varillas antes de armar el circuito.....	116
Figura 2.24	Circuito de la celda conectado.....	116
Figura 2.25	Colocación de 500 ml de solución salina en los reservorios de plywood.....	118
Figura 2.26	Electrodo Cu/SO <sub>4</sub> Cu utilizado para medir los potenciales de corrosión.....	119
Figura 2.27	Amperímetro utilizado para realizar las mediciones de las corriente galvánicas o de la macrocelda.....	124

Figura 2.28	Esquema de nodos del circuito eléctrico formado en uno de los extremos de las varillas.....	125
Figura 2.29	Hoja de Registros de Datos de Corrientes de la macrocelda y Potenciales de corrosión.....	127
Figura 2.30	Diagrama de Flujo respecto al muestreo estadístico de los datos de las corriente de la macrocelda y potenciales de corrosión.....	128
Figura 2.31	Continuación del Diagrama de Flujo de la figura 2.30....	129
Figura 2.32	Continuación del Diagrama de Flujo de la figura 2.31....	130
Figura 2.33	Esquema del área de superficie de las varillas.....	134
Figura 2.34	Varillas de una de las vigas del tipo de mezcla $\epsilon$ - I.....	145
Figura 2.35	Varillas de una de las vigas del tipo de mezcla $\epsilon$ - V.....	146
Figura 2.36	Varillas de una de las vigas del tipo de mezcla $\Omega$ - I.....	147
Figura 2.37	Corrosión de la varilla anódica de la viga de figura 2.36.....	148
Figura 2.38	Muestra del pedazo de una viga $\epsilon$ - I b) Muestra del pedazo de una viga $\epsilon$ - V.....	156
Figura 2.39	Pedazos introducidos en un horno para desecarse.....	157
Figura 2.40	Peso sumergido de las muestras.....	158

Figura 3.1	Corriente de la Macroelda vs. Tiempo Hormigón $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ .....	165
Figura 3.2	Corriente de la Macroelda vs. Tiempo Hormigón $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$ .....	166
Figura 3.3	Corriente de la Macroelda vs. Tiempo Hormigón $f'c= 350 \text{ kg/cm}^2$ .....	167
Figura 3.4	Corriente de la Macroelda vs. Potencial de Corrosión Hormigón $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ .....	169
Figura 3.5	Corriente de la Macroelda vs. Potencial de Corrosión Hormigón $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$ .....	170
Figura 3.6	Corriente de la Macroelda vs. Potencial de Corrosión Hormigón $f'c= 350 \text{ kg/cm}^2$ .....	171
Figura 3.7	Velocidad de Corrosión a los 195 días de iniciado el estudio.....	174
Figura 3.8	Velocidad de Corrosión a los 260 días de iniciado el estudio.....	175
Figura 3.9	Eficiencia de inhibición de las mezclas a los 195 días de iniciado el estudio - hormigón $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ .....	177
Figura 3.10	Eficiencia de inhibición de las mezclas a los 195 días de iniciado el estudio - hormigón $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ .....	178

Figura 3.11	Corrosión total de las minivigas del hormigón $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ .....	181
Figura 3.12	Corrosión total de las minivigas del hormigón $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$ .....	182
Figura 3.13	Corrosión total de las minivigas del hormigón $f'c= 350 \text{ kg/cm}^2$ .....	183
Figura 3.14	Corrosión total de las minivigas del hormigón hasta 195 días de estudio.....	184
Figura 3.15	Reducción de la corrosión total de las mezclas del hormigón $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ a los 195 días de estudio.....	186
Figura 3.16	Reducción de la corrosión total de las mezclas del hormigón $f'c= 350 \text{ kg/cm}^2$ a los 195 días de estudio.....	187
Figura 3.17	Resistencia a la Compresión de los diseños y mezclas utilizados en el estudio.....	189
Figura 3.18	Contenido de aire de todos los diseños y mezclas utilizados en el estudio.....	191

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla # 1. Contenido de sales p.p.m. en medios acuosos.....	24
Tabla # 2. Mecanismos de migración a través del hormigón.....	25
Tabla # 3. Composiciones del concreto.....	29
Tabla # 4. Coeficientes de permeabilidad de los gases en el concreto.....	30
Tabla # 5. Composiciones del concreto.....	32
Tabla # 6. Coeficientes de permeabilidad de los gases en el mortero.....	34
Tabla # 7. Concentración de 100 ppm del inhibidor en años según la permeabilidad del concreto.....	37
Tabla # 8. Método 1: Impregnación en la superficie.....	45
Tabla # 9. Método 2: Mezcla para reparaciones.....	45
Tabla # 10. Area de delaminación por tramos de la calle Randolph / I-35 St. Paul, MN.....	49
Tabla # 11. Media de la contaminación del cloruros lbs/yd <sup>3</sup> , calle Randolph I-35E, St. Paul, MN.....	50
Tabla # 12. Lecturas de Potenciales de los carriles este y oeste en la calle Randolph/I-35E, St. Paul, MN.....	51

Tabla # 13.	Datos del reporte del MN-DOT @ 6 años ( 1986, 1987, 1988, 1990, 1991 ).....	52
Tabla # 14.	Esfuerzos de flexión y compresión.....	56
Tabla # 15.	Correlación de la $i_{corr}$ con el tiempo esperado para daños en el hormigón.....	66
Tabla # 16.	Propiedades del hormigón fresco y endurecido.....	67
Tabla # 17.	Rangos de valores de la $I_{corr}$ .....	70
Tabla # 18.	Rangos de Corrosión para estimar la vida en una estructura.....	71
Tabla # 19.	Rangos de Probabilidades de corrosión.....	75
Tabla # 20.	Parámetros de comparación entre mezclas.....	80
Tabla # 21.	Esquema de pruebas realizadas en un batch.....	82
Tabla # 22.	Diseño No.1 $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ .....	86
Tabla # 23.	Diseño No.2 $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$ .....	87
Tabla # 24.	Diseño No.3 $f'c= 350 \text{ kg/cm}^2$ .....	88
Tabla # 25.	Clasificación de las consistencias según los asentos medidos con el cono de Abrams.....	91
Tabla # 26.	Valores de asentamientos para diferentes tipos de obras.....	92

Tabla # 27.Asentamientos obtenidos para el hormigón $f'c= 210$ kg/cm <sup>2</sup> .....	93
Tabla # 28.Asentamientos obtenidos para el hormigón $f'c= 280$ kg/cm <sup>2</sup> .....	94
Tabla # 29.Asentamientos obtenidos para el hormigón $f'c= 350$ kg/cm <sup>2</sup> .....	95
Tabla # 30.Contenidos de aire obtenidos para el hormigón $f'c= 210$ kg/cm <sup>2</sup> .....	98
Tabla # 31.Contenidos de aire obtenidos para el hormigón $f'c= 280$ kg/cm <sup>2</sup> .....	99
Tabla # 32.Contenidos de aire obtenidos para el hormigón $f'c= 350$ kg/cm <sup>2</sup> .....	100
Tabla # 33.Rotura de cilindros a los 28 días - hormigón $f'c= 210$ kg/cm <sup>2</sup> .....	103
Tabla # 34.Rotura de cilindros a los 28 días - hormigón $f'c= 280$ kg/cm <sup>2</sup> .....	104
Tabla # 35.Rotura de cilindros a los 28 días - hormigón $f'c= 350$ kg/cm <sup>2</sup> .....	105
Tabla # 36.Potenciales de Corrosión (mV) de las diferentes mezclas en el diseño $f'c=210$ kg/cm <sup>2</sup> .....	120

Tabla # 37.Potenciales de Corrosión (mV )de las diferentes mezclas en el diseño $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$ .....	121
Tabla # 38.Potenciales de Corrosión ( mV ) de las diferentes mezclas en el diseño $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ .....	122
Tabla # 39.Corrientes de la Macrocela - hormigón $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ .....	131
Tabla # 40.Corrientes de la Macrocela - hormigón $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$ .....	132
Tabla # 41.Corrientes de la Macrocela - hormigón $f'c= 350 \text{ kg/cm}^2$ .....	133
Tabla # 42.Corriente total de corrosión - hormigón $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ .....	136
Tabla # 43.Corriente total de corrosión - hormigón $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$ .....	137
Tabla # 44.Corriente total de corrosión - hormigón $f'c= 350 \text{ kg/cm}^2$ .....	138
Tabla # 45.Mediciones a los 195 días de iniciada la prueba para el hormigón $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ .....	142
Tabla # 46.Mediciones a los 195 días de iniciada la prueba para el hormigón $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$ .....	143

Tabla # 47.	Mediciones a los 195 días de iniciada la prueba para el hormigón $f'c= 350 \text{ kg/cm}^2$ .....	144
Tabla # 48.	Mediciones a los 260 días en ambientes de cloruros para el hormigón $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$ .....	150
Tabla # 49.	Mediciones a los 260 días en ambientes de cloruros para el hormigón $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$ .....	151
Tabla # 50.	Mediciones a los 260 días en ambientes de cloruros para el hormigón $f'c= 350 \text{ kg/cm}^2$ .....	152
Tabla # 51.	Criterios de valoración de porosidad.....	155
Tabla # 52.	Pesos y Porcentajes de porosidad.....	155
Tabla # 53.	Contenidos de Cloruros de la pruebas realizadas.....	160
Tabla # 54.	Estados de Corrosión en las mezclas a 195 días de iniciado el estudio.....	205
Tabla # 55.	Estados de Corrosión en las mezclas a 260 días de iniciado el estudio.....	206

## INTRODUCCIÓN

La corrosión del hormigón armado inducida por cloruros es un problema que se está presentando en la actualidad en algunas estructuras en Guayaquil, que está ocasionando grandes pérdidas económicas y atenta contra la seguridad de vidas humanas. Guayaquil se sitúa en una zona de alta corrosividad con una humedad relativa aproximada de un 80% , una salinidad atmosférica y un nivel freático por la presencia del Río Guayas y por los esteros Salado, Santa Ana, del Puerto y Cobina facilitan el deterioro de una estructura de hormigón armado ubicadas sobre o bajo tierra.

Ubicado nuestro país en el llamado cinturón de fuego, los ingenieros han especificado sus diseños de hormigón desde el punto de vista del riesgo sísmico pero no del riesgo de corrosión , por esto es de vital importancia otorgar alternativas para prevenir este problema y soluciones que permitan rehabilitar las estructuras con procesos de corrosión activos para extender su servicio de vida hacia el siglo XXI.

Esta investigación tiene el objeto de estudiar la capacidad de inhibición a la corrosión de: diseños comúnmente utilizados en nuestro medio, diseños resistentes a la corrosión inducida por cloruros y tratamientos para detener la corrosión en estructuras existentes; con esta finalidad se evaluarán dos

inhibidores orgánicos de corrosión (IOC) basados en sales de aminas y surfactantes: un aditivo al concreto fresco y un líquido para tratamientos superficiales al concreto endurecido. La tecnología de estos aditivos inhibidores de corrosión es nueva en nuestro medio para lo cual es importante conocer sus comportamientos en combinación con los materiales usados en el Ecuador.

La metodología de la investigación consistirá en evaluar el asentamiento, contenido de aire, resistencia mecánica, corriente de corrosión, potencial de corrosión, velocidad de corrosión, eficiencia de inhibición, corriente total de corrosión, reducción de la corrosión total de cada diseño con diferentes: resistencias a la compresión, tipos de mezcla con y sin adiciones incluyendo inclusores de aire y los IOC solos y combinados.

Para evaluar las habilidades y propiedades anticorrosivas de los diseños y tipos de mezclas se fundirán vigas sometiendo a una solución al 15% por peso de sal en agua y dejados secar alternativamente para inducir la corrosión, similar al método de prueba ASTM G 109-92 utilizado muy comúnmente en Estados Unidos para evaluar aditivos en ambiente de cloruros.

## CAPITULO I

### LOS INHIBIDORES ORGÁNICOS Y SU INCIDENCIA EN LA CORROSION DEL HORMIGÓN ARMADO

#### 1.1 ASPECTOS ELECTROQUÍMICOS DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

La corrosión de acero de refuerzo en un concreto no carbonatado puede ocurrir en presencia de oxígeno, humedad e iones (ión cloruro) se denominada *corrosión electroquímica*, por motivo de que se requiere la presencia de un electrolito. La corriente de corrosión originada por la celda electrolítica provoca una detereorización del ánodo, es decir el hierro en presencia de la solución; produce una conversión a hierro libre en el ánodo y los electrones producto de esta conversión son "consumidos" por el cátodo. Las reacciones químicas se muestran en la **figura 1.1**, estas reacciones propias de una macrocelda de corrosión son

las similares a las que ocurren al someter vigas en ambientes de cloruros como lo indica la norma ASTM G 109 tomada como referencia para esta tesis o en ensayo " Cracked Beam Corrosion Tests " o el " Southern Climate Accelerated Test " cuyas figuras son mostradas posteriormente .

En la vida real se da una macrocelda en una estructura semisumergida ( ver **figura 1.2**) o en una reparación con un material alcalino en contacto con un hormigón contaminado con cloruros ( ver **figura 1.3** ).

En ausencia de los cloruros u otros iones , la alta alcalinidad del concreto en cierta ocasiones permite que las reacciones químicas mostradas en la **figura 1.1** alcancen el equilibrio, y el acero de refuerzo se pasive. Sin embargo cuando los cloruros son introducidos en suficientes cantidades, se rompe este equilibrio y el acero de refuerzo se corroe en el ánodo. El oxígeno y la humedad juegan un papel predominante solamente en el cátodo, inclusive la velocidad de corrosión es a menudo determinada por la disponibilidad de oxígeno y humedad en el cátodo.

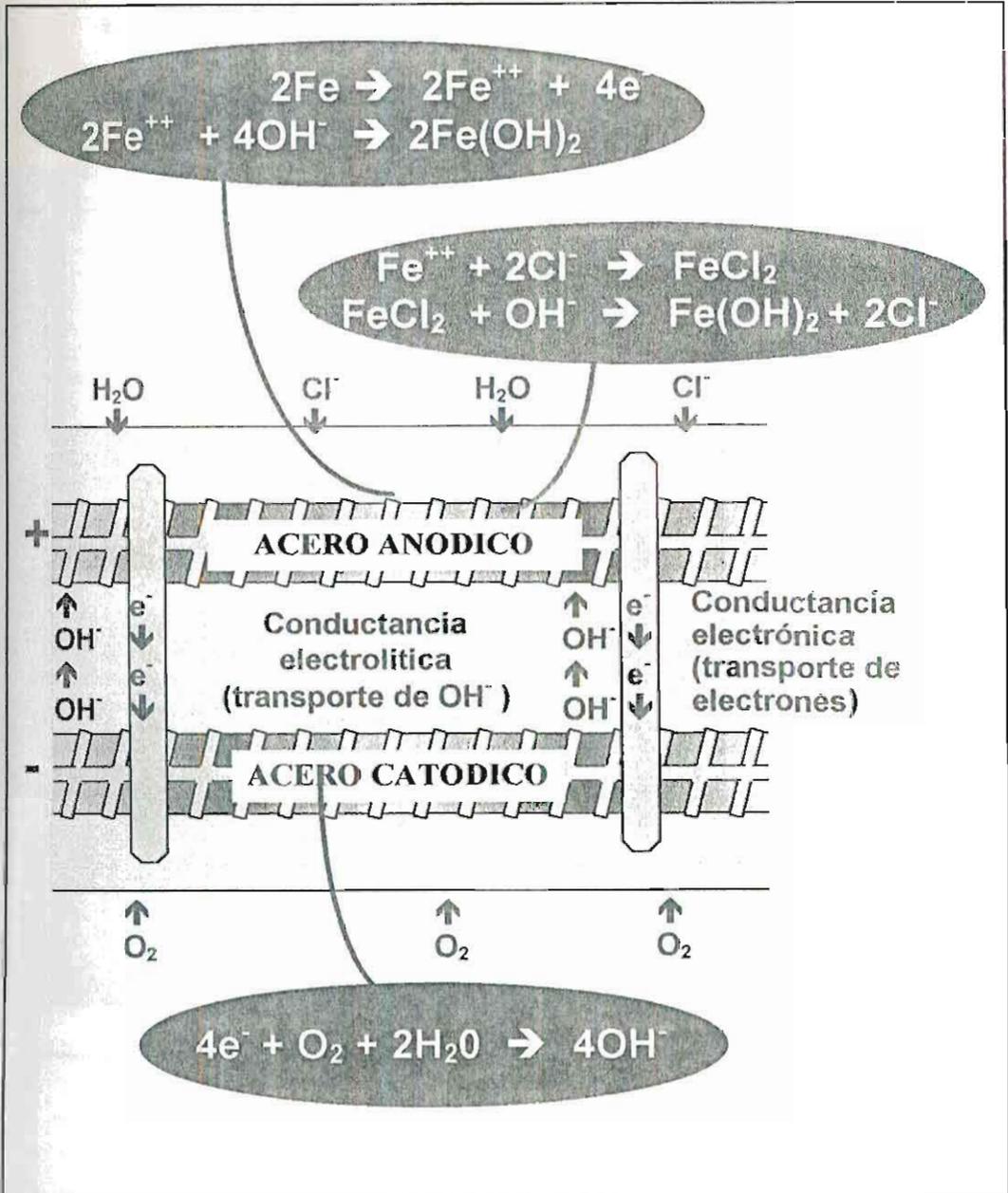


Figura No. 1.1

MACROCELDA DE CORROSIÓN

En una microcelda de corrosión o "pitting" ( picaduras ) el ánodo está inmediatamente adyacente al cátodo ( ver **figura 1.4** ), esto suele ocurrir después de reparar ( patching ) una estructura con un material de barrera ( ver **figura 1.5** )

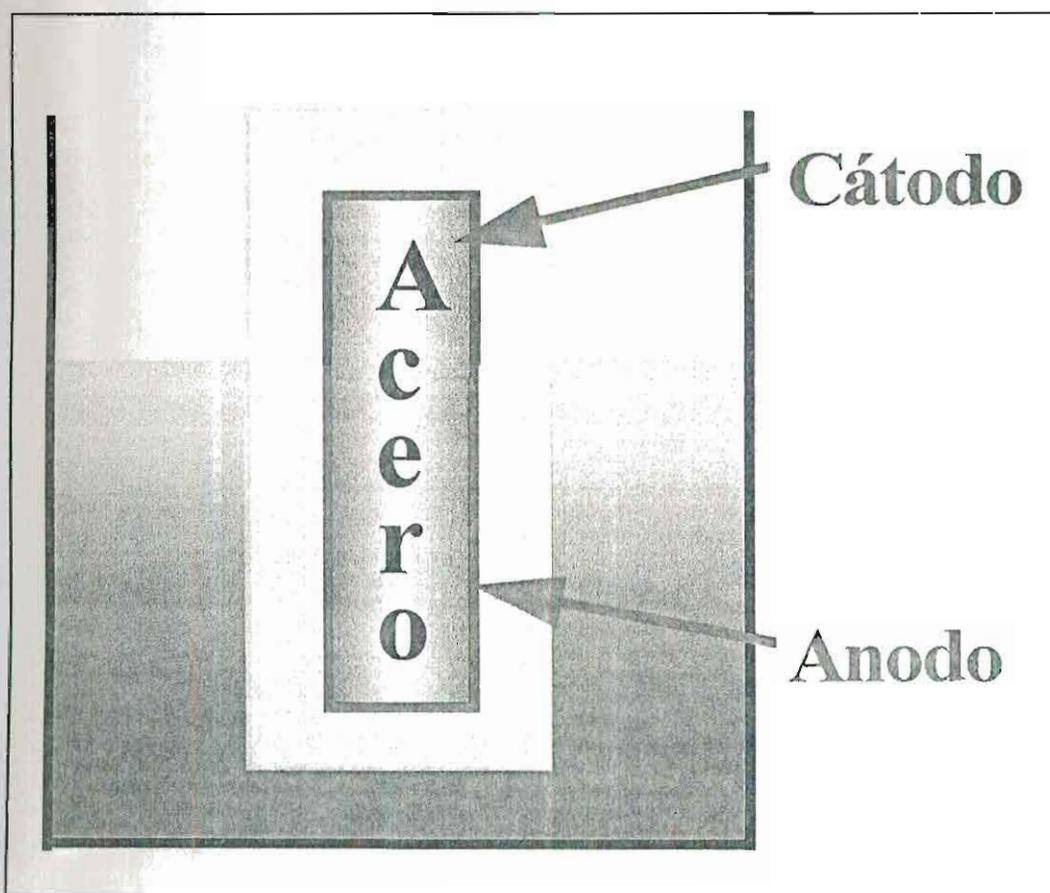


FIGURA 1.2

ESTRUCTURA SEMISUMERGIDA FORMA UNA MACROCELDA  
DE CORROSIÓN

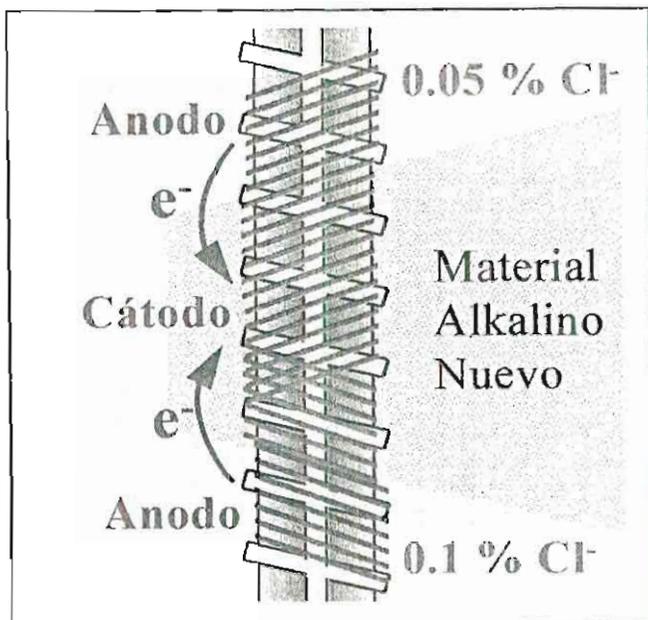


FIGURA 1.3

MACROCELDA DESPUÉS DE UNA REPARACIÓN

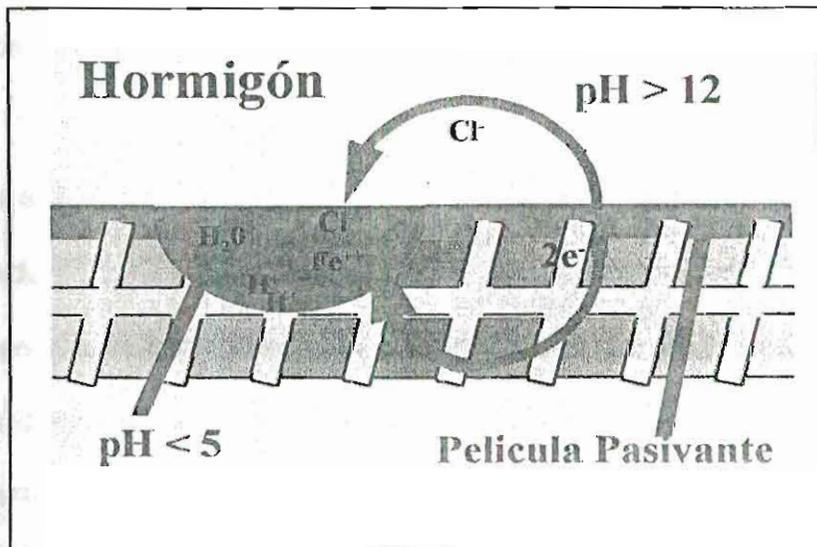


Figura 1.4

MICROCELDA O PITTING OCASIONADO POR CLORUROS

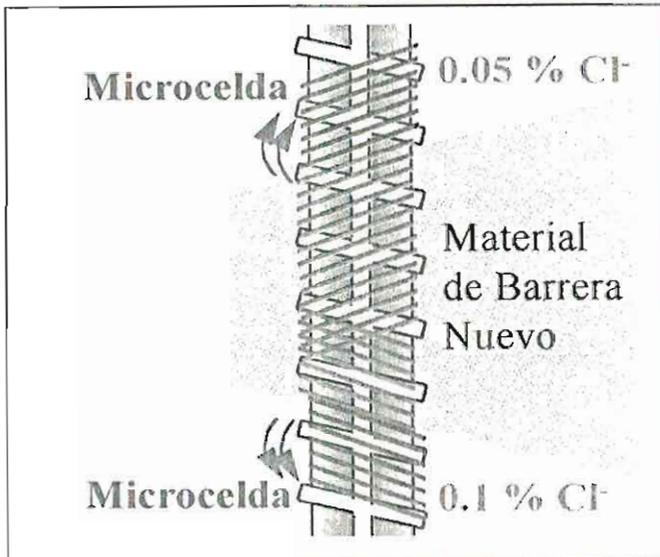


Figura 1.5

**MICROCELDA OCASIONADA DESPUÉS  
DE UNA REPARACIÓN**

El comportamiento de una macrocelda para una estructura aireada, ciclo seco de la estructura, y o sin airear, ciclo húmedo de la estructura ( ver **figura 1.6** ), es importante analizar cuando una estructura esta poco aireada las áreas catódicas se eliminan formando una macrocelda. Otra posibilidad de macrocelda pura es altos rangos de pasivación y pequeñas áreas corroyéndose como en fracturas ( ver **figura 1.7** ). En general , una microcelda permanecerá corroyendo ciertas áreas y sus corrientes aportan un 10% a la corriente de la macrocelda. La corriente de una macrocelda de corrosión depende:

- Diferencia de los Potenciales de corrosión de los aceros pasivos y aceros activos ( $\Delta E_o$ )
- Área relativa en los aceros pasivos y aceros activos ( $S_p$ ,  $S_a$ )
- Resistencia óhmica entre los aceros
- Velocidad de corrosión de aceros activos y pasivos ( $P_p$ ,  $P_a$ )

En la siguiente ecuación desarrollada por C. Andrade, S. Felit y otros se relaciona las variables mencionadas en el párrafo anterior:

$$I_{galv} = \frac{\Delta E_o}{R S_a + P_a + P_p S_a / S_p} \quad (\text{Ec. 1})$$

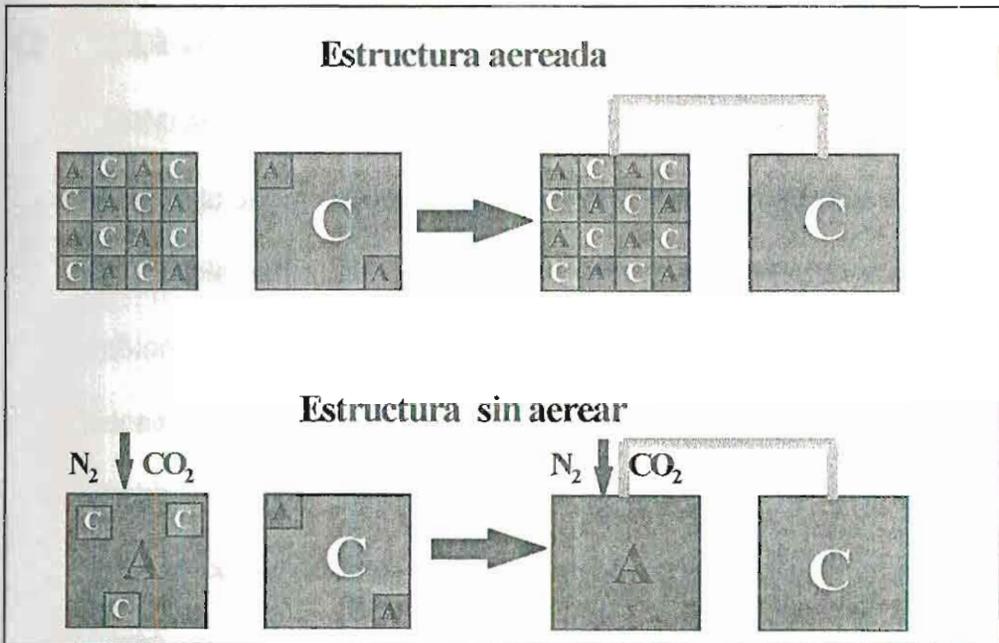


Figura 1.6

**ACTIVIDADES DE MACROCELDAS Y MICROCELDAS DE CORROSIÓN**

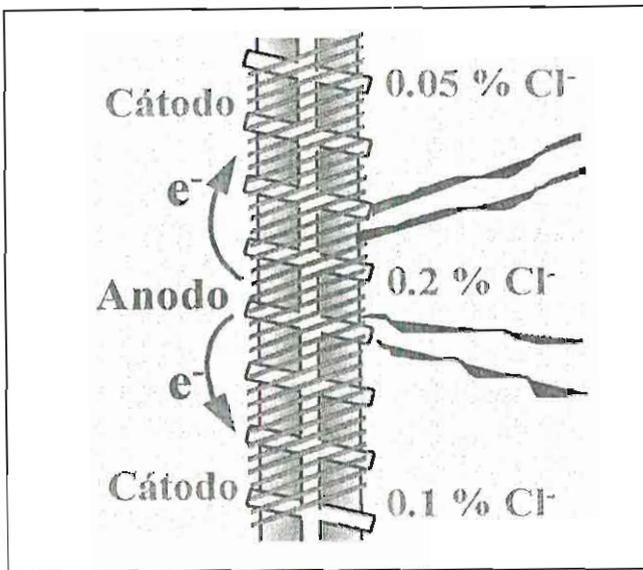


Figura 1.7

### FRACTURAS ANTES DE REPARARSE

## 1.2 ALTERNATIVAS PARA COMBATIR LA CORROSION EN EL HORMIGÓN

Por definición, la corrosión es la detereorización de una sustancia o sus propiedades por causa de una reacción de este con su ambiente. Para el acero de refuerzo embebido en el concreto, el proceso de corrosión se debe principalmente al ataque del ión cloruro. Prácticamente toda sustancia esta expuesta iones de cloruros como puente, columna y otras estructuras marina y de campo , pueden ser dañadas sino se toman especiales precauciones en su diseño y construcción.

Entendiendo el proceso de corrosión y el ambiente en el cual una estructura estará localizada es necesaria diseñar estructuras de hormigón armado resistentes a la corrosión para incrementar su durabilidad.

Actualmente existen algunas alternativas para combatir la corrosión del acero de refuerzo por la inducción de cloruros en el concreto. Estas opciones incluyen una estricta adherencia a los códigos y guías actuales; como aditivos químicos, aditivos minerales, selladores y membranas, los cuales directa o indirectamente reducen la permeabilidad del concreto incrementando el tiempo que le toma a los iones cloruros a migrar al nivel del acero de refuerzo; y sistemas los cuales ofrecen protección a la superficie del acero tales como aditivos inhibidores de corrosión, recubrimiento epóxico al acero de refuerzo y protección catódica.

Estas opciones pueden ser clasificadas en: tratamiento al concreto o tratamiento al acero de refuerzo, o como en algunos casos una combinación de ambos. La primera es el resultado de la reducción de la permeabilidad de los cloruros en el concreto, mientras que la segunda es la formación de un film protector o barrera en la superficie del acero. En esta segunda opción se encuentran los

inhibidores, en este capítulo les daremos énfasis a los Inhibidores orgánicos basados en sales de aminas y surfactantes.

### 1.3 ACCIÓN DE LOS INHIBIDORES EN EL HORMIGÓN ARMADO

El Comité 116 del Instituto Americano del Concreto (ACI) define un inhibidor de corrosión como “un compuesto químico, líquido o polvo, que disminuye efectivamente la corrosión del acero de refuerzo, usualmente en muy pequeñas concentraciones, como un aditivo” .

Existen inhibidores anódicos ( disminuyen la velocidad de la reacción anódica ), catódicos y mixtos. Distintas sustancias inhibidoras han sido utilizadas en el hormigón, como aditivos inhibidores como nitritos, cromatos, benzoatos, fosfatos, molibdatos, etc.

Los aditivos inhibidores deben, en primer lugar ser compatibles con el hormigón no alterando significativamente sus propiedades físico-mecánicas y además deben ser económicamente competitivos con el resto de métodos de protección.

Con respecto a otros métodos como : protección catódica, pinturas o recubrimientos , los inhibidores presentan una clara ventaja de no necesitar mano de obra especializada ya que se utilizan como cualquier aditivo, ni tampoco necesitan de mantenimiento.

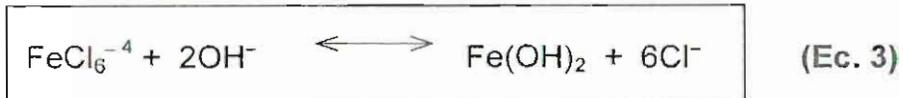
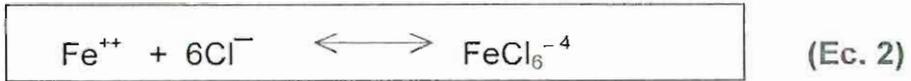
Actualmente en el mercado se disponen de inhibidores basados en nitritos de calcio y otros basados en compuestos orgánicos, en la presente investigación se utilizarán inhibidores orgánicos basados en sales de aminas y surfactantes.

El inhibidor basado en nitrito de calcio provee una protección contra la corrosión por oxidación de la superficie del acero de refuerzo, iones ferrosos del acero e iones de nitrito compiten reaccionando de la siguiente manera :



Es generalmente aceptado que el ión cloruro reaccione con iones ferrosos para formar un compuesto soluble el cual reaccionará con iones oxidrónicos principales para formar el  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ . El resto del ión cloruro reaccionará en el futuro con iones ferrosos.

Una reacción típica entre iones ferrosos e iones cloruros es como sigue abajo :



Los iones cloruros e iones nitritos compiten por los iones ferrosos producidos por el acero de refuerzo. La cantidad relativa de iones de cloruro e iones de nitrato determinan dos reacciones químicas que toman lugar descritas arriba. Si la cantidad de iones de nitrato es mayor que iones de cloruro, la combinación de iones nitrato con iones ferrosos acorde con la primera reacción formar una capa de óxido para proteger el acero de refuerzo. Sin embargo, si los iones cloruro están presentes en mayores cantidades que los iones de nitrato, la segunda reacción ocurrirá resultando la corrosión en el acero de refuerzo. La efectividad del inhibidor basado en nitrato de calcio es dependiente de la habilidad de la especificación del ingeniero para predecir la cantidad de iones cloruro que una estructura estará expuesta durante su vida de servicio, y la selección apropiada de la dosificación de la mezcla.

El inhibidor orgánico basados en sales de aminas y surfactantes ofrecen una protección contra la corrosión del acero embebido independiente de la cantidad de cloruros y proveen de un film protector o barrera en la superficie del acero el cual previene el contacto de los cloruros en contacto con el acero, su mecanismo de acción es basado en el mecanismo de los inhibidores volátiles de corrosión o VCI.

Los inhibidores volátiles de corrosión son inhibidores secundarios de capa electrolítica los cuales poseen apreciables presiones de vapor saturada bajo condiciones atmosféricas, de tal forma que permita un transporte en fase de vapor de la sustancia inhibidora. Por definición, solamente los compuestos que tiene una apreciable presión de vapor bajo condiciones atmosféricas y puedan actuar como inhibidores de capa electrolítica por cambio electroquímicos de la cinéticas de las reacciones de los electrodos debe ser clasificados como VCI.

Un inhibidor, incluyendo los VCI, deben:

1. Ser capaces de establecer una unión estable con la superficie

del metal en un ambiente dado de un cierto rango de acidez y presión.

2. Crear una capa impenetrable para los iones de corrosión.

Los VCI son sólidos o líquidos para una fácil manipulación. La volatilidad es simplemente un medio de transporte. El vapor protector se disemina y acondiciona el espacio encerrado hasta que se alcance un equilibrio. El proceso de inhibición empieza cuando el vapor hace contacto con la superficie metálica y se condensa para formar un delgado film de microcristales. Incluso en presencia de humedad, los cristales se disuelven y desarrollan una fuerte acción iónica como se observa en la **figura 1.8**.

Resultado de esta actividad es la absorción de los iones protectores en la superficie metálica, con la consecuente formación de un film molecular que crea una barrera entre el metal y el electrolito.

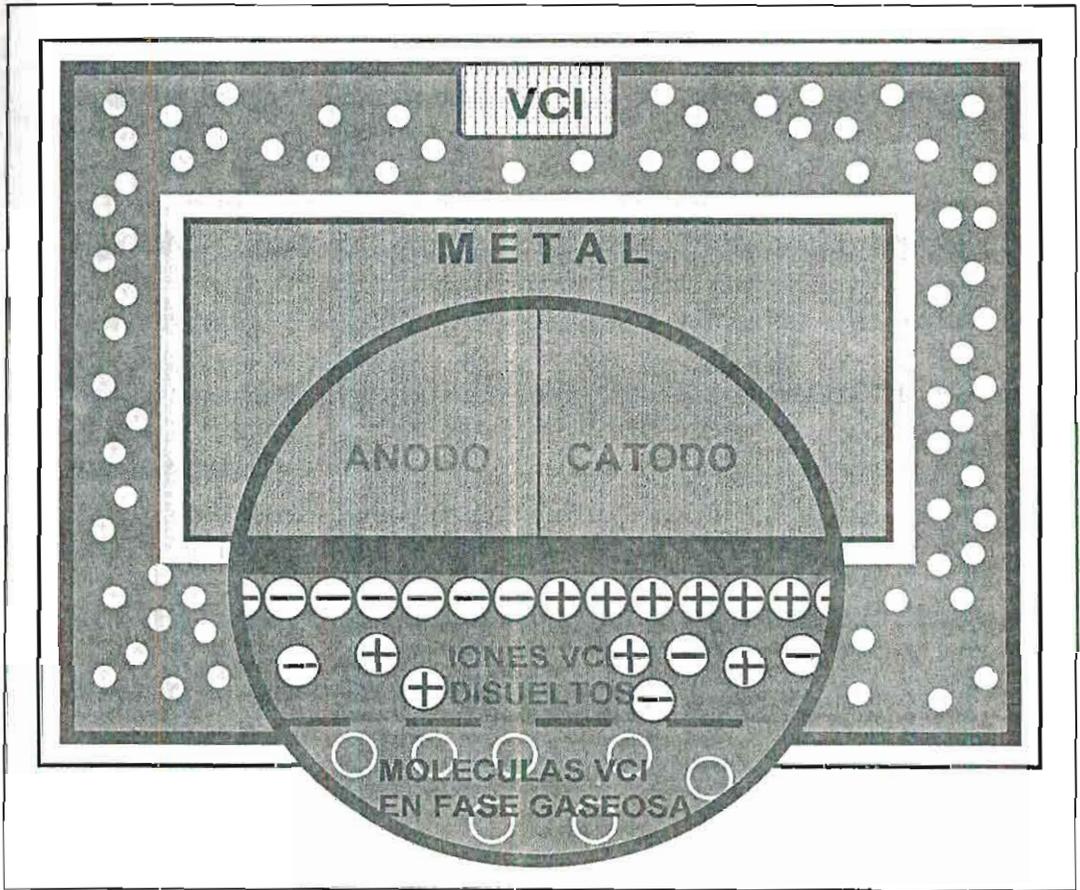


Figura 1.8

### MECANISMO DE ACCIÓN DE LOS VCI

Existen inhibidores que tiene una alta presión de vapor ocasionando que su acción volátil sea corta debido a la excesiva vaporización del inhibidor. Otros en cambio tienen una baja presión de vapor que aunque su duración es larga pero se necesita mucho tiempo para la vaporización.

El rango de volatilización de los VCI tiene una dependencia con respecto a la temperatura, así que más material inhibido es evaporado a altas temperaturas.

Los VCI pueden autoajustarse para ambientes agresivos a temperaturas elevadas; por cuanto es conocido que existe una mayor tendencia a la corrosión de los metales a elevadas temperaturas.

Los inhibidores de este tipo en el hormigón los acondicionan y se transportan a través de este para luego llegar al metal y también por afinidad magnética proveen del film molecular protector.

#### 1.4 MECANISMO DE INHIBICIÓN

En la **figura 1.9** se muestra el mecanismo de inhibición en cualquier superficie metálica como el acero de refuerzo de las estructuras de hormigón.

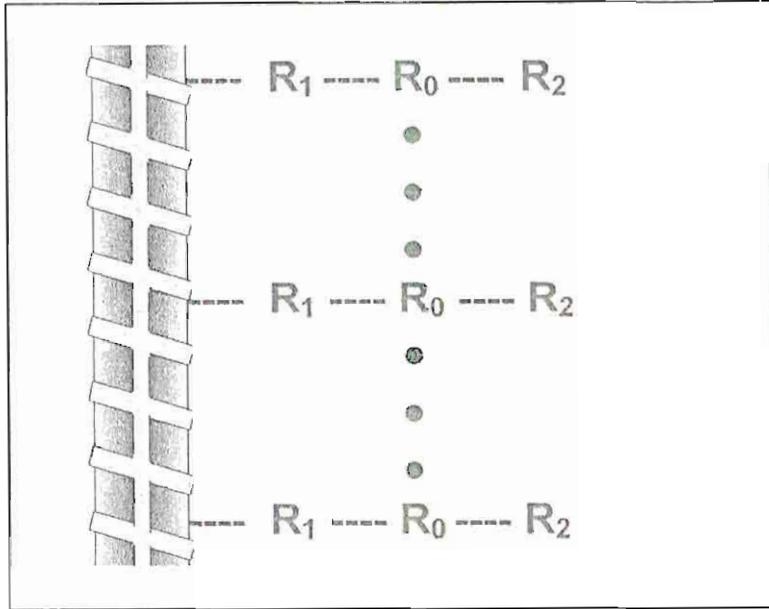


Figura 1.9

### MECANISMO DE INHIBICIÓN DE LOS VCI

El grupo funcional  $R_1$  unido al núcleo  $R_0$  de la molécula del inhibidor es el responsable para la absorción del inhibidor con el metal en un ambiente dado. El grupo funcional  $R_2$  también unido al núcleo  $R_0$  es el responsable del espesor y la impenetrabilidad del film.

En el diseño de un compuesto inhibidor para un ambiente en particular primero es necesario variar el grupo funcional  $R_1$  hasta

que una sustancia capaz de ser firmemente absorbida en la superficie del metal sea obtenida, luego de obtener el  $R_1$  se varía el grupo funcional  $R_2$  hasta que una resistencia satisfactoria a la penetración de iones agresivos sea alcanzada. Además de lo anteriormente nombrado se debe asegurar que el compuesto tenga una apreciable presión de vapor a temperaturas ambientales.

Usando un espectrómetro fotoelectrónico de rayos X se ha determinado una capa protectora molecular de los VCI inhibiendo la corrosión en el acero de refuerzo que fluctúa entre 20 y 100 Å de espesor.

## 1.5 MECANISMO DE DIFUSIÓN A TRAVÉS DEL CONCRETO

Existen tres mecanismos por los cuales se produce la migración de fluidos e iones a través del concreto. Estos son:

### Mecanismo de Acción

- **ABSORCIÓN** : por atracción capilar
- **PERMEABILIDAD** : bajo un gradiente de presión
- **DIFUSIVIDAD** : bajo un gradiente de concentración

Estos mecanismo de migración son necesarios por dos razones principales:

- I. Contaminantes del : - agua,
  - aceite (caliente)
  - gas líquido (frío)
  - gases
  
- II. Durabilidad: - resistencia a la detereorización del concreto
  - protección de acero de refuerzo para la corrosión

- **PERMEABILIDAD** : es el mecanismo penetración menos común de un agente agresivo, ya que permeabilidad se denomina así a la propiedad del hormigón cuando la “fuerza propulsora” es una diferencia de presión, sea de un gas o de un líquido. Como depósitos de agua, presas, etc.

Actualmente para disminuir la permeabilidad existen superplastificantes o reductores de agua de alto rango, en la presente tesis se usaron plastificantes los cuales reducen una cierta cantidad de agua y mejoran la trabajabilidad del hormigón.

- **ABSORCIÓN** : la absorción capilar es un fenómeno que ocurre al poner en contacto un líquido con un sólido poroso. La altura que alcanzará el líquido, o la masa de él por unidad de superficie que penetrará, depende del tamaño de los poros, la viscosidad del líquido y la temperatura.

Los inclusores de aire son aditivos que al ser añadidos al hormigón introducen aire en forma de esferoides aislados con diámetros de 0,075 a 1,25 mm que se quedan aprisionados como minúsculas pelotitas, distribuidas por el interior del hormigón en proporción de unos 5 millones por litros de masa. El aire disperso en el hormigón en forma de burbujas proporciona elasticidad a la masa de hormigón, disminuyendo la probabilidad de agrietarse el hormigón y contribuyendo a disminuir la acción capilar del hormigón. En la presente tesis se utilizaron inclusores de aire para comprobar su acción anticapilar.

- **DIFUSIÓN**: Difusión o difusibilidad se produce cuando hay una diferencia de concentración entre dos puntos del elemento que difunde. Los cloruros e inhibidores de corrosión evaluados en esta investigación migran a través del concreto por este mecanismo. La difusión en el hormigón se produce en general en estado

estacionario, lo que lleva a la necesidad de valerse de la segunda ley de Fick :

$$\frac{dc}{dt} = -D \frac{d^2c}{dx^2} \quad (\text{Ec. 5})$$

donde:  $x$  = profundidad de penetración

$c$  = concentración del agresivo

$D$  = coeficiente de difusión

La resolución de esta ecuación puede dar expresiones finales diferentes según las condiciones iniciales y límite que se consideren. Así para el caso de los cloruros que generalmente aceptado que responde a la ecuación:

$$\frac{C_s - C_x}{C_s} = \text{erf} \frac{x}{2(Dt)^{0.5}} \quad (\text{Ec. 6})$$

donde:  $C_s$  = es la concentración superficial

$C_x$  = es la concentración en el punto considerado

Investigaciones han determinado que el mayor factor en la difusión de los cloruros es la química del cemento. La migración de los cloruros a través del concreto está también determinado por el nivel del cloruros en la superficie, en la presente investigación la

concentración del ión cloruro en el agua es de 91.000 ppm, como se indica en la **tabla # 1** una solución salina de este tipo es denominada salmuera y es altamente corrosiva.

**TABLA # 1**  
**CONTENIDO DE SALES P.P.M. EN MEDIOS ACUOSOS**

Denominación	Conten. Total de sales p.p.m.
Aguas dulces	Hasta 1.000
poco	De 1.000 a 5.000
Aguas salobres medianamente	De 5.000 a 15.000
fuertemente	De 15.000 a 35.000
Agua de mar	Alrededor de 35.000
Salmueras	De 35.000 a 200.000

Los inhibidores estudiados en la presente tesis basan su mecanismo de migración por difusión es decir se transportan por cambio de concentración, esta difusión ha sido determinada por dos métodos: Por la técnica del electrodo selectivo y por la técnica del isótopo radioactivo.

En la **tabla # 2** se muestran los mecanismos de migración a través del hormigón con las diferentes causas y problemas que ocasionan la migración de iones.

**TABLA # 2**

**MECANISMOS DE MIGRACIÓN A TRAVÉS DEL HORMIGÓN**

FUNCIÓN	ABSORCIÓN	PERMEABILIDAD		DIFUSIÓN		FACTORES DE INFLUENCIA
		LIQUIDO	GAS	IÓNICO	GAS	
<b>Contaminación de fluidos</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• baja presión</li> <li>• alta presión</li> </ul>	✓	✓	✓			Tiempo Contenido de humedad
<b>Resistencia del concreto a la detereorización, ej. sulfatos, ácidos....</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• baja presión</li> <li>• alta presión</li> </ul>	✓	✓		✓	✓	Sulfatos
<b>Prevención de corrosión del acero de refuerzo</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ingreso de cloruros</li> <li>• carbonatación</li> </ul>			✓	✓	✓	Cemento mezclado con cloruros Contenido de humedad
<b>Reducción en la velocidad de corrosión</b>	✓			✓	✓	El contenido de humedad afecta la difusión de los gases y la resistividad.

### 1.5.1 Medición por la técnica del electrodo selectivo

Existen algunos métodos mediante los cuales se ha determinado la presencia y la velocidad de difusión de los inhibidores orgánicos de corrosión por migración. Para determinar las aminas (componentes contenidos en estos inhibidores orgánicos de corrosión) Uno de los métodos más comunes es el análisis espectrofotométrico el cual es basado en el cambio de coloración de los componentes cuando son mezclados con componentes específicos.

Características de este método es su sensibilidad para grupos funcionales particulares. Para determinar las aminas los resultados son basados en:

- a) Reacción del metilorange con los componentes del Inhibidor obteniéndose una coloración amarilla en estos componentes.
- b) Reacción con el ión - electrodo selectivo es basado en la sal diazo p-nitroanilina, la cual cuando se mezcla con los componentes del inhibidor dan una coloración roja la cual es extraída en alcohol isoamyl.

● Determinación electroquímica del inhibidor en el concreto

Basado en la similitud entre la amina y la amonía, se introdujo la idea para tratar de determinar el cambio en la concentración cuando los componentes de estos inhibidores difusen a través de muestras de concreto, para esto se uso el electrodo sensible amonia debido a que la amonia es sensible a algunos de los componentes de estos inhibidores.

El electrodo ORION, modelo 95-12 fue escogido para este propósito. El electrodo ( ver **figura 1.10** ) consiste en un cilindro plástico de 12 mm de diámetro, 149 mm de largo, en el interior de este tubo un electrodo de vidrio y un electrodo de Ag/AgCl sumergido en una solución de 0.1 M  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Entre el electrodo de vidrio y la membrana de teflón es muy delgada la capa interna del electrolito ( 0.1 M  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ) . El electrodo esta conectado con el conector BNC al instrumento digital ( Iskra Ma-5740) para medición pH/mV.

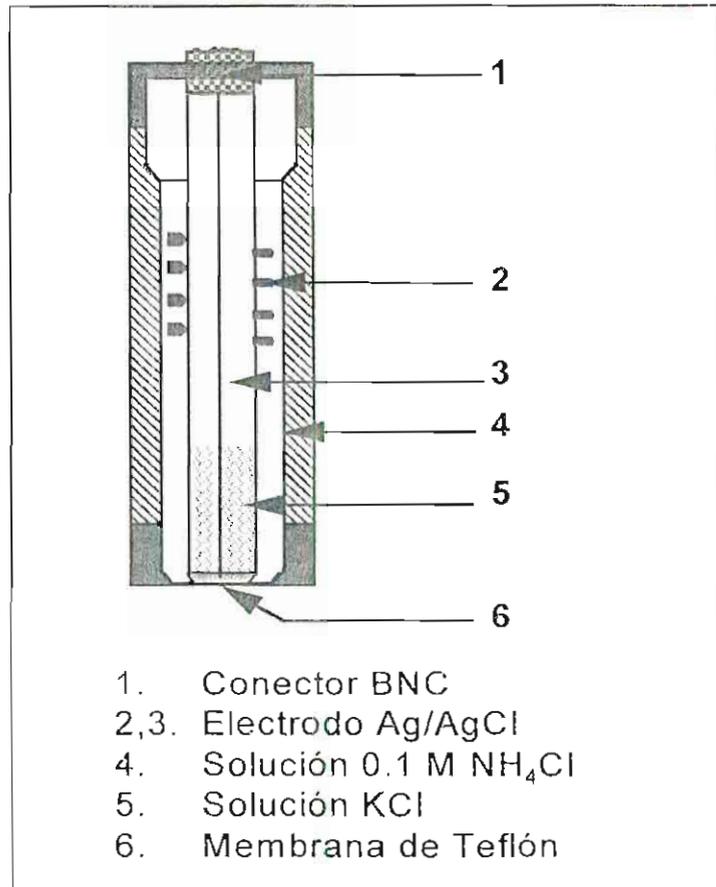


Figura 1.10

### DETALLE DEL ELECTRODO DE AMONIA

#### ① Determinación experimental del coeficiente de difusión

Usando esta técnica se determinó experimentalmente el coeficiente de difusión del inhibidor de superficie construyendo bloques de

concreto (después cortados a cilindros) para estudiar el inhibidor de superficie y dos cilindros de mortero para estudiar el aditivo inhibidor, y luego fueron utilizados en la celda de difusión, la cual es explicada más adelante.

En la **tabla # 3** se muestra la composición del concreto y los diseños de las mezclas utilizadas para investigar el inhibidor de superficie.

**TABLA # 3**

**COMPOSICIONES DEL CONCRETO**

Código de la Mezcla	T-3 (15',32,42)	T-3 (37,39,46)	T-4 (8',23,48)
<b>Materiales</b>			
<b>Cemento</b> (kg/m <sup>3</sup> )	380	380	320
<b>Agua</b> (l/m <sup>3</sup> )	171	209	172
<b>Agregado</b> <b>0-31.5 mm</b> (kg/m <sup>3</sup> )	1823	1720	1889
<b>A/C</b>	0.45	0.55	0.54
<b>Asentamiento</b> (cm)	4.5	17.5	10.5

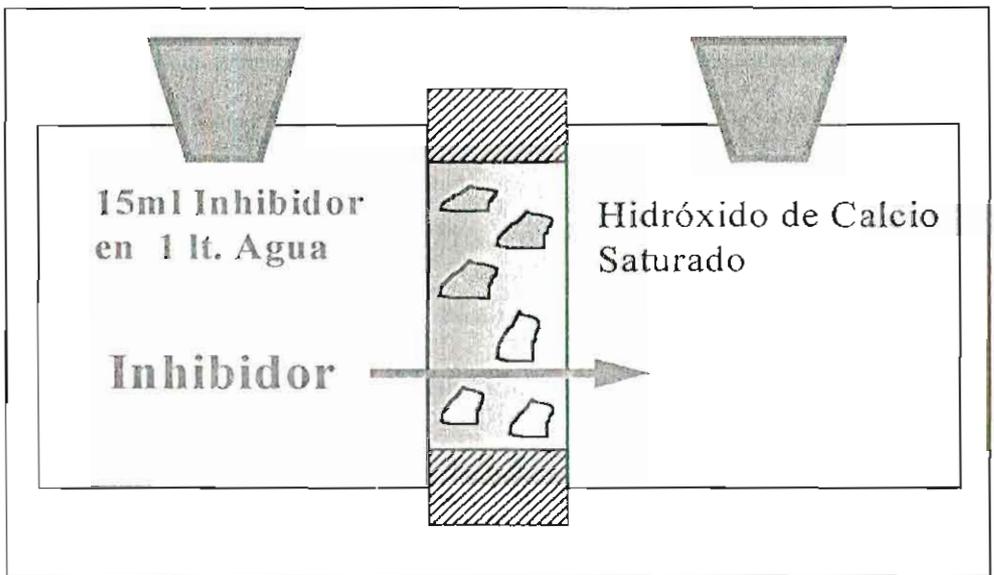
Para determinar la calidad del hormigón, se calculó el coeficiente de la permeabilidad a los gases y de acuerdo a este valor se le otorgo una categoría a la muestra como se indica en la **tabla # 4** .

**TABLA # 4**  
**COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD DE LOS GASES**  
**EN EL CONCRETO**

<b>Código del concreto</b>	<b>Categoría de Permeabilidad</b>	<b>Coeficiente de permeabilidad de los gases, k (m<sup>2</sup>)</b>
T - 2,3	<b>I</b>	$1 - 3 \times 10^{-15}$
T - 2; 3, 4	<b>II</b>	$1 - 3 \times 10^{-16}$
T - 2; 4	<b>III</b>	$4 - 5 \times 10^{-17}$

Con los especímenes de concreto se construyeron las celdas de difusión, cuyo cuerpo tiene dos partes, un espécimen de concreto de diámetro 100 mm y profundidad entre 30 a 50 mm es construido y unido a las celdas con silicona. Una abertura son hechas en las celdas para introducir la solución a estudiar.

En la **figura 1.11** se muestra esta celda de difusión, una parte de la celda contiene una solución de 11.5 ml del Inhibidor de Superficie en 1 l. de Agua y en la otra una solución saturada de Hidróxido de Calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .



**Figura 1.11**

**CELDA DE DIFUSIÓN PARA INHIBIDOR DE SUPERFICIE.**

En la **tabla # 5** se muestra la composición del mortero y los diseños utilizados en esta investigación.

TABLA # 5

## COMPOSICIONES DEL CONCRETO

Código de la Mezcla	M 1-5
<b>Materiales</b>	
Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	380
Agua (l/m <sup>3</sup> )	171
Agregado 0-8 mm (kg/m <sup>3</sup> )	1823
A/C	0.45
MCI-2000 <sup>1</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	1.78
Asentamiento (cm)	16

Las muestras de mortero con el código M 1-3 contienen el aditivo inhibidor añadido durante la preparación del mortero. Mientras que las muestras M 4-5 también contienen el aditivo pero estos se aplicaron en concretos con el inhibidor de superficie previamente aplicado simulando condiciones similares durante una reparación ( ver figura 1.12 ), luego estos especímenes fueron utilizados en las celdas.

<sup>1</sup> MCI-2000 es el nombre comercial del aditivo inhibidor, en esta tesis se denomina inhibidor A.

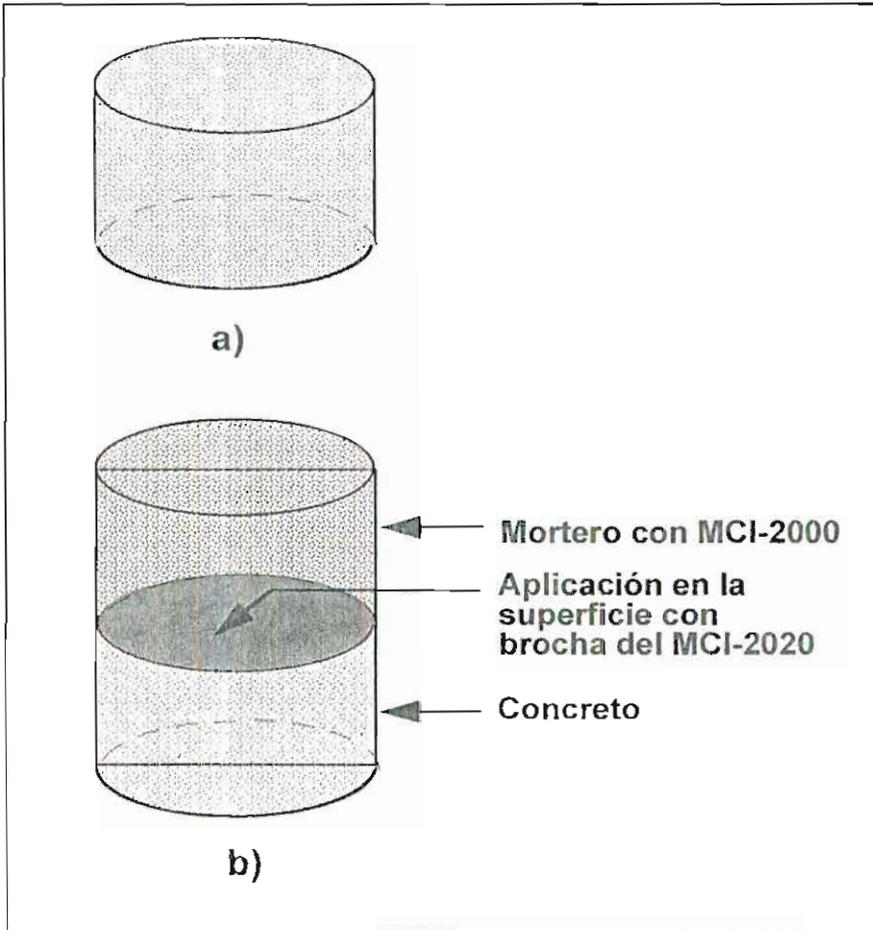


Figura 1.12

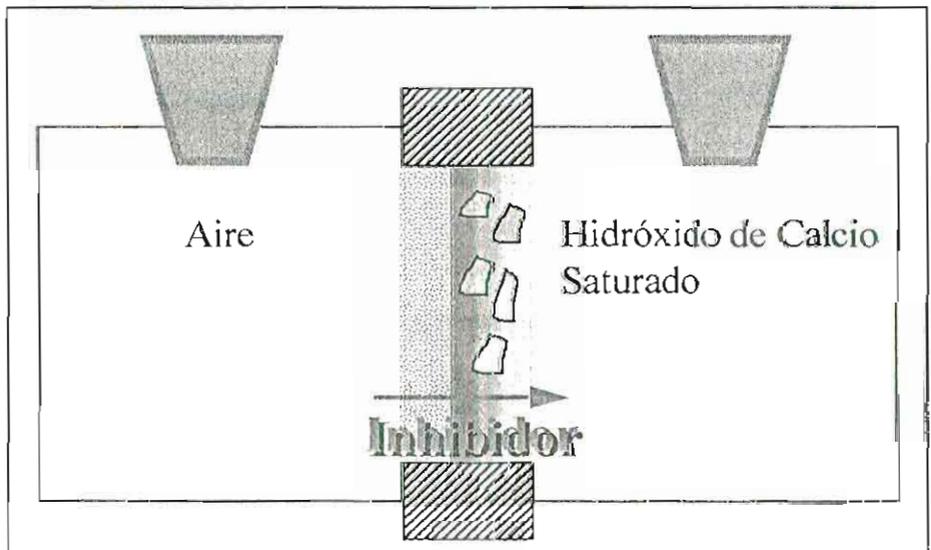
**MORTERO PARA ENSAYOS DE DIFUSIÓN DEL ADITIVO INHIBIDOR.**

Luego se determinaron los coeficientes de permeabilidad de los gases de acuerdo a la norma BS 1902 ( ver **tabla # 6** ).

**TABLA # 6**  
**COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD DE LOS GASES**  
**EN EL MORTERO**

Código del concreto	Categoría de Permeabilidad	Coefficiente de permeabilidad de los gases, $k$ ( $m^2$ )
M 1-3	I	$1 - 2 \times 10^{-15}$
M - 4,5	II	$1 - 1.3 \times 10^{-16}$

En la **figura 1.13** se muestra la celdas de difusión para el estudio , una parte de la celda contiene aire y en la otra una solución saturada de Hidróxido de Calcio.



**Figura 1.13**

**CELDA DE DIFUSIÓN PARA INHIBIDOR DE SUPERFICIE**  
**PARA CILINDRO DE LA FIGURA 14 B)**

Las difusiones del MCI-2000 y MCI-2020 fue medida en las celdas de difusión en diferentes intervalos de tiempo. Inclusive la concentración del inhibidor varía en función del tiempo en un mismo concreto e incrementado la concentración del inhibidor ocasiona que este se transporte más rápido.

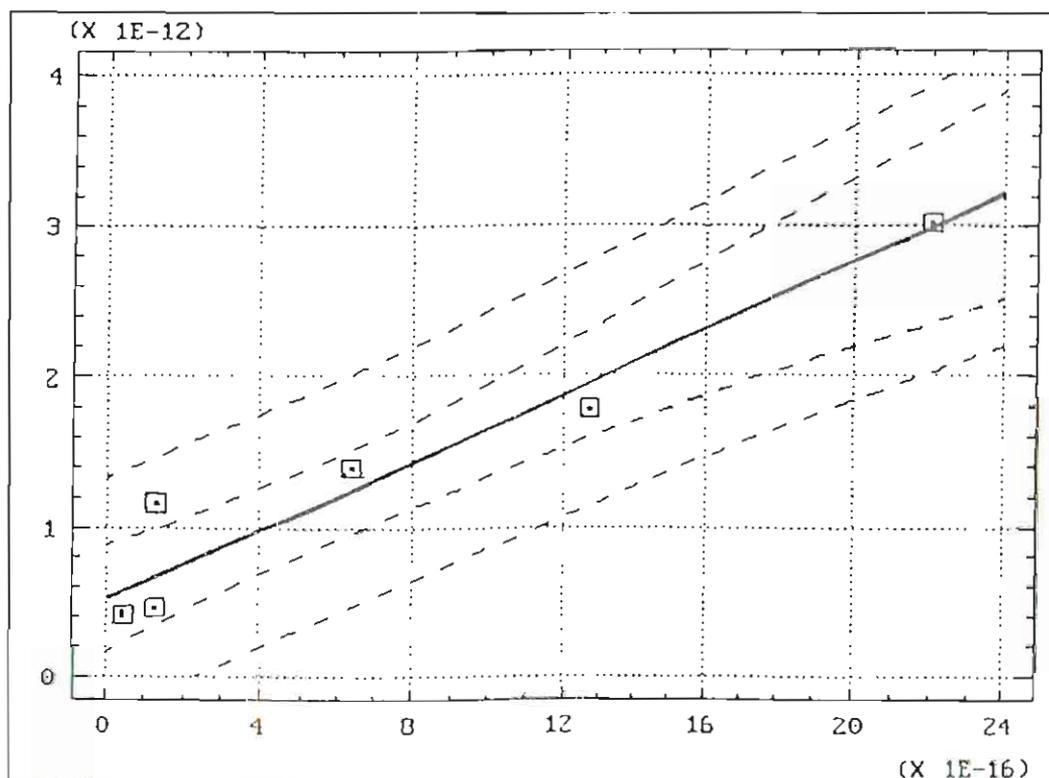
En la categoría I de acuerdo a la permeabilidad de los gases , la media del coeficiente de difusión va de  $1.78 \times 10^{-12}$  a  $4.07 \times 10^{-12}$  (  $m^2/s$  )

En la categoría II de acuerdo a la permeabilidad de los gases , la media del coeficiente de difusión va de  $1.17 \times 10^{-12}$  a  $1.39 \times 10^{-12}$  (  $m^2/s$  )

En la categoría III de acuerdo a la permeabilidad de los gases la media del coeficiente de difusión de va de  $4.0 \times 10^{-13}$  a  $4.6 \times 10^{-13}$  (  $m^2/s$  )

A medida que la permeabilidad de un gas en el concreto disminuía , la difusión del MCI-2020 fue más constante.

Como se observa en la **figura 1.14** la relación entre el coeficiente de permeabilidad de un gas y el coeficiente de difusión del inhibidor es directamente proporcional, esto es lógico debido a que el inhibidor migra por difusión, si el coeficiente de permeabilidad de un es menor el inhibidor tardará más en llegar al acero.



**Figura 1.14**

**CORRELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE UN GAS Y EL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE INHIBIDOR**

Para calcular la velocidad de difusión del inhibidor se usó la Segunda Ley de Fick, con la que se determinó la cantidad de inhibidor que recorre una determinada distancia hasta alcanzar el acero de refuerzo en un determinado intervalo de tiempo para cada categoría de concreto, tal como se muestra en la **tabla # 7**

**TABLA # 7**  
**CONCENTRACIÓN DE 100 PPM DEL INHIBIDOR EN**  
**AÑOS SEGÚN LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO**

<b>Categoría de Permeabilidad</b>		<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>
Coeficiente de permeabilidad de un gas	m <sup>2</sup>	1-3 x 10 <sup>-15</sup>	1-3 x 10 <sup>-16</sup>	4-5 x 10 <sup>-17</sup>
Coeficiente de difusión del MCI-2020 <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup> /s	3,1 x 10 <sup>-8</sup>	1,2 x 10 <sup>-4</sup>	4,2 x 10 <sup>-9</sup>
Concentración de 100 ppm de MCI 2020 a 3 cm	Años después	1	2	6
Concentración de 100 ppm de MCI 2020 a 5 cm.	Años después	2	6	19
Velocidad de difusión a 3 cm. de la superficie	m/s	1,1 x 10 <sup>-9</sup>	4,8 x 10 <sup>-10</sup>	1,6 x 10 <sup>-10</sup>
Velocidad de difusión a 5 cm. de la superficie	m/s	7,9 x 10 <sup>-10</sup>	2,7 x 10 <sup>-10</sup>	8,5 x 10 <sup>-11</sup>

<sup>2</sup> MCI-2020 : es el nombre comercial del inhibidor de superficie, en esta tesis se lo conoce con inhibidor B

La concentración del inhibidor en el nivel del concreto es variable con el tiempo. Los rangos de difusión son también variables con el tiempo. La concentración de 100 ppm estará después de 1 a 6 años a 3 cm. de la superficie del concreto. La concentración de 100 ppm. Estará después de 2 a 19 años a 5 cm. de la superficie del concreto.

### 1.5.2 **Medición por la técnica del isótopo radiactivo**

Con esta técnica se utilizaron dos métodos diferentes para determinar la difusión del inhibidor :

- Método 1: El inhibidor fue aplicado en la superficie superior de un cilindro.
- Método 2: El inhibidor fue mezclado con un mortero de reparación. Este mortero sobre la superficie de un cilindro. El espesor de este mortero fue de 2.0 cm.

Luego una extracción fue hecha desde varias distancias de la superficie de aplicación del inhibidor para determinar su concentración.

La concentración fue determinada por mediciones del nivel radioactivo  $\beta$ .

Como una clasificación radioactiva, el isótopo radioactivo de hidrógeno tritium ( $^3\text{H}$ ) fue usado. Esta técnica es usada en medicina, biología y diferentes ramas de la química. El Tritium es una fuente de rayos  $\beta$  y un excelente sustituto para el hidrógeno en moléculas orgánicas.

Luego de un proceso de intercambio de moléculas, enfriamiento del inhibidor al final se unieron los átomos de tritium con el inhibidor creando  $[^3\text{H}]\text{MCI}$ . Después en un cromatógrafo se midió la radioactividad del  $[^3\text{H}]\text{MCI}$  siendo ésta 120 Ci/mmol y radioquímica pura sobre 95%. Para propósitos experimentales la mezcla de  $[^3\text{H}]\text{MCI}$  sintetizada e Inhibidor ( rango 0.8 mkg: 1 ml) fue usada. Radioactividad de la mezcla: 1 MCI/ml.

Para realizar el experimento se construyeron cilindros de 43,5 mm de diámetro y 43,5 de altura.

Para eliminar posibles humedecimiento causados por el inhibidor las superficies fueron recubiertas con parafina y los cilindros colocados en envases plásticos ( ver **figuras 1.15 y 1.16** ).

**Método 1** : El Inhibidor fue aplicado directamente en la superficie del concreto con una concentración de 400 ml / m<sup>2</sup> El Inhibidor usado en esta aplicación tiene una radioactividad de 18 mkCi/ml. El volumen del Inhibidor en la superficie fue 0.6 ml con una actividad de 10.8 mkCi ( 399.6 kBq ).

**Método 2** : La siguiente mezcla ( por peso) fue usada : Cemento Portland : 1 , Arena : 2, Agua : 0.45 Inhibidor : 0.003

La Radioactividad del inhibidor fue 0.654 mCi/ml. La mezcla para reparar fue aplicada sobre el concreto de superficie cilíndrica. El espesor de la sobrecapa fue de 2.0 cm. La masa de la mezcla de reparación fue usada para una muestra de concreto fue 62.5 gr. Con radioactividad de 35.4 mkCi ( 1310.4

$\times 10^3 \text{ Bq}$  ). La difusión fue medida en función del tiempo así :

Método 1: 2 horas, 1 día, 9 días y 24 días.

Método 2: 1 día, 9 días y 24 días

Luego se extrajeron polvos de concreto en una solución 50% de etanol en cada cilindro desde la superficie a las siguientes distancias:

Método 1: 5, 10 ,15 , 20, 25, 30 mm

Método 2: 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30 mm

El precipitado fue separado y su radioactividad fue analizada con una contador Scintillation. Con este dato se calculó la concentración de tritio.

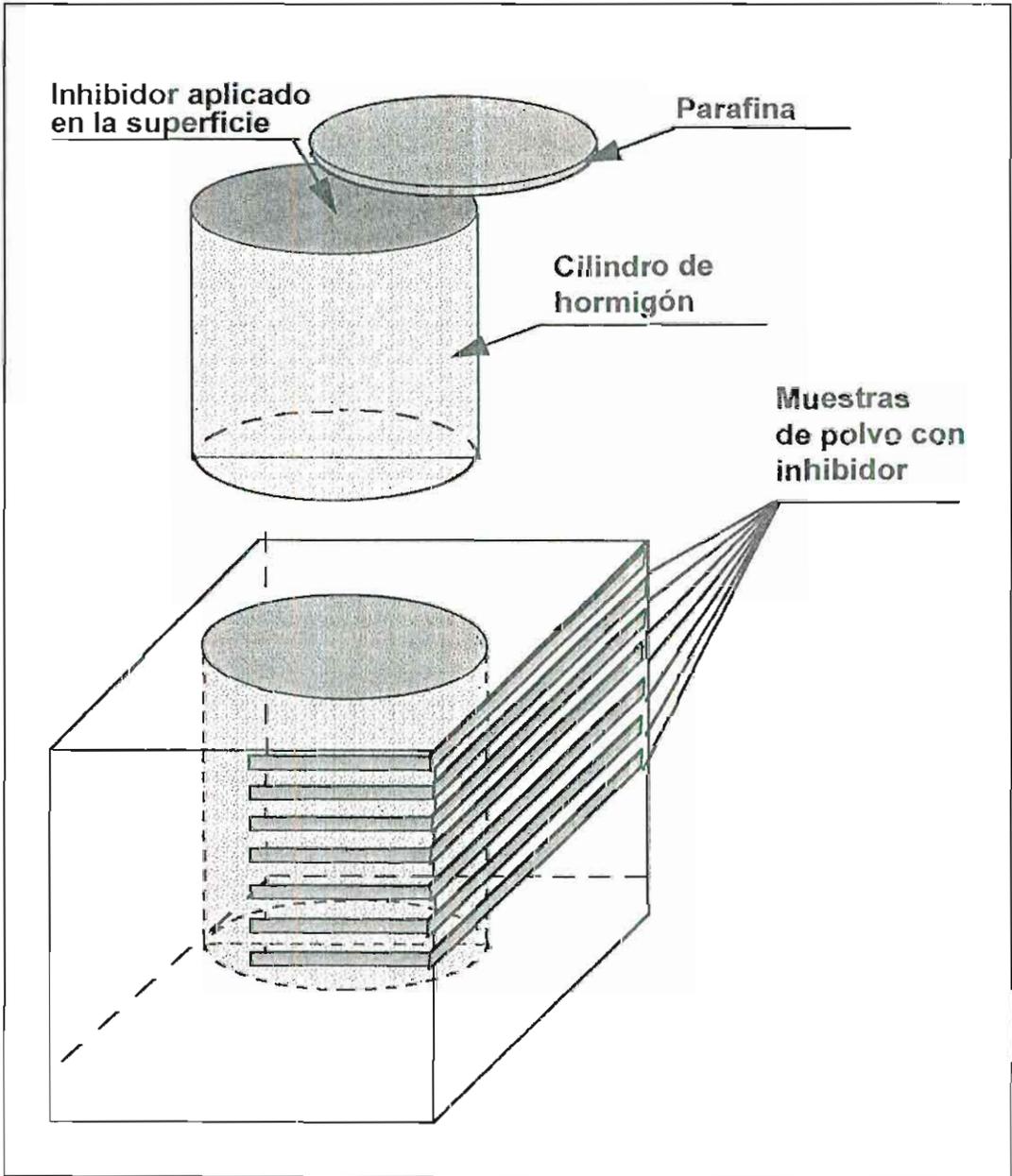


Figura 1.15

EXPERIMENTO MEDIANTE EL MÉTODO 1

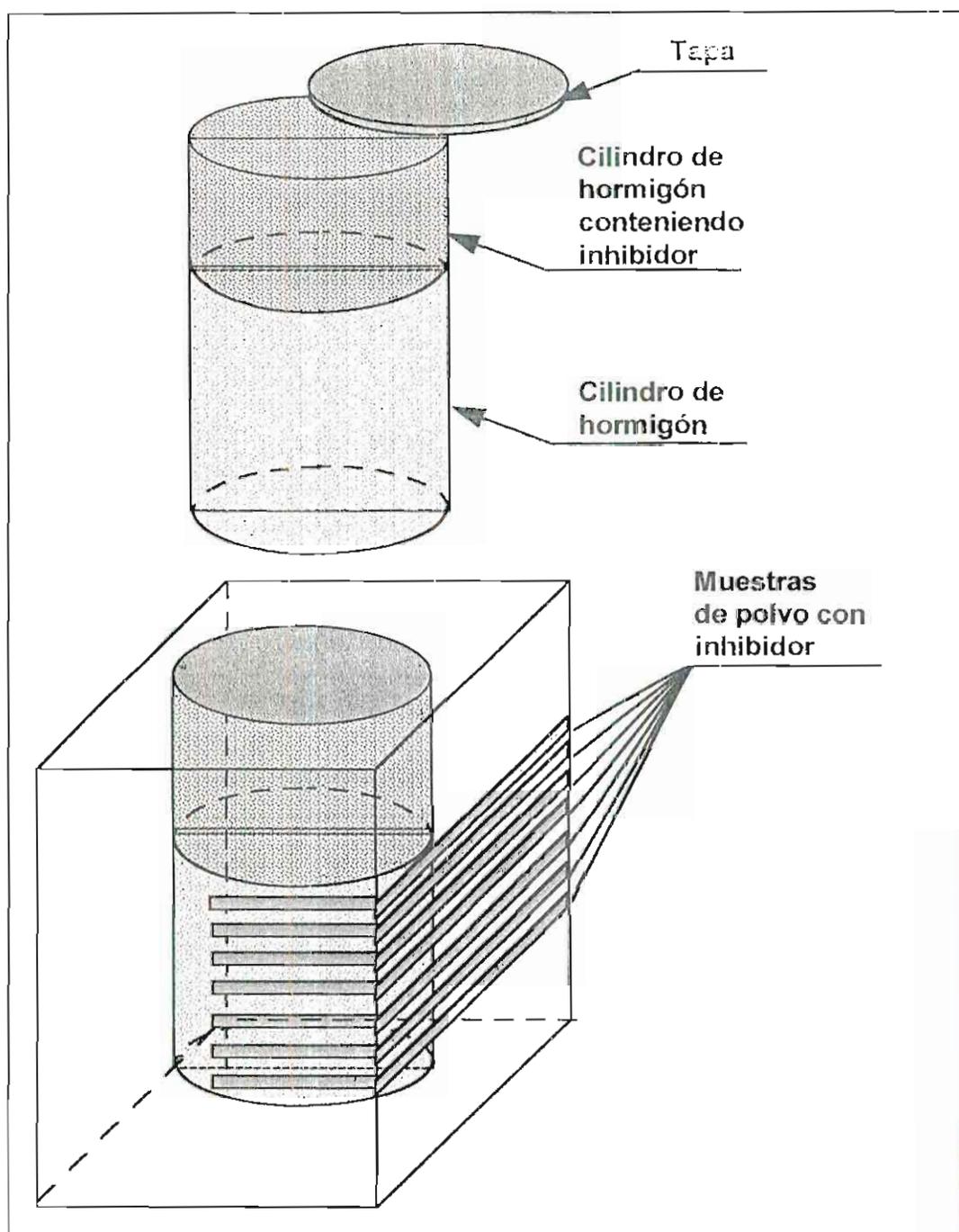


Figura 1.16

EXPERIMENTO MEDIANTE EL MÉTODO 2

En la **tabla # 8** y en la **tabla # 9** se encuentran las concentraciones del inhibidor por el Método 1 y Método 2, respectivamente. La concentración del inhibidor en el concreto está en proporción a su nivel de radioactividad.

Una observación interesante fue que la concentración del MCI en la mezcla de reparación fue 10 veces más baja que en la aplicada en la superficie pero la velocidad de difusión del inhibidor fue más alta, esto se debe a la succión capilar de los espacios porosos del concreto viejo, esto facilita el incremento de la velocidad de la difusión, comparado con el Método 1 donde la difusión se produce a través de las capas húmedas.

TABLA # 8

## MÉTODO 1: IMPREGNACIÓN EN LA SUPERFICIE

Muestra #	Tiempo	Radioactividad Específica, Bq / g					
		5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm
2	2-4 horas	9300 (9.13)	4500 (8.41)	1600 (7.38)	50 (3.91)	0	0
3	1 día	7800 (8.96)	2500 (7.82)	450 (6.10)	200 (5.30)	0	0
4	9 días	10050 (9.21)	3300 (8.10)	1750 (7.47)	1250 (7.13)	500 (6.21)	350
5	24 días	10500 (9.26)	4100 (8.32)	2550 (7.84)	1800 (7.50)	1150 (7.05)	500

TABLA # 9

## MÉTODO 2 : MEZCLA PARA REPARACIONES

Muestra #	Tiempo	Radioactividad Específica, Bq/g						
		1 mm	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm
6	1 día	5500 (9.05)	4500 (8.92)	8000 (8.99)	5200 (8.58)	1200 (7.09)	450 (6.11)	200
7	9 días	11950 (9.39)	8050 (8.99)	5000 (8.52)	2800 (7.94)	950	450	350
8	24 días	16000 (9.89)	10300 (9.24)	7500	2900	1100	600	400

## 1.6 EFECTIVIDAD DE LAS MOLÉCULAS DE LOS INHIBIDORES EN EL HORMIGÓN ARMADO

- **Puente de la Calle Randolph / I-35E SHRP S-658/MN-DOT**

Dirigido por el Programa Estratégico de desarrollo de Carreteras de los Estados Unidos bajo SHRP -658 se procedió en 1986 a rehabilitar las capas de las lozas del puente de la Calle Randolph sobre I-35E ( ver **figura 1.17** ) en St. Paul, Minnesota - Estados Unidos. El proceso incluyó la aplicación de un overlay<sup>3</sup> LSDC en el carril de tráfico hacia este y la aplicación de una sobrecapa LSDC conteniendo el aditivo inhibidor de corrosión, MCI-2000 , en el carril de tráfico hacia el oeste. EL MCI-2000 fue adicionado al la sobrecapa LSDC en un rango de  $0.6 \text{ kg/m}^3$  Antes de colocar la sobrecapa , la cubierta fue retirada hasta una profundidad de 13 mm y las áreas débiles o defectuosas fueron removidas. Las cavidades removidas del concreto defectuoso fueron llenadas con el concreto de la sobrecapa.

La evaluación de la corrosión fue conducida e investigada en todos los carriles este y oeste por el Tech de Virginia en dos

---

<sup>3</sup> Overlay se denomina a la sobrecapa que se coloca en un puente y que pasa formar parte de la loza del mismo.

ocasiones, junio de 1991 y Agosto de 1992. La evaluación incluyó inspección visual, estudio de laminación, estudio recubrimiento y profundidad, contenidos de cloruro como una función de la profundidad, potenciales de corrosión, y estimación de las densidades de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ).

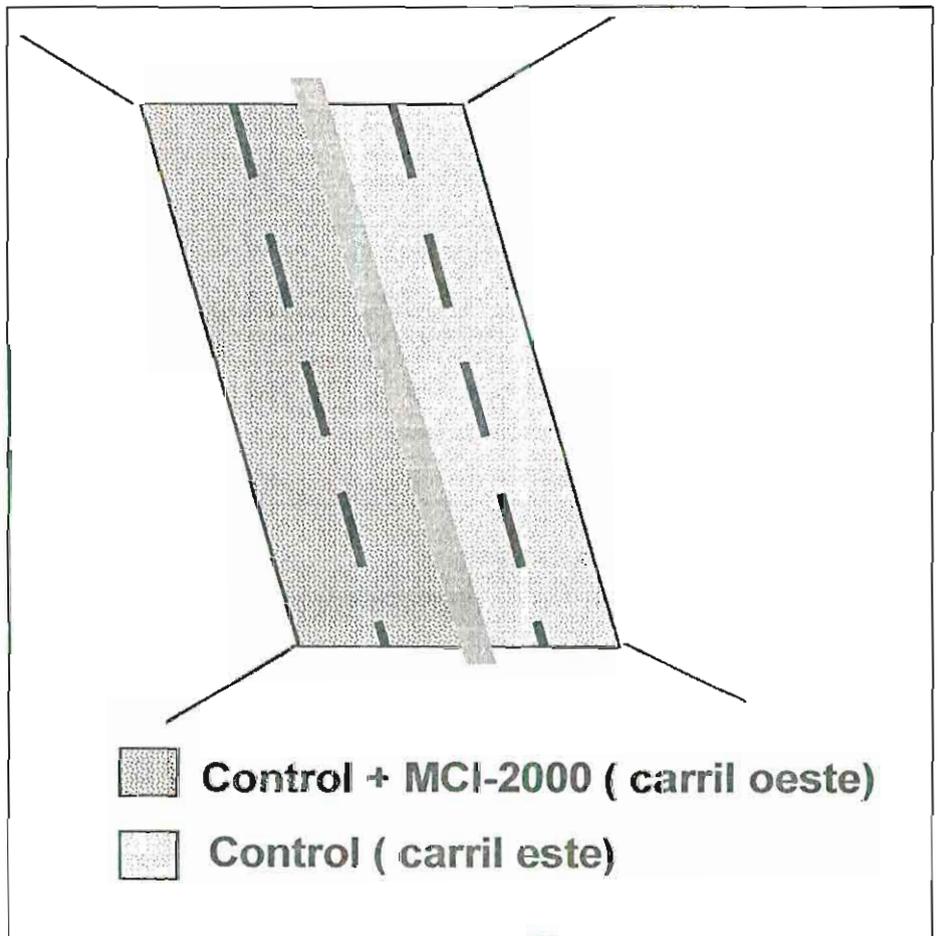


Figura 1.17

CALLE RANDOLPH / I-35E, SAINT PAUL, MN-USA

En la **tabla # 10** presenta el área total, área y porcentaje de delaminación<sup>4</sup> de cada tramo. El estudio indicó un gran porcentaje de delaminación en el lado sin tratar.

**TABLA # 10**  
**ÁREA DE DELAMINACIÓN POR TRAMOS DE LA CALLE**  
**RANDOLPH / I-35E, ST. PAUL, MN**

Tramo	Área total del tramo (ft <sup>2</sup> )	Estudio 1991		Estudios 1992		
		Área (ft <sup>2</sup> ) Delaminada	% de Área Delaminada	Área (ft <sup>2</sup> ) Delaminada	% de Área Delaminada	
Carril Dirección Este (LSDC)	2	767	3.8	0.5	7.2	0.9
	3	819	31.9	3.9	21.5	2.6
	4	897	2.7	0.3	2.7	0.3
Carril Dirección Oeste LSDC/MCI-2000	1	884	0	0.0	3.2	0.4
	2	819	5.9	0.7	7.7	0.9
	3	767	0	0.0	NA	NA

En Junio 1991 y Agosto 1992, para analizar el *contenido de cloruros* muestras de polvo de concreto fueron tomadas a diferentes profundidades ( ver **tabla # 11** ) en la cuneta, camino de las llantas, y en el centro del camino de las llantas para los lados este y oeste del puente.

<sup>4</sup> Delaminación se denomina así, al hormigón que se desprende por fracturarse debido a la corrosión del acero de refuerzo.

**TABLA # 11**  
**MEDIA DE LA CONTAMINACIÓN DE CLORUROS, LBS/YD<sup>3</sup>,**  
**CALLE RANDOLPH/I-35E, ST.PAUL,MN\***

Profundidad	Carril Este, LSDC Control				Carril Oeste LSDC / MCI-2000			
	1991		1992		1991		1992	
	Media	$\sigma_x$	Media	$\sigma_x$	Media	$\sigma_x$	Media	$\sigma_x$
0.5	10.7	2.4	13.7	3.4	6.0	2.2	9.6	1.8
1.0	4.7	2.3	5.4	2.9	1.1	1.3	3.3	1.5
1.5	2.2	1.8	3.0	1.8	0.0	0.1	1.2	1.3
2.0	2.7	0.9	4.0	2.0	0.0	0.0	1.0	1.1
2.5	2.3	1.4	3.0	2.0	0.4	0.6	1.3	0.9
3.0	1.4	1.6	1.9	1.8	1.0	0.9	2.5	1.0
3.5	0.3	0.4	NA	NA	0.9	0.8	NA	NA

\* 1 pulg = 25.4 mm, 1 lb/yd<sup>3</sup> = 0.59 kg/m<sup>3</sup>

Basado en los datos de 1991, el contenido de cloruros en el concreto al nivel de la barra excede el nivel crítico de contaminación de 1.2 lbs/yd<sup>3</sup> (0.7 kg/m<sup>3</sup>) en el lado del control. Sin embargo, el contenido de cloruro en lados tratados fue un 40% menos que el control, y menos que 1.2 lb/yd<sup>3</sup>.

**Potenciales de corrosión** fueron medidos para ambos carriles con un electrodo de Cobre-Sulfato de Cobre (CSE) en Junio de 1991 y Agosto de 1992 cinco y seis años respectivamente después de la construcción. La **tabla # 12**

presenta las medias, desviaciones standard, número de observaciones y porcentajes más negativos que -350 mV por cada tramo para cada estudio. Por lo general, el potencial medio para el lado de control es ligeramente mayor que el tratado, con la misma desviación standard aproximadamente.

**TABLA # 12**

**POTENCIALES DE LOS CARRILES ESTE Y OESTE DE LA  
CUBIERTA DEL PUENTE / CALLE RANDOLPH/I-35E, ST.PAUL**

Parámetro	Potencial - mV											
	Carril Este, LSDC Control						Carril Oeste, LSDC / MCI-2000					
	1991			1992			1991			1992		
Tramo	2	3	4	2	3	4	1	2	3	1	2	3
Media	196	235	195	217	248	228	195	170	173	194	173	NA
Desviac. Stand.	59	73	60	66	66	59	60	53	53	56	44	NA
% > -350 mV	4	9	5				3	1	3			NA
# Observaciones.	206	222	237	205	218	236	235	216	209	236	220	NA

Desde el inicio de la colocación del overlay en 1986 el departamento de transporte de Minnesota realizó mediciones de potenciales de corrosión en ambos carriles.

**TABLA # 13**  
**DATOS DEL REPORTE DEL MN-DOT @ 6 AÑOS**  
**( 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991 )**

	<b>Años de servicio</b>	<b>Media</b>	<b>Desviac. Standard</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>%&gt; 350mV</b>
Control MCI	22 (Pre-)	256 mV 292	93 115	120 mV 150	620 mV 650	13 24
Control MCI	0 (Post-)	100 mV 141	53 48	000 mV 30	270 mV 300	0 0
Control MCI	1	292 mV 302	59 52	157 mV 180	444 mV 479	15 18
Control MCI	2	299 mV 270	49 50	204 mV 161	466 mV 485	12 5
Control MCI	3	177 mV 130	64 56	37 mV 9	527 mV 344	2 0
Control MCI	4	276 mV 238	73 59	162 mV 133	574 mV 512	15 4
Control MCI	5	230 mV 180	54 48	154 mV 66	445 mV 347	9 3

Muchas de las lecturas mayores que 350 mV en el lado del control y mayores que 300 mV fueron encontradas con fracturas y cerca de los canales. Las medias de las lecturas declinaron después de la construcción pero fueron similares en los niveles pre-construcción después de 1 año.

Los datos para el año 3 deberían ser considerados como anormales; la temperatura fue fría , lo cual tiende a reducir la corrosión. Los test para el año 4 fue hecho después de una semana de clima templado y húmedo, las condiciones para las corrosión fueron muy buenas. La lecturas medias para la sección de control fueron cercanas en las años 1, 2 , 4 y 5. La lecturas medias para la sección de MCI , sin embargo, tuvieron una disminución al mismo tiempo de 302 mV a 270 mV, luego a 238 mV y finalmente 180 mV. La efectividad del inhibidor es mostrada por la lecturas bajas de la sección con MCI versus la sección de control.

- **“ Craked Beam Corrosion Tests”**

Esta prueba es una modificación de la Prueba ASTM G109 y la modificación básica es producir una fractura en la mitad de la viga en el lado de la varilla anódica con el objetivo de conocer el comportamientos de estos inhibidores en este tipo de situaciones , muy comunes en una estructura de hormigón armada en un ambiente marino. Esta evaluación fue dirigida por la Wiss, Janey, Elster Associates, Inc. ( WJE: ) , empezó en 1993 y terminó a fines de 1994.

Los especímenes de la prueba "Craked Beam" ( Ver **figura 1.18** ) consiste de vigas de 6 x 6 x 30 pulg. Con tres barras No.5 ( 5/8 pulg. de diámetro ) embebidas en el concreto. Dos de las barras son localizadas en el fondo de la viga y la otra es localizada  $1\frac{3}{4}$  pulgada bajo la superficie de la viga. Después de 28 días de curado bajo condiciones de húmedas, las vigas fueron fracturadas en el punto central de flexión a lo largo de la ranura cortada en la superficie de la viga. Durante la fractura, 10 mil ( 0.010 pulg. ) de espesor de cuñas de plástico son insertadas en las fracturas para mantener abierto la fractura realizada. Diques de acrílico son unidos a la superficie de la viga para permitir un estancamiento de una solución salina de 3% . El estancamiento es realizado cíclicamente, con dos semanas de estancamiento seguido de 2 semanas de secado de aire.

El MCI-2000 fue añadido al concreto durante la mezcla mientras que el MCI-2020 fue aplicado en la superficie de las vigas 36 días después retirar el molde de las vigas. El concreto colocado en los moldes tuvo una relación agua-cemento de 0.4 y un contenido de cemento de 600 lb/yd<sup>3</sup>.

Agregados libres de cloruros y cemento Tipo 1 fue usado. Cuatro cilindros de 4 x 8 pulgadas , cuatro vigas de 3 x 3 x 12, y cuatro especímenes de vigas "craked-beam" de 6 x 6 x 30 pulgadas fueron realizados para cada mezcla.

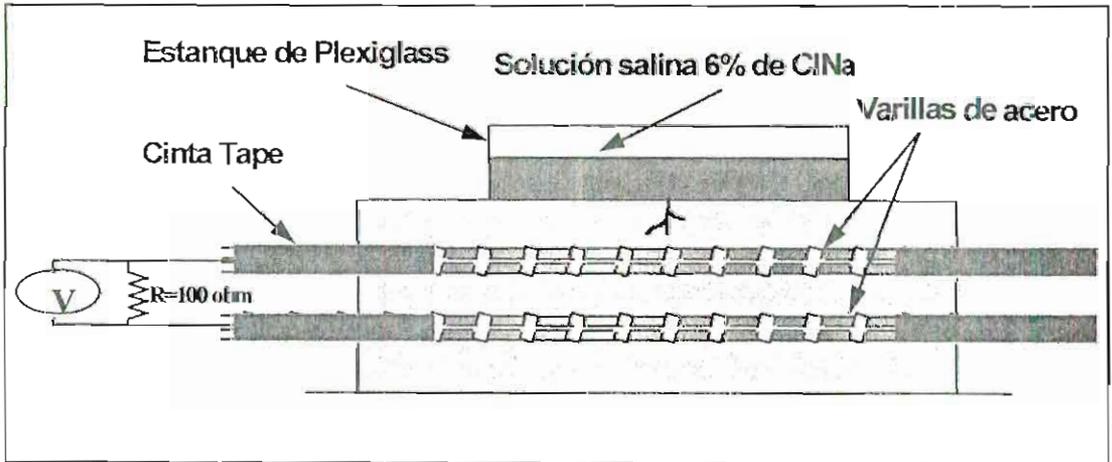


Figura 1.18

### VIGA DEL " CRACKED BEAM CORROSION TEST"

Los resultados de los esfuerzos de compresión y flexión se muestran en la **tabla # 14** los esfuerzos a los 28 días no se ven afectados por el aditivo inhibidor MCI-2000.

**TABLA # 14**  
**ESFUERZOS DE FLEXIÓN Y COMPRESIÓN**

Mezcla	Esfuerzos de compresión (psi)		Esfuerzos de Flexión (psi)	
	1 día	28 días	1 día	28 días
Control	2339	5012	474	903
MCI-2000	1890	5280	453	809
MCI-2020 (Control)	2454	5827	388	808

Ambos el MCI-2000 y el MCI-2020 significativamente disminuyeron el inicio de la corrosión , mientras el concreto sin protección empezó la corrosión inmediatamente en una exposición al agua salada. El MCI-2000 disminuyo el inicio de la corrosión 100 días mientras que el MCI-2020 disminuyo el inicio de la corrosión 200 días. Es también evidente una reducción brusca ( > 75% ) de los Valores de la Corriente Integral vs. El tiempo ( ver **figura 1.19** ).

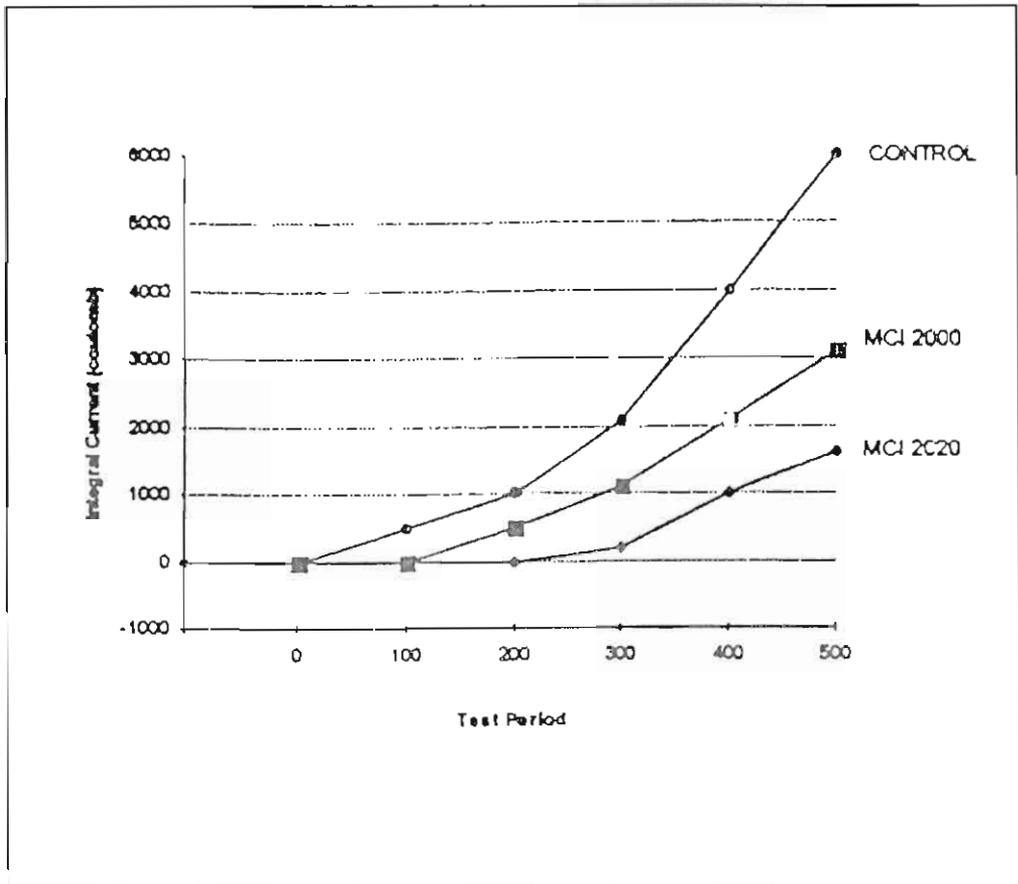


Figura 1.19

### GRÁFICA CORRIENTE TOTAL DE CORROSIÓN VS. TIEMPO

- **"Southern Climate Accelerated Test"**

Este Test fue desarrollado según reporte NCHRP No. 244 y adaptó en 1985 por FHHA ( Federal Highway Administration) y la WJE para evaluar diferentes sistemas para proteger contra la corrosión del hormigón armado.

En esta evaluación se utilizó el aditivo MCI-2000 y el procedimiento de la Prueba se basa en un ciclo repetitivo de estanque de agua salada conteniendo un 15% del ClNa (5 veces con mayor contenido de cloruros que el agua de mar) a temperatura ambiente sobre la varilla superior seguida de un periodo de secado de aire a 100°F ( ver **figura 1.20** ) Este ciclo ha probado ser un método efectivo y real para acelerar la difusión de los cloruros. Se ha estimado que 24 semanas de estos ciclos representa 10 a 20 años de un típico clima de Norte América en puentes por ataque de cloruros, este tiempo ha sido estimado basándose en mediciones de contenido de cloruros en estructuras actuales en servicio.

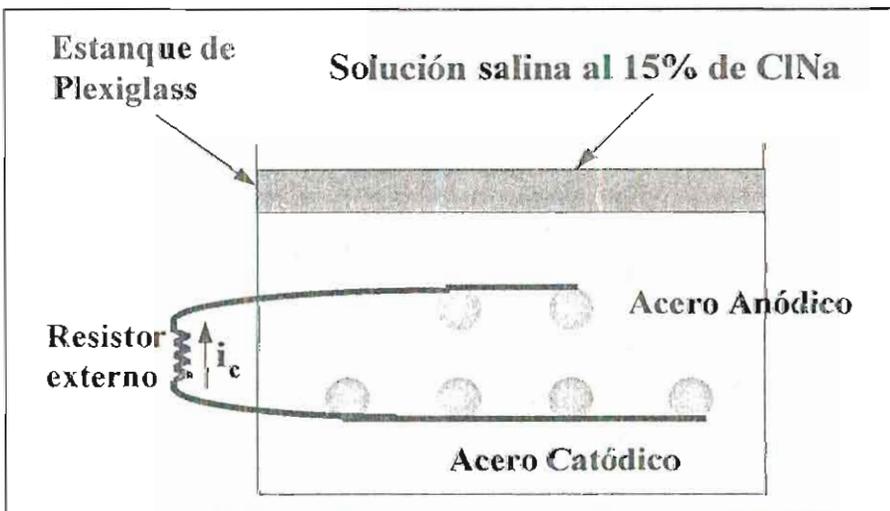


Figura 1.20

VIGA DEL "SOUTHERN CLIMATE ACCELERATED TEST"

Después de un año , el control aparece un 75% corroído. Las vigas tratadas con el MCI mostraron una sustancial reducción, la cantidad de superficie corroída fue de un 13% y la penetración de los cloruros fue significativamente menor que la viga de control, la reducción fue un 60 % aproximadamente comparado con la viga control o patrón. Se obtuvieron curvas con las corrientes de corrosión y potenciales instantáneos para un diseño resistente a la corrosión incluyendo el MCI-2000. En las **figuras 1.21 y 1.22** se muestran los resultados para dos muestras: A y B, se observan corrientes iniciales que luego van disminuyendo hasta tomar valores muy pequeños. (  $a/c= 0.5$ ,  $aire= 6.5\%$  ,  $MCI-2000= 0.7 \text{ lt/m}^3$  )

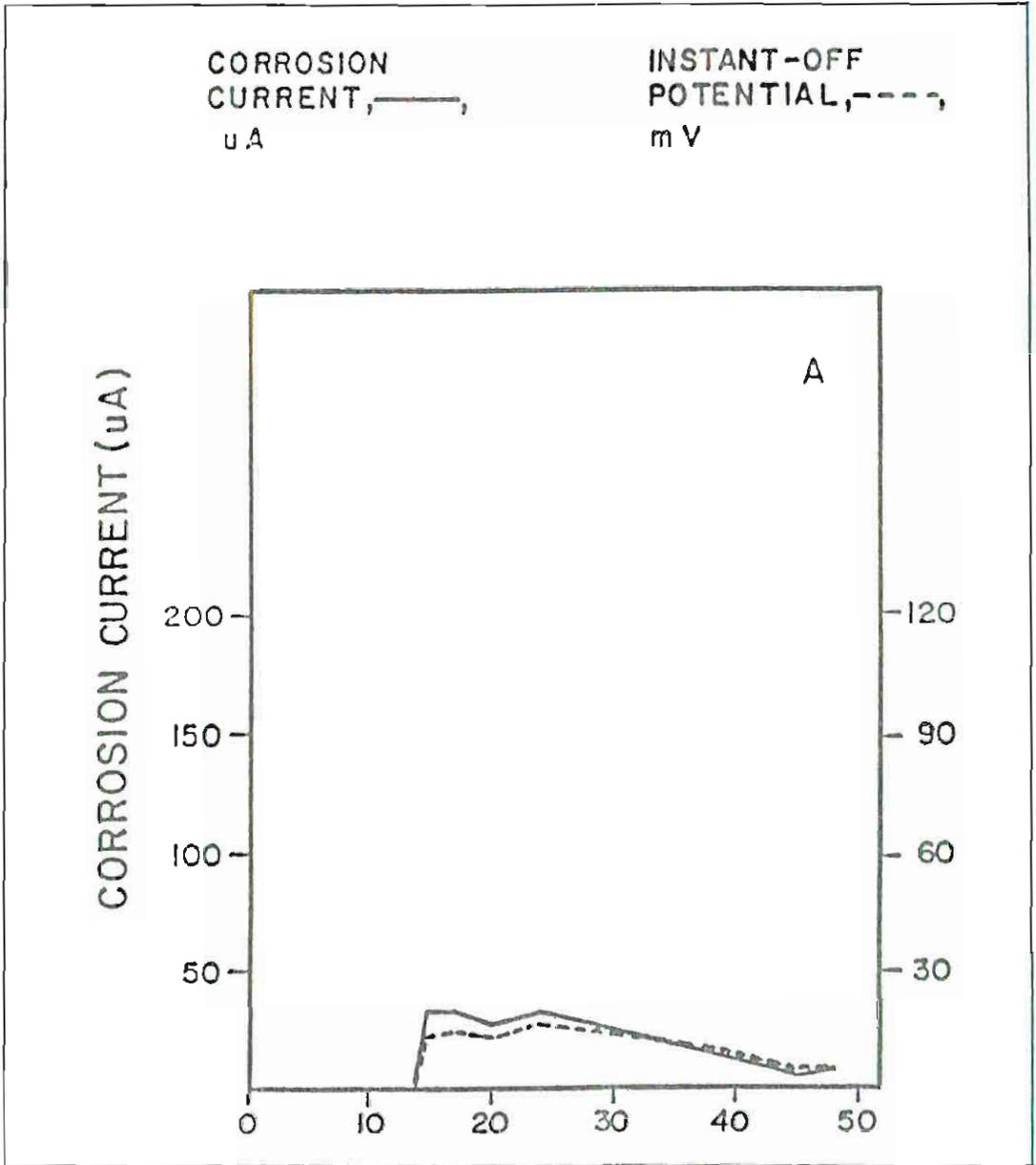


Figura 1.21

MEDICIONES DE CORRIENTES DE CORROSIÓN Y POTENCIALES  
INSTANTÁNEOS EN LA MUESTRA A

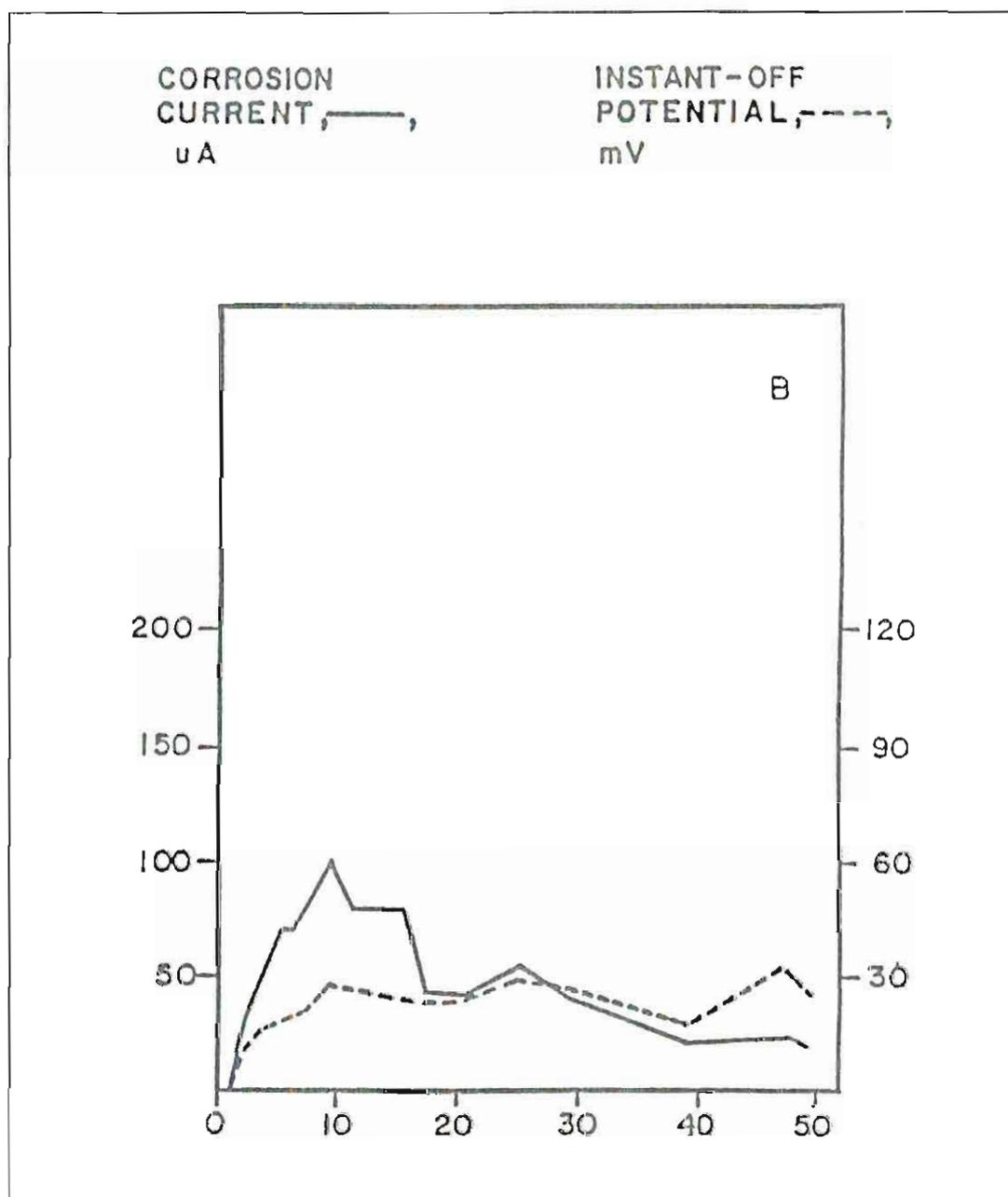


Figura 1.22

MEDICIONES DE CORRIENTES DE CORROSIÓN Y POTENCIALES  
INSTANTÁNEOS EN LA MUESTRA B

### **Inhibidores de corrosión SHRP S-666**

Bajo el Programa Desarrollo Estratégico de Carreteras SHRP-S-666 se concluyó un estudio en 1993 en que se utilizaron diversas técnicas físicas y químicas para rehabilitar y proteger puentes de hormigón armado del ataque de los cloruros inducidos por la acción de las sales deshielantes.

El principal objetivo de este proyecto fue mejorar las técnicas no-electroquímicas existentes y desarrollar nuevos métodos electroquímicas para rehabilitar componentes de puente contaminados por cloruros.

Para desarrollar nuevas técnicas se evaluaron la efectividad de inhibidores considerados como promisorios para detener la corrosión por ataque de cloruros. El proyecto con los inhibidores se basó en:

- Evaluar la efectividad de los inhibidores de corrosión
- Desarrollar técnicas de campo
- Estimar el servicio de vida de éstas técnicas desarrolladas

- Evaluar la efectividad de los inhibidores de corrosión

Dentro de los cinco inhibidores de corrosión seleccionados en este estudio constan el MCI-2000 ( Inhibidor A en esta tesis ) y el MCI-2020 ( Inhibidor B en esta tesis ). Para la evaluación se construyeron vigas con dos y tres triadas similares a las del "Southern Climate Accelerated Test" ( ver **figuras 1.23 y 1.24** ) . fueron sometidas a ciclos húmedos (solución con 6% de cloruro de sodio) y secos para inducir corrosión. Mediciones de corrosión fueron inicialmente usadas para monitorear la iniciación de la actividad de corrosión. Una vez iniciada la corrosión se utilizo un dispositivo de polarización lineal, el 3LP, fue usado para monitorear la densidad de corriente. La medición de la densidad de corrientes es proporcional al rango de corrosión a través de la Ley de Faraday. Además mediciones de cloruros fueron tomadas al nivel de la varilla antes del tratamiento. Las vigas tratadas con los inhibidores seleccionados en este estudio fueron sometidas a diversos tratamientos (secados y estancamientos), divididos en grupos y en categorías basadas en correlaciones de daño por corrosión incluyendo

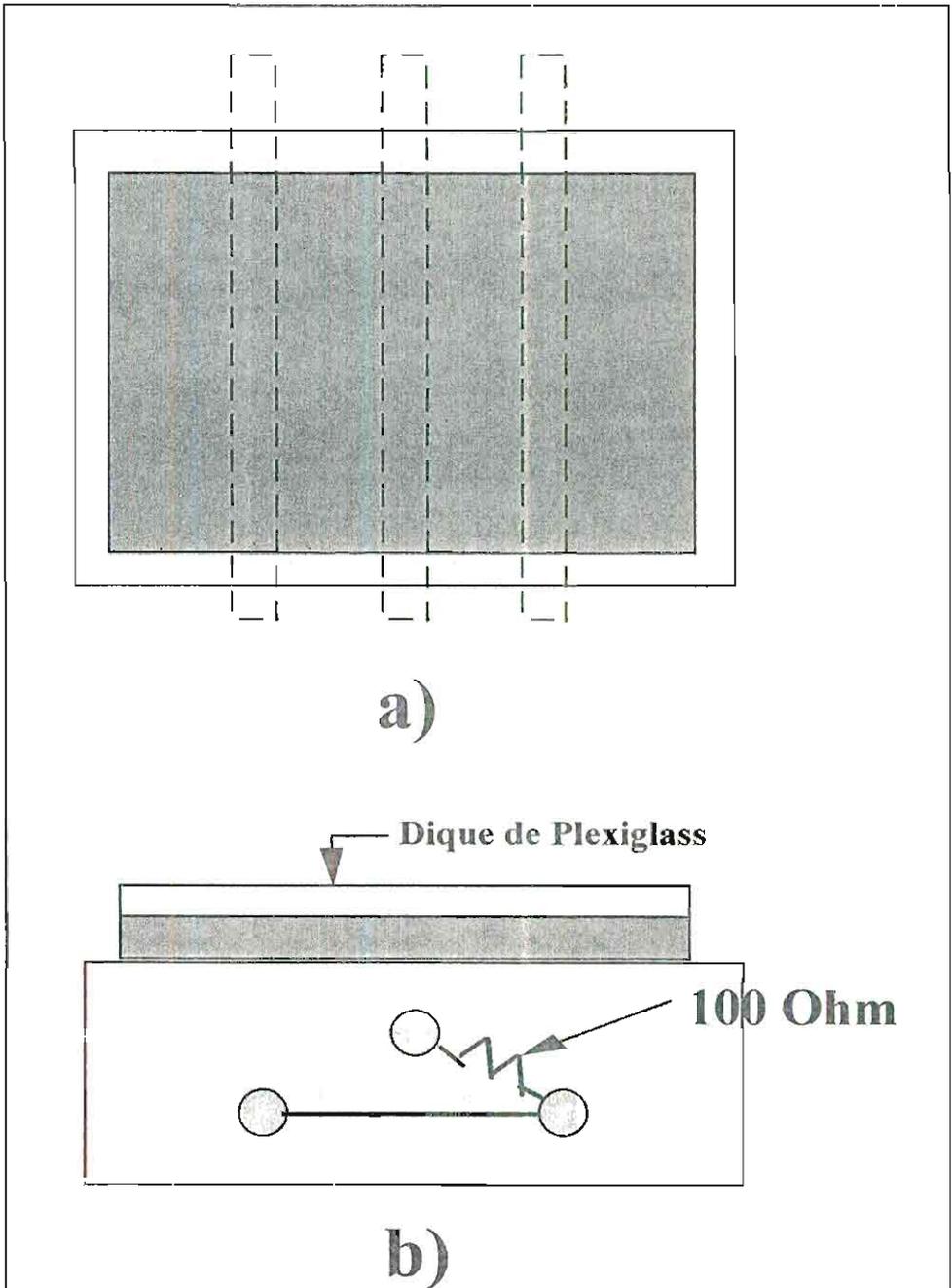


Figura 1.23

ESPECÍMENES CON UNA TRIADA. A) VISTA DE PLANTA  
Y B) VISTA LATERAL

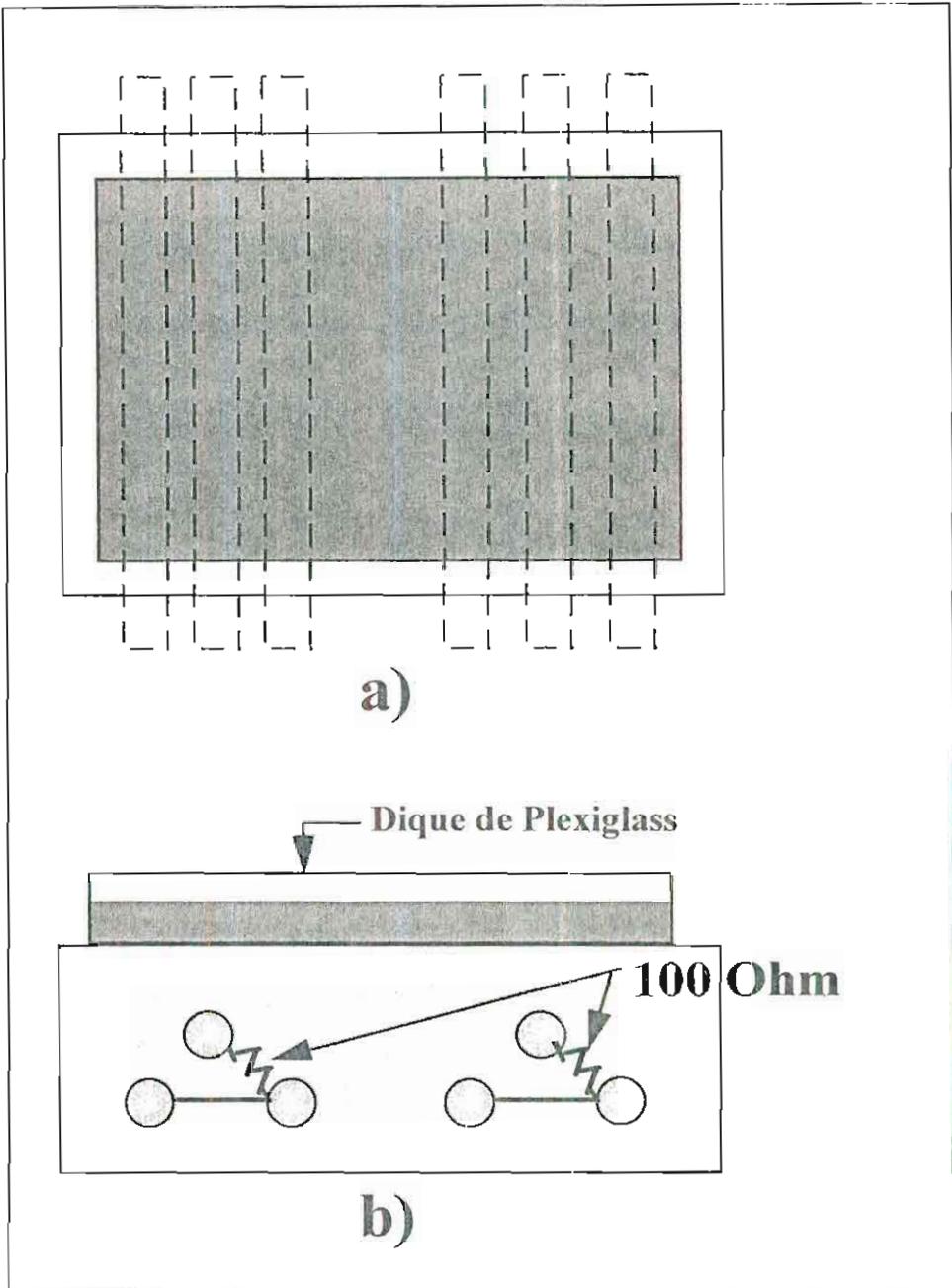


Figura 1.24

ESPECÍMENES CON DOS TRIADAS. A) VISTA DE PLANTA  
Y B) VISTA LATERAL

diferentes matrices para obtener estados de iniciación de la densidad de corriente y poder mediante cálculos la predecir el servicio de vida de cada inhibidor. Investigaciones adicionales realizadas por Clear correlacionan las mediciones de la  $i_{\text{corr}}$  con el tiempo previsto de daño en el hormigón ( ver **tabla # 15** )

**TABLA # 15**  
**CORRELACIÓN DE LA  $i_{\text{corr}}$  CON EL TIEMPO ESPERADO PARA DAÑOS EN EL HORMIGÓN**

$i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Tiempo esperado para el diseño
$i_{\text{corr}} < 0.22$	No se espera daño
$0.22 < i_{\text{corr}} < 1.1$	Daño posible en 10 a 15 años
$1.1 < i_{\text{corr}} < 11$	Daño posible en 2 a 10 años
$i_{\text{corr}} > 11$	Daño en menos de 2 años

Las propiedades medias de los concretos fresco y endurecido conteniendo el MCI-2000 comparado con un hormigón incluyendo látex son presentados en la **tabla # 16**. La mezcla con el MCI-2000 tiende a reducir la cantidad del aire incluido e incrementar ligeramente la resistencia a la compresión.

**TABLA # 16**  
**PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO Y**  
**ENDURECIDO**

Mezcla	Asentamiento, mm	Contenido de Aire, %	Esfuerzo de compresión a los 28 días, MPa
MCI-2000	33	5.4	34
Látex	165	10.0	33

- Desarrollo de especificaciones para aplicaciones de campo

Grandes especímenes fueron tratados con el objetivo de especificar aplicaciones de campo.

Estos especímenes tienen un área superficial 1.25-2.11 m<sup>2</sup> fueron obtenidos de un proyecto de reemplazo de un overlay en la interestatal 80 de Pennsylvania, Estados Unidos y fueron monitoreados antes y después de tratarlos con los inhibidores. Para monitorear las corrientes de corrosión se utilizó el equipo 3LP y el Corrosímetro GECOR.

El MCI-2020 fue aplicado en la superficie con un rociador como el usado para fumigación, en iguales aplicaciones en intervalo de ½ hora y 12 horas entre la primera, segunda y tercera aplicación.

Luego de realizar mediciones de la  $i_{corr}$  el MCI-2020 mostró ser muy efectivo reduciendo un 77% la  $i_{corr}$  en comparación con el espécimen sin inhibidor.

- Predicciones del servicio de vida

El servicio de vida de un overlay es de 20 años, al mismo tiempo un 40% del overlay ha sido retirado por delaminación debido a la corrosión del acero de refuerzo.

Los especímenes tratados con los MCI aumentan la predicción del servicio de vida de un overlay hasta 34 años en comparación con un hormigón modificado con polímeros.

## 1.7 EXPERIENCIAS EN PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS

La **Corriente de corrosión** es un indicador directo de la cantidad de corrosión, es una medida cuantitativa del material que se transforma en óxido.

En España y Suecia bajo el proyecto EUREKA EU-401 se desarrolló un equipo con el objeto de determinar velocidades de corrosión en estructuras de hormigón, denominado GECOR, con este equipo se han llevado a cabo mediciones de las  $I_{\text{corr}}$  en algunas estructuras incluyendo puentes en Europa y Estados Unidos. Inclusive el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (Strategic Highway Research Program- SHRP) de los Estados Unidos en un informe indica que el equipo desarrollado y patentado en este proyecto fue el que proporcionó valores de velocidad de corrosión más cercanos a los reales.

El uso de esta técnica en laboratorio y en campo ha permitido establecer rangos de valores y determinar el nivel real de corrosión de una estructura de hormigón armado como se muestra en la **tabla**

**# 17**



TABLA # 17

RANGOS DE VALORES DE LA  $i_{corr}$ 


---

$i_{corr} < 0.1 \mu A/cm^2$	: Condiciones pasivas
$0.1 \mu A/cm^2 < i_{corr} < 0.5 \mu A/cm^2$	: Corrosión baja a moderada
$0.5 \mu A/cm^2 < i_{corr} < 1.0 \mu A/cm^2$	: Corrosión moderada a alta
$i_{corr} > 1.0 \mu A/cm^2$	: Corrosión alta

---

Suponiendo corrosión uniforme en las varillas "anódicas y constante en el tiempo, es posible deducir el valor medio de la velocidad con la que disminuye el radio de la armadura en la zona afectada ( $1.0 \mu A/cm^2$  equivale a una disminución de  $11.6 \mu m/$  año de radio ) y consecuentemente evaluar la variación de sección de la armadura.

Luego de muchas mediciones de la  $I_{corr}$  realizadas en laboratorio e in-situ, se ha podido establecer unos rangos que no son los normales en el hormigón como se indica en la **TABLA # 18**. Dentro de los valores en la denominada zona de " corrosión " la experiencia indica que valores entre  $1-2 \mu m/año$  y  $20 \mu m/año$  son valores moderados de la velocidad de corrosión y valores mayores a  $20 \mu m/año$  o  $2 \mu A/cm^2$  la velocidad de corrosión es alta.

Esta graduación se la ha comparado con el tiempo en que demoran en aparecer fisuras en el recubrimiento. De este modo, valores de  $20 \mu\text{m/año}$  pueden fisurar recubrimientos entre 2 y 3 cm, y el tiempo en aparecer estas fisuras sería 1 a 5 años o 10 a 50 años si la  $I_{\text{corr}}$  es de  $2\mu\text{m/año}$ .

**TABLA # 18**  
**RANGOS DE CORROSIÓN PARA ESTIMAR**  
**LA VIDA DE UNA ESTRUCTURA**

Corriente de corrosión ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Velocidad de corrosión ( $\mu\text{m}/\text{año}$ )	Estado de corrosión del acero	Estados del hormigón	Posible daño (recubrimiento 2 a 3 cm.)
< 0.1	< 1.16	No hay corrosión	Hormigón seco o no carbonatado o sin cloruros	Ninguno
0.1 a 0.5	1.16 a 5.8	Corrosión baja a moderada	Hormigón ligeramente saturado o ligeramente húmedo, carbonatado o con cloruros	10 a 50 años
0.5 a 1.0	5.8 a 11.6	Corrosión moderada a alta	Hormigón con alto contenido en humedad, carbonatado o con cloruros	1 a 5 años
> 1.0	11.6	Corrosión alta	Hormigón muy contaminado con cloruros	Meses
10	116			
100	1160	Máxima intensidad de corrosión		

La **Potencial de corrosión** es un indicador del “deseo” electroquímico de corroerse la varilla “anódica”, esta medida es solo indica la probabilidad de corroerse una estructura y su interpretación es basado en datos de puentes contaminados con cloruros en Estados Unidos.

Es importante mencionar que el valor de potenciales de corrosión resulta válida para una estructura determinada, cuando se modifica un solo factor de corrosión permaneciendo los otros invariables. Pero la correlación entre ambas variables resulta afectada por dispersiones crecientes, cuando va aumentado el número de factores de corrosión o protección al acero de refuerzo.

Por ejemplo en la **figura 1.25** en pruebas de laboratorios comparando morteros carbonatados y sin carbonatar, con y sin cloruros, con y sin inhibidores y para condiciones de humectación diferentes, pueden cometerse errores de apreciación considerables, hasta un 2600% como se indica en los extremos de la línea AB.

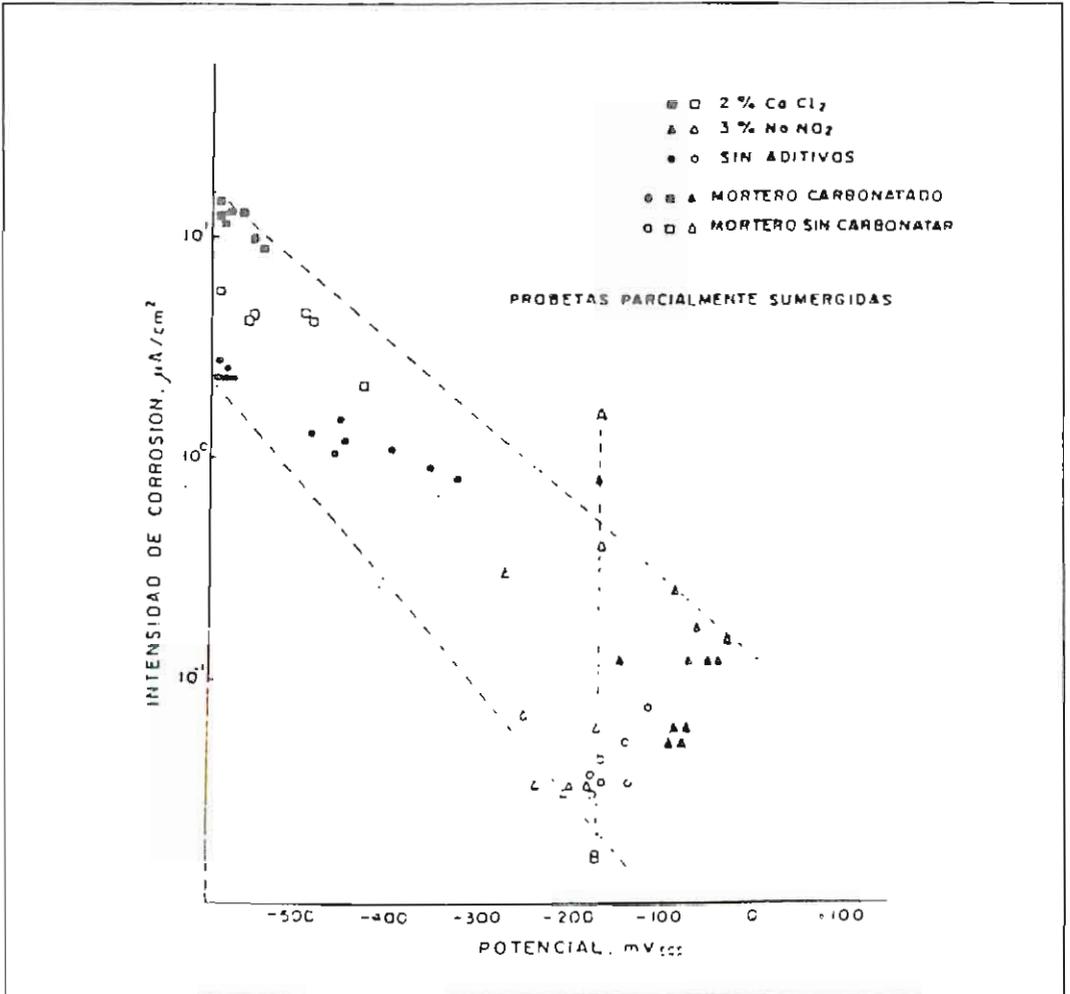


Figura 1.25

LA  $E_{CORR}$  ES AFECTADA AL MODIFICAR SIMULTÁNEAMENTE  
 VARIOS FACTORES DE CORROSIÓN

En pruebas in-situ en la **figura 1.26** se muestran los valores de la intensidad de corrosión  $i_{CORR}$  y potencial de corrosión  $E_{CORR}$  obtenidos en gran número de puntos pertenecientes a diversas estructuras y

con distintas condiciones agresivas. Se puede apreciar que no se puede establecer ninguna correlación aceptable entre ambos parámetros, ya que a un mismo valor de potencial le corresponden diferentes intensidades de corrosión.

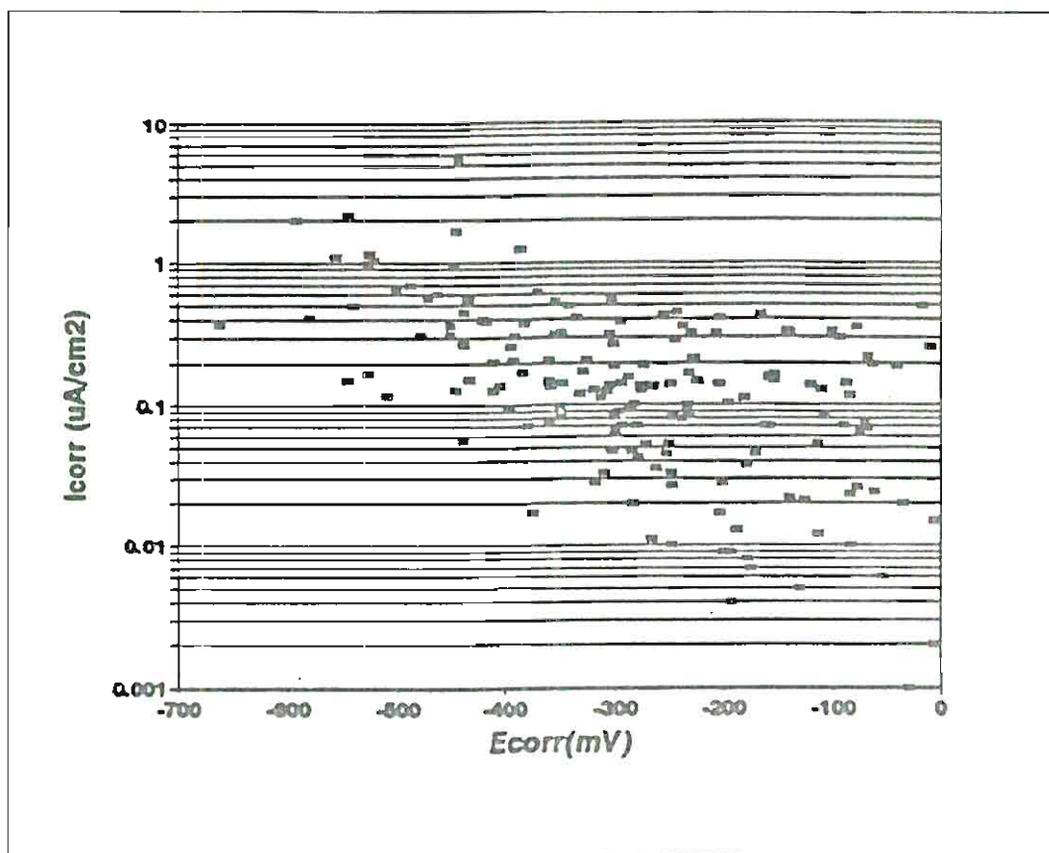


Figura 1.26

RELACIONES  $I_{CORR}$  Y  $E_{CORR}$  OBTENIDOS EN ESTRUCTURAS  
EN DIFERENTES MEDIOS

A pesar de lo indicado anteriormente se tomarán lecturas de potenciales en todas las vigas para confirmar estas distorsiones, en esta tesis los diseños incluyen inclusores de aire e inhibidores de corrosión esto implica que existirán diferentes concentraciones de cloruros, diferentes concentración de inhibidores de acuerdo al diseño, diferentes grados de humectación del hormigón que como se indicó variarán los resultados de los potenciales de corrosión. Las mediciones de potenciales de corrosión se basaran en la norma ASTM 876-91 ( ver **figura 1.27** )

En la **tabla # 19** se determina valores de probabilidades de corrosión del acero de refuerzo.

**TABLA # 19**

**RANGOS DE PROBABILIDADES DE CORROSION**

<b>MEDICIONES</b>	<b>PROBABILIDAD DE CORROSIÓN</b>
$E_{\text{con}} > -200 \text{ mV}$	90% ninguna actividad
$-200 \text{ mV} < E_{\text{corr}} < -350 \text{ mV}$	actividad incierta
$E_{\text{corr}} > -350 \text{ mV}$	90% actividad de corrosión

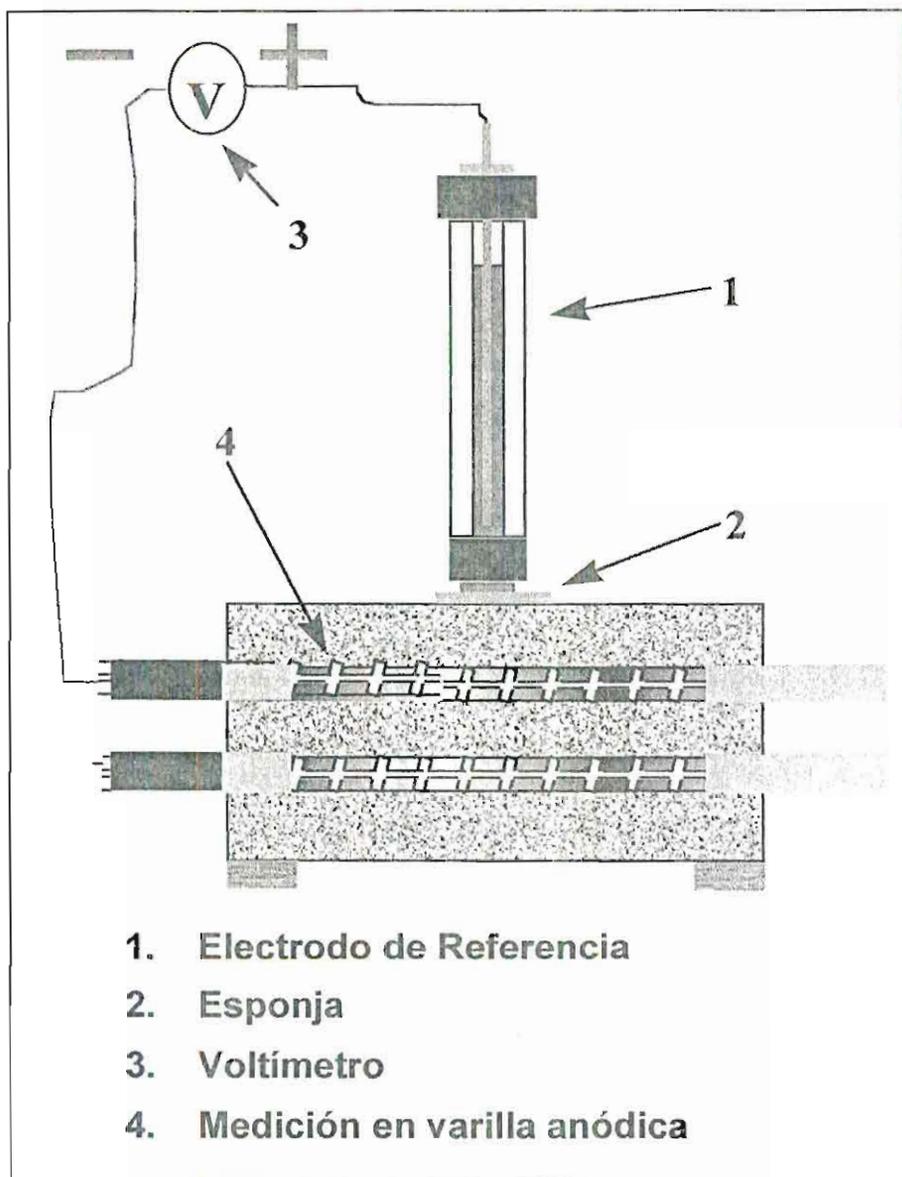


Figura 1.27

FORMAS DE TOMAR LAS LECTURAS DE  
POTENCIALES DE CORROSIÓN

## CAPITULO II

### DISEÑO EXPERIMENTAL

#### 2.1 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Las pruebas ha realizarse, constituyen los indicativos suficientes recomendados en la actualidad por la mayoría de investigadores, en la cual una viga de Hormigón Armado como se muestra en la **figura 2.1** y en la **figura 2.2** es sometida a un ambiente agresivo con cloruros tal como se realiza en la Prueba de la ASTM G-109: "Determinar los efectos de aditivos químicos en la corrosión del acero de refuerzo embebido en el hormigón expuesto en ambientes de Cloruros " , esta prueba tiene como objetivo básico describir un procedimiento para determinar los efectos de aditivos químicos en la corrosión de metales embebidos en el hormigón sometidos a un ambiente de cloruros.

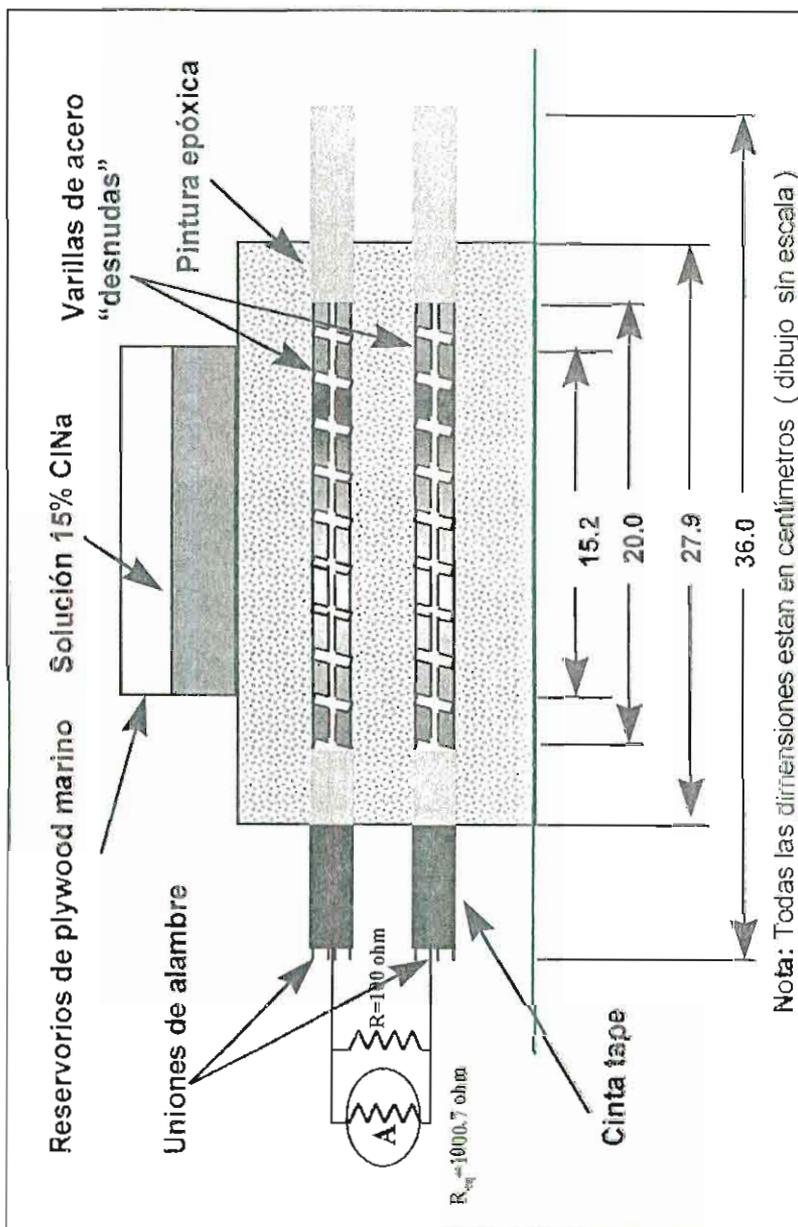


Figura 2.1

VIGA SEGUN LA NORMA ASTM G-109-92

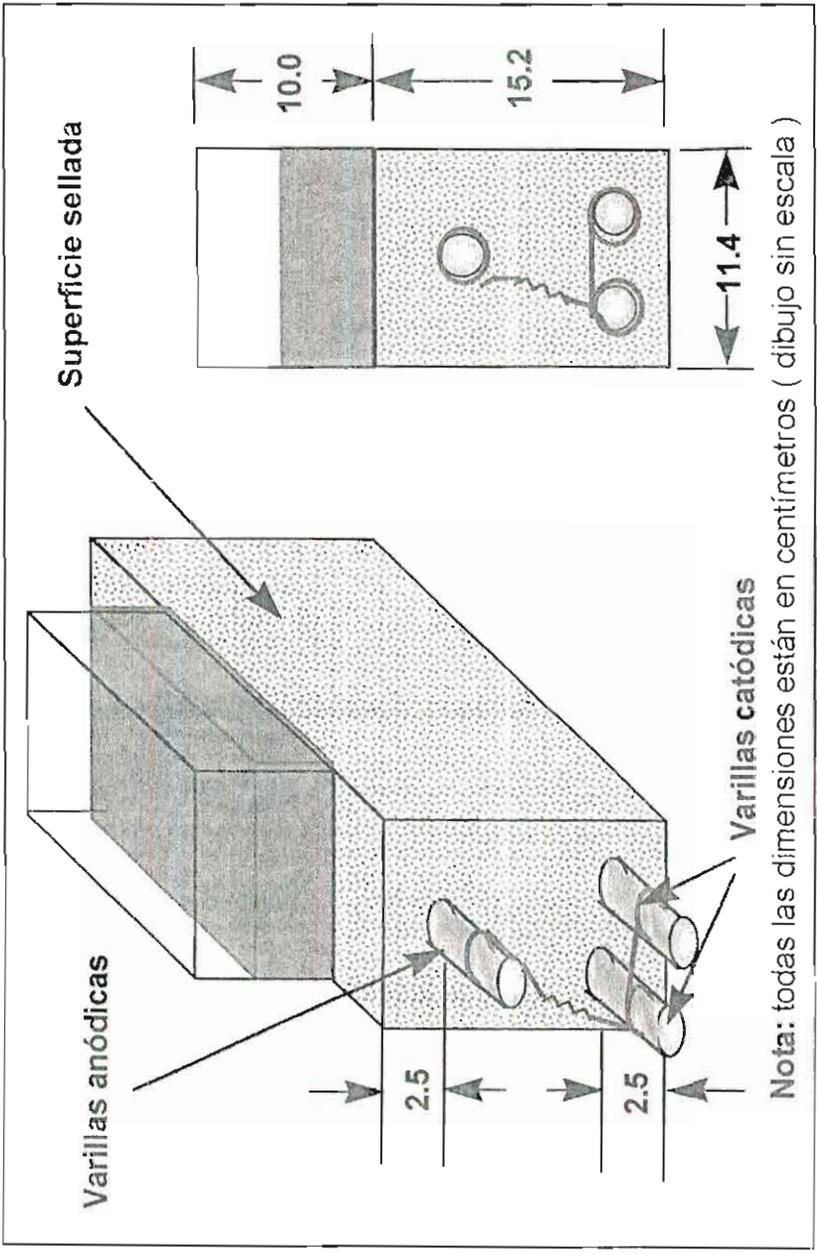


Figura 2.2

VISTA LATERAL DE LA VIGA CON SUS DIMENSIONES

Antes de empezar cualquier prueba se realizó un cronograma de actividades ( ver **figuras 2.3 y 2.4** ) y se determinaron las pruebas a realizar ; para determinar los efectos posibles de los inhibidores en las propiedades físicas y químicas en el hormigón y pruebas electroquímica para determinar la corrosión en las varillas.

Para establecer parámetros de comparación y relacionar rendimientos de diseños de hormigones resistentes a la corrosión se establecieron 5 parámetros de comparación ( ver **tabla # 20** )

**TABLA # 20**

**PARÁMETROS DE COMPARACIÓN ENTRE MEZCLAS**

- |            |   |
|------------|---|
| <b>I</b>   | Mezcla Control o patrón                       |
| <b>II</b>  | Control + Inhibidor A                         |
| <b>III</b> | Control + Inhibidor B                         |
| <b>IV</b>  | Control + Inclusor de Aire (8%)               |
| <b>V</b>   | Control + inhibidor A + Inclusor de aire (5%) |

Estos parámetros de comparación o tipos de mezcla se establecieron para 3 diseños de hormigones : dos diseños de hormigón comúnmente usados en la industria de la construcción como los hormigones con una  $f'c= 210$  y  $280 \text{ kg/cm}^2$  y un tercer diseño de un Hormigón a  $350 \text{ kg/m}^2$  , con el objetivo de obtener tres diferentes permeabilidades.

Además se realizaron 3 batches o series idénticas para cada parámetro y por cada diseño, en cada batch se efectuaron pruebas de asentamiento, contenido de aire , y se fundieron 4 cilindros para realizar las pruebas de resistencia y 3 vigas para someterlas al ambiente de cloruros ( ver **tabla # 21** )

TABLA # 21

## ESQUEMA DE PRUEBAS REALIZADAS EN UN BATCH

	TIPO DE PRUEBA
Propiedades Físicas	• Asentamiento
	• Contenido de aire
	• Resistencia Mecánica

## MÉTODOS UTILIZADOS PARA DETERMINA EL NIVEL DE CORROSION

Propiedades Electroquímicas	• Corrientes de corrosión
	• Potenciales de corrosión

PRUEBAS VARIAS<sup>5</sup>

Propiedades Físicas	• Porosidad
Propiedades Químicas	• Contenido de cloruros

<sup>5</sup> Estas pruebas se ejecutarán en caso de que el resultado de las propiedades electroquímicas no este muy claro.

MES	DIC			ENERO			ENE/FEB		FEBRERO		
	12 al 16	18 al 23	26 al 30	1 al 6	8 al 13	15 al 20	22 al 27	29 al 3	5 al 10	12 al 17	19 al 24
ACTIVIDADES DE TRABAJO SEMANAS											
1. PREPARACIÓN DE MATERIALES, EQUIPOS											
2. PRUEBAS DE ASENTAMIENTO, CONTENIDO DE AIRE Y FUNDICIÓN DE VIGAS Y CILINDROS											
3. ENSAYOS DE COMPRESIÓN (28 DÍAS) DE TODOS CILINDROS.											
4. PREPARACIÓN DE VIGAS: ESTANQUE, CAJAS DE MADERA, ETC.											
5. PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS DE LAS VIGAS TESTIGOS											
6. DESARROLLO TEÓRICO											
6.1 CAPÍTULO 1											
6.2 CAPÍTULO 2											
PRUEBAS VARIAS ( CAPÍTULO 2 )++											
6.3 CAPÍTULO 3											
ROTURA Y FOTOGRAFIADO DE LAS VIGAS											
9. INDICES, BIBLIOGRAFÍA , CONCLUSIONES Y RECOMENDAC.											
10. ENTREGA FINAL											

Figura 2.3

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DESDE DICIEMBRE/95 HASTA FINALES DE FEBRERO DE 1996

MES	FEBR. MARZO		MARZO				ABRIL				MAYO JUNIO		SEPT	OCT.
	26 al 2	9	4 al 9	11 al 16	18 al 23	25 al 30	1 al 6	8 al 13	15 al 20	22 al 27	29 al 4	Julio		
ACTIVIDADES DE TRABAJO \ SEMANAS														
1. PREPARACIÓN DE MATERIALES, EQUIPOS														
2. PRUEBAS DE ASENTAMIENTO, CONTENIDO DE AIRE Y FUNDICIÓN DE VIGAS Y CILINDROS														
3. ENSAYOS DE COMPRESIÓN ( 28 DÍAS ) DE TODOS CILINDROS.														
4. PREPARACIÓN DE VIGAS: ESTANQUE, CAJAS DE MADERA, ETC...														
5. PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS DE LAS VIGAS TESTIGOS														
6. DESARROLLO TEÓRICO														
6.1 CAPITULO 1														
6.2 CAPITULO 2														
PRUEBAS VARIAS ( CAPITULO 2 )++														
6.3 CAPITULO 3														
ROTURA Y FOTOGRAFIADO DE LAS VIGAS														
9. INDICES, BIBLIOGRAFÍA , CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES														
10. ENTREGA FINAL														

Figura 2.4

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES DESDE FINALES DE FEBRERO/96 HASTA FINALES DE OCTUBRE DE 1996

## 2.2 MEZCLAS DE DISEÑO

Como se indico anteriormente tres mezclas de diseños y cinco parámetros de comparación fueron seleccionadas como se muestra en la **tabla # 22** para el hormigón  $f'=210 \text{ kg/cm}^2$  , **tabla # 23** para el hormigón  $f'=280 \text{ kg/cm}^2$  y en la **tabla # 24** para el hormigón  $f'=350 \text{ kg/cm}^2$  Para evitar confusiones entre las baches en cada cilindro y viga bajo un especial código se marcaron los diseños, fechas del batch, parámetro de comparación como se indica en la **figura 2.5** y se detalla a continuación:

**ε - 12**

**I**

**ENE / 5**

②

- ε - 12** ⇒ Un cilindro o viga con un  $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$  y un asentamiento de 12 cm
- I** ⇒ Cilindro o viga de control (sin adiciones)
- ENE / 5** ⇒ El batch fue preparado el 5 de Enero
- ② ⇒ Este fue el segundo de tres batches de control

TABLA # 22

DISEÑO No.1  $f_c'=210 \text{ kg/cm}^2$ 

Parámetro		$\Omega - I$	$\Omega - II$	$\Omega - III$	$\Omega - IV$	$\Omega - V$	
Cemento Portland Tipo I ( $\text{kg/m}^3$ )		345	345	345	345	345	
Agregado Grueso ( $\text{kg/m}^3$ )		1030	1030	1030	1030	1030	
Agregado Fino ( $\text{kg/m}^3$ )		730	730	730	730	730	
Inhibidor A ( $\text{lt./m}^3$ )		----	0.7	----	----	0.7	
Inhibidor B ( $\text{lt/ m}^2$ )		----	----	0.25	----	-----	
Aditivo Plastificante ( $\text{lt/m}^3$ )		1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	
		Batch No.					
		1	210	207	225	197	204
Agua ( $\text{lt/m}^3$ )		2	202	207	204	197	197
		3	204	207	211	193	197
		4	202	225	-----	-----	-----
		Batch No.					
		1	0.59	0.60	0.65	0.57	0.59
Relación a/c		2	0.59	0.60	0.59	0.57	0.57
		3	0.59	0.60	0.61	0.56	0.57
		4	0.59	0.65	-----	-----	-----
Inclisor de aire ( $\text{ml./m}^3$ )		----	----	-----	414	414	

**TABLA # 23**  
**DISEÑO No.2  $f'_c=280 \text{ kg/cm}^2$**

Parámetro		$\epsilon - I$	$\epsilon - II$	$\epsilon - III$	$\epsilon - IV$	$\epsilon - V$	
Cemento Portland Tipo I	( $\text{kg/m}^3$ )	390	390	390	390	390	
Agregado Grueso	( $\text{kg/m}^3$ )	1030	1030	1030	1030	1030	
Agregado Fino	( $\text{kg/m}^3$ )	673	673	673	673	673	
Inhibidor A	( $\text{lt./m}^3$ )	----	0.7	-----	----	0.7	
Inhibidor B	( $\text{lt/ m}^2$ )	----	----	0.25	----	-----	
Aditivo Plastificante	( $\text{lt/m}^3$ )	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	
	Batch No.						
	1	207	198	202	194	189	
Agua	( $\text{lt/m}^3$ )	2	202	198	198	194	185
	3	207	198	194	194	185	
	Batch No.						
	1	0.51	0.53	0.50	0.50	0.48	
Relación a/c	2	0.50	0.51	0.51	0.50	0.49	
	3	0.50	0.51	0.51	0.49	0.50	
	4						
Inclisor de aire	( $\text{ml./m}^3$ )	----	----	-----	414	414	

**TABLA # 24**  
**DISEÑO No.3  $f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$**

Parámetro		$\alpha - I$	$\alpha - II$	$\alpha - III$	$\alpha - IV$	$\alpha - V$
Cemento Portland Tipo I	( $\text{kg/m}^3$ )	440	440	440	440	440
Agregado Grueso	( $\text{kg/m}^3$ )	1030	1030	1030	1030	1030
Agregado Fino	( $\text{kg/m}^3$ )	615	615	615	615	615
Inhibidor A	( $\text{lt./m}^3$ )	----	0.7	-----	----	0.7
Inhibidor B	( $\text{lt/ m}^2$ )	----	----	0.25	----	-----
Aditivo Plastificante	( $\text{lt/m}^3$ )	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
		<b>Batch No.</b>				
		1	198	202	194	189
Agua	( $\text{lt/m}^3$ )	2	198	198	194	185
		3	198	194	194	185
		<b>Batch No.</b>				
		1	0.45	0.46	0.44	0.43
Relación	a/c	2	0.45	0.45	0.44	0.42
		3	0.45	0.44	0.44	0.42
Inclisor de aire	( $\text{ml./m}^3$ )	----	----	-----	414	414

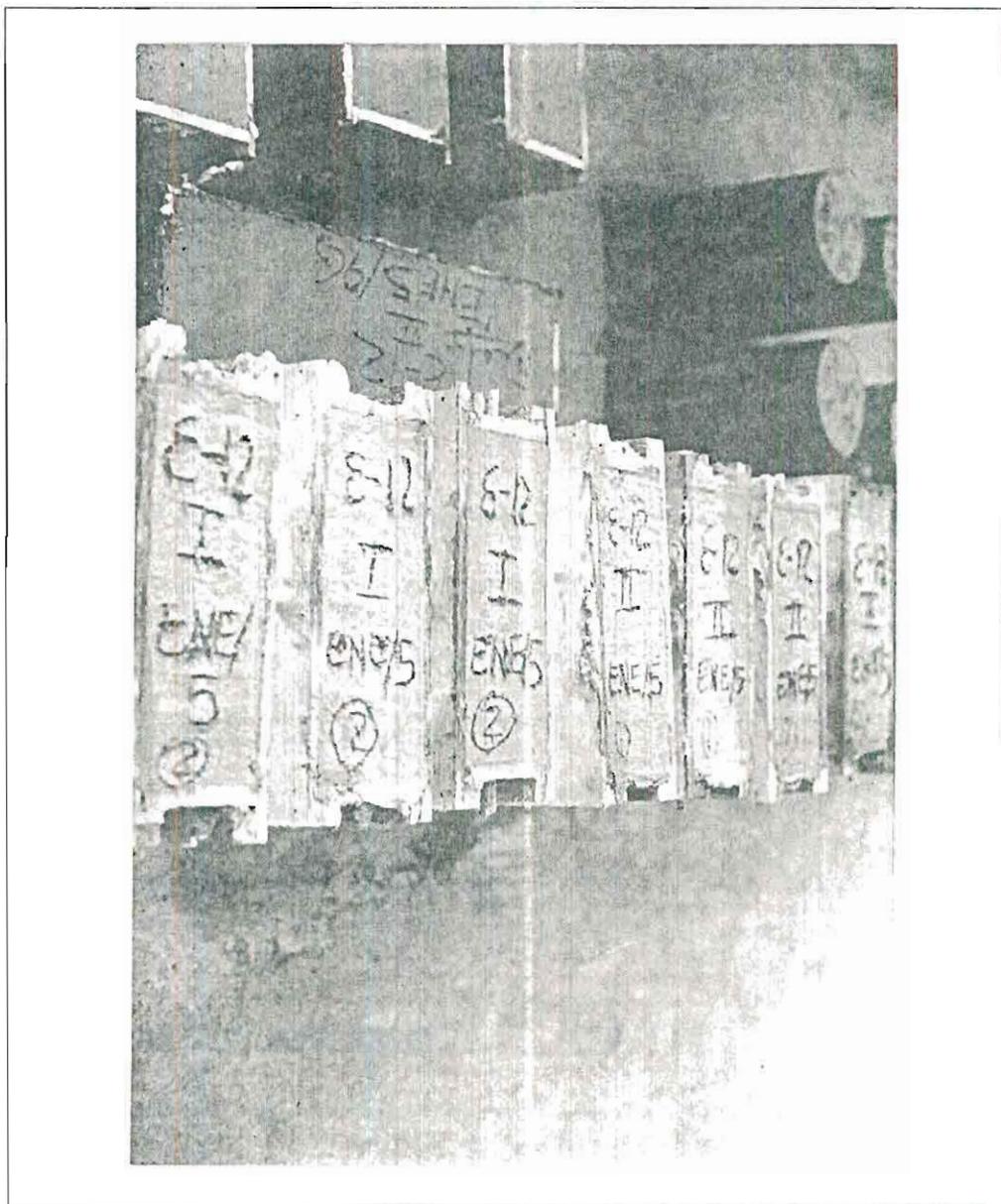


Figura 2.5

VIGA CON CÓDIGO PARA FÁCIL IDENTIFICACIÓN

Para indicar hormigones de 210 y 350 Kg/cm<sup>2</sup> se utilizaron los símbolos  $\Omega$ ,  $\alpha$  respectivamente, como se indica en **las tabla # 22** y **# 24**.

Como pruebas físicas sobre el hormigón se desarrollaron las indicadas en la norma de ASTM G-109, esta pruebas son detalladas en el siguiente numeral.

Para conocer el efecto físicos de los inhibidores ( ver **figura 2.6** ) solos y en combinación con inclusores de aire en el hormigón se desarrollaron las siguientes pruebas:

- Prueba de asentamiento
- Contenido de aire
- Resistencia a la compresión
- **Prueba de Asentamiento** : esta prueba se la realizo con la finalidad de determinar la incidencia de los aditivos en la trabajabilidad y consistencia del hormigón, la prueba se basó en la norma ASTM C-143-39.

Como criterios de valoración en la **tabla # 25** se observan las distintas consistencias según los asentamientos medidos con el cono de Abrams. En la **tabla # 26** los asentamientos recomendados para diferentes tipo de obras.

En la presente tesis el asentamiento se trató de mantener en 12 cm., en la **tablas #27, #28 y # 29** se observan los asentamientos obtenidos para cada diseño en cada tipo de mezcla.

**TABLA # 25**

**CLASIFICACIÓN DE LAS CONSISTENCIAS SEGÚN LOS  
ASIENTOS MEDIDOS CON EL CONO DE ABRAMS**

<b>Consistencia</b>	<b>Asiento en el cono de Abrams (cm)</b>
Seca (S)	0-2
Plástica (P)	3-5
Blanda (B)	6-9
<b>Fluïda (F)</b>	<b>10-15</b>
Líquida (L)	mayor o igual a 16

**TABLA # 26**  
**VALORES DE ASENTAMIENTOS PARA**  
**DIFERENTES TIPOS DE OBRAS**

Tipo de obra	Asentamiento (cm)	
	Mínimo	Máximo
<b>Muros, bases y cimentaciones de hormigón armado y paredes planas de poco espesor</b>	<b>5</b>	<b>13</b>
Miembros de subestructuras	2	10
Losas, vigas y paredes de H.A.	6	15
Columnas de edificios	6	15
Pavimentos	4	8

TABLA # 27

## ASENTAMIENTOS OBTENIDOS PARA EL HORMIGÓN

 $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ 

Tipo de Mezcla	Fecha de ejecución	Asentamiento ( cm)	Media (cm)	Observaciones
$\Omega - I$	Dic 21/95	11.5	11.5	
	Dic 22/95	11.0		
	Dic. 26/95	12.0		
$\Omega - II$	Dic. 26/95	15.0	11	Se puso mucha agua
	Dic. 27/95	11.0		
	Dic. 28/95	11.0		
	Dic. 28/95	14.0		
$\Omega - III$	Dic. 28/95	14.0	11.5	Se puso mucha agua
	Dic. 29/95	11.0		
	Ene 4/96	12.0		
$\Omega - IV$	Ene 2/96	12.0	11.8	
	Ene 2/96	11.5		
	Ene 3/96	12.0		
$\Omega - V$	Ene 3/96	17.0	12.3	Elevada dosis-AEA
	Ene 4/96	12.0		
	Ene 4/96	12.5		

TABLA # 28

## ASENTAMIENTOS OBTENIDOS PARA EL HORMIGÓN

 $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ 

Tipo de Mezcla	Fecha de ejecución	Asentamiento ( cm)	Media (cm)	Observaciones
ε - I	Ene 4/96	13.5	12.67	
	Ene 5/96	12.0		
	Ene 5/96	12.5		
ε - II	Ene 5/96	15.0	12.50	Se puso mucha agua
	Ene 5/96	12.0		
	Ene 5/96	13.0		
ε - III	Ene 8/96	13.0	12.20	
	Ene 8/96	11.5		
	Ene 8/96	12.0		
ε - IV	Ene 8/96	14.0	12.25	Elevada dosis - AEA
	Ene 8/96	12.0		
	Ene 8/96	12.5		
ε - V	Ene 9/96	11.5	12.33	
	Ene 9/96	13.0		
	Ene 10/96	12.5		

TABLA # 29

## ASENTAMIENTOS OBTENIDOS PARA EL HORMIGÓN

 $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ 

Tipo de Mezcla	Fecha de ejecución	Asentamiento ( cm)	Media (cm)	Observaciones
$\alpha - I$	Ene 10/96	13.0	12.67	
	Ene 10/96	12.0		
	Ene 11/96	13.0		
$\alpha - II$	Ene 11/96	12.0	12.00	Se puso mucha agua
	Ene 11/96	12.0		
	Ene 11/96	12.0		
$\alpha - III$	Ene 11/96	12.0	12.50	
	Ene 12/96	12.5		
	Ene 12/96	13.0		
$\alpha - IV$	Ene 12/96	13.0	12.50	Elevada dosis - AEA
	Ene 12/96	12.5		
	Ene 15/96	12.0		
$\alpha - V$	Ene 15/96	13.5	12.33	Elevada dosis - AEA
	Ene 15/96	12.0		
	Ene 15/96	11.5		

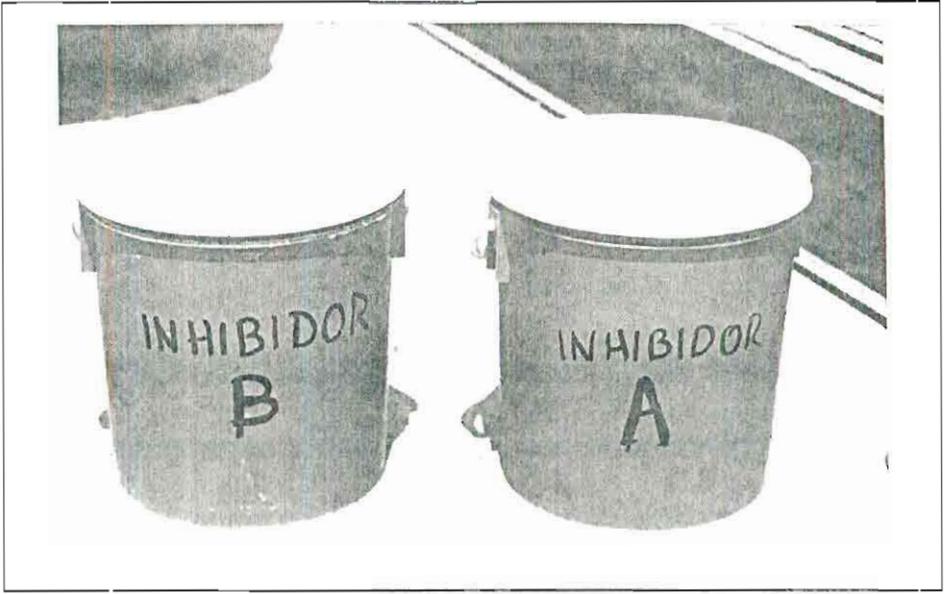


Figura 2.6

**INHIBIDORES USADOS EN LAS VIGAS**

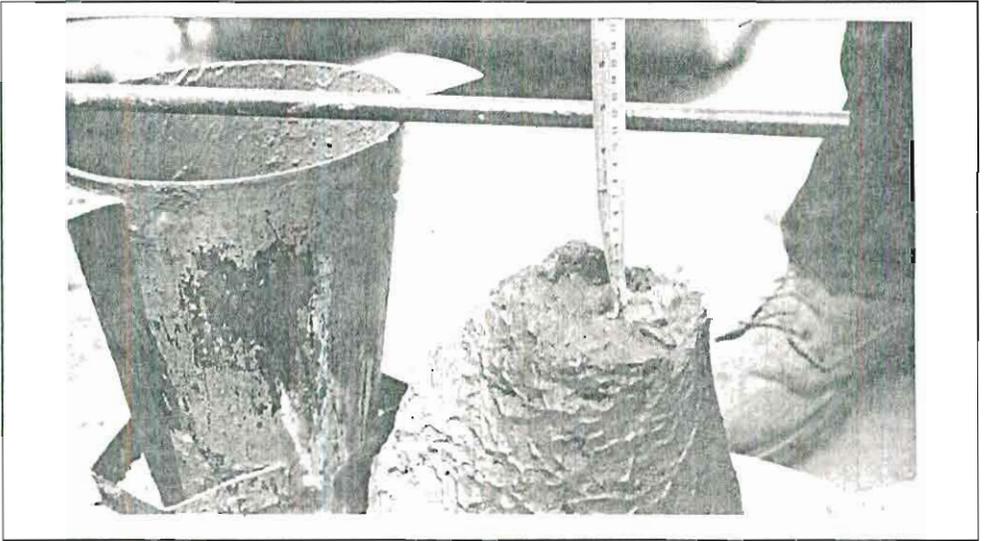


Figura 2.7

**PRUEBA DE ASENTAMIENTO**

- **Contenido de aire:** esta prueba se la realiza con el objetivo de conocer la influencia que puede tener el inhibidor solo y en combinación con los inclusores de aire en el contenido del aire en el hormigón.

Como es conocido el contenido de aire varía inversamente con la conductividad y directamente con el contenido de cemento, así como los efectos que pueden tener estos en la resistencia del hormigón.

En la **tabla # 30** se encuentra el contenido de aire para el hormigón de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ , en la **tabla # 31** se encuentra el contenido de aire para el hormigón de  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$  y en la **tabla # 32** se encuentra el contenido de aire para el hormigón de  $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$  para cada diseño y para cada tipo de mezcla. Esta prueba se indica en la **figura 2.8**

TABLA # 30

## CONTENIDOS DE AIRE OBTENIDOS PARA EL HORMIGÓN

 $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ 

Tipo de Mezcla	Fecha de ejecución	Contenidos de aire, %	Media %	Observaciones
$\Omega - I$	Dic 21/95	1.7	<b>1.77</b>	
	Dic 22/95	1.9		
	Dic. 26/95	1.7		
$\Omega - II$	Dic 26/95	3.0	<b>2.98</b>	Se puso mucha agua
	Dic 27/95	3.0		
	Dic 28/95	2.9		
	Dic 28/95	3.0		Se puso mucha agua
$\Omega - III$	Dic 28/95	1.7	<b>1.83</b>	Se puso mucha agua
	Dic 29/95	1.9		
	Ene 4/96	1.9		
$\Omega - IV$	Ene 2/96	7.5	<b>7.67</b>	
	Ene 2/96	8.0		
	Ene 3/96	7.5		
$\Omega - V$	Ene 3/96	9.0	<b>8.17</b>	Elevada - de AEA
	Ene 4/96	7.5		
	Ene 4/96	8.0		

TABLA # 31

## CONTENIDOS DE AIRE OBTENIDOS PARA EL HORMIGÓN

$$f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$$

Tipo de Mezcla	Fecha de ejecución	Contenidos de aire, %	Media %	Observaciones
ε - I	Ene 4/96	2.0	2.20	
	Ene 5/96	2.2		
	Ene 5/96	2.4		
ε - II	Ene 5/96	3.4	3.43	Se puso mucha agua
	Ene 5/96	3.5		
	Ene 5/96	3.5		
ε - III	Ene 8/96	1.9	1.90	
	Ene 8/96	1.8		
	Ene 8/96	2.0		
ε - IV	Ene 8/96	7.8	8.23	Elevada dosis - AEA
	Ene 8/96	8.4		
	Ene 8/96	8.5		
ε - V	Ene 9/96	8.5	8.33	
	Ene 9/96	8.0		
	Ene 10/96	8.5		

TABLA # 32

## CONTENIDOS DE AIRE OBTENIDOS PARA EL HORMIGÓN

 $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ 

Tipo de Mezcla	Fecha de ejecución	Contenido de aire, %	Media %	Observaciones
$\alpha - I$	Ene 10/96	1.8	<b>1.70</b>	
	Ene 10/96	1.5		
	Ene 11/96	1.8		
$\alpha - II$	Ene 11/96	4.5	<b>4.70</b>	
	Ene 11/96	4.8		
	Ene 11/96	4.8		
$\alpha - III$	Ene 11/96	2.0	<b>1.70</b>	
	Ene 12/96	1.2		
	Ene 12/96	1.9		
$\alpha - IV$	Ene 12/96	7.0	<b>7.33</b>	
	Ene 12/96	8.0		
	Ene 15/96	7.0		
$\alpha - V$	Ene 15/96	7.0	<b>6.93</b>	
	Ene 15/96	7.0		
	Ene 15/96	6.8		

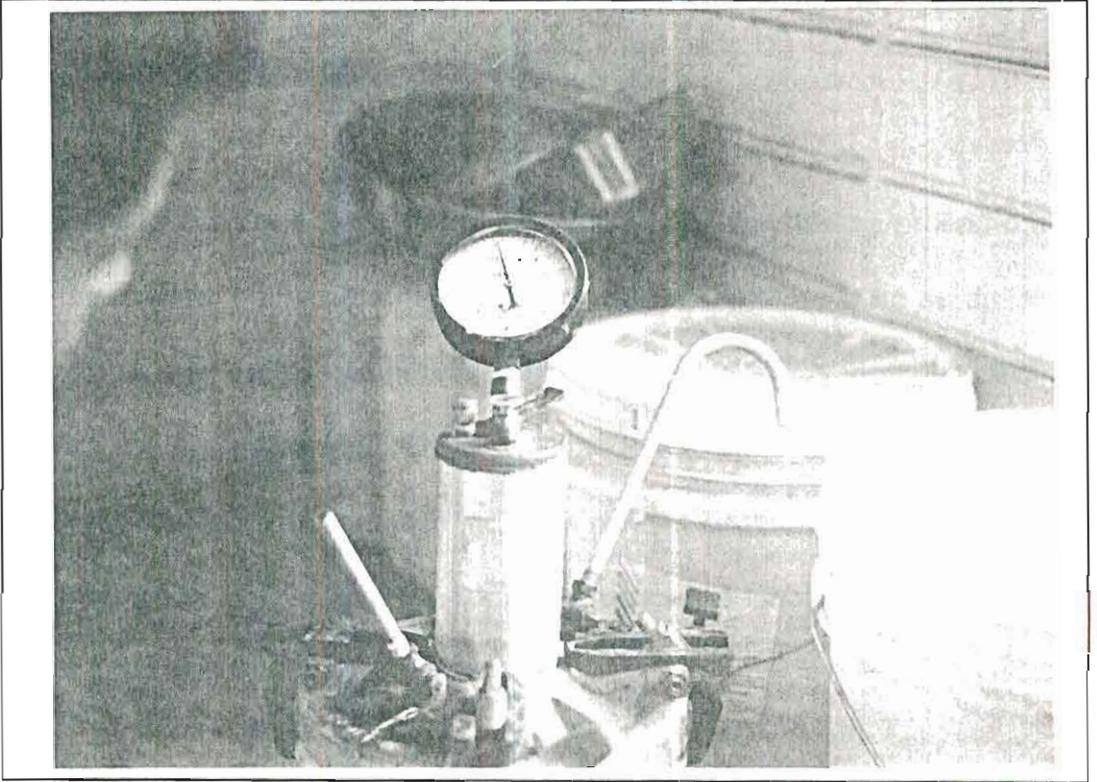


Figura 2.8

### PRUEBA DE CONTENIDO DE AIRE

- **Resistencia a la compresión:** esta prueba se la realizo basándose en la norma de la ASTM C-78-44. En la **tablas # 33, # 34 y # 35** se muestran los resultados de las roturas de cilindros a los 28 días para los hormigones de  $f'c=210, 280$  y  $350 \text{ kg/cm}^2$  respectivamente.

Se tuvieron muchos cuidados para el manejo y curado de los cilindros para evitar fracturas que puedan alterar los resultados indicados en las tablas anteriores.

Después de que los cilindros curaron , a los 28 días se procedió a romperlos, es importante considerar que el inhibidor B no se aplico en los cilindros, este inhibidor solo se aplicó en las vigas es decir en el concreto endurecido y cuando se refiere en las tablas respecto a las roturas y se indica la mezcla con inhibidor significa la mezcla de control con la cual se prepararon las vigas y luego se aplicó el inhibidor en la superficie.

**TABLA # 33**  
**ROTURAS DE CILINDROS A LOS 28 DÍAS**  
**HORMIGÓN  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$**

Tipo de Mezcla	$\Omega - I$	$\Omega - II$	$\Omega - III$	$\Omega - IV$	$\Omega - V$	
Rotura kg/cm <sup>2</sup>	235.60	250.48	281.48	188.00	252.26	
	218.24	254.20	282.72	182.28	218.24	
	219.48	255.44	279.00	163.68	219.48	
					223.20	
	226.92	259.16	262.88	155.00	239.32	
	223.20	251.72	256.68	156.24	238.08	
	225.68	251.20	277.76	172.36	239.32	
				176.88	240.56	
	227.92	254.20	<b>326.12</b>	169.88	217.00	
	230.46	235.60	<b>312.48</b>	161.20	204.60	
	232.88	246.76	<b>321.16</b>	163.68	208.32	
			<b>322.40</b>	162.41		
		238.08		173.60		
		248.00		176.08		
		244.28		178.56		
				174.84		
	<b>PROMEDIO</b>	<b>226.71</b>	<b>249.09</b>	<b>273.42</b>	<b>170.29</b>	<b>227.31</b>
	Desv. Stand.	5.47	6.71	9.94	9.30	14.60

**NOTA:** Los resultados sombreados fueron descartados al calcular el promedio

**TABLA # 34**  
**ROTURAS DE CILINDROS A LOS 28 DÍAS**  
**HORMIGÓN  $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$**

Tipo de Mezcla	$\epsilon - I$	$\epsilon - II$	$\epsilon - III$	$\epsilon - IV$	$\epsilon - V$	
Rotura kg/cm <sup>2</sup>	337.28	323.64	349.68	262.88	146.32	
	332.32	326.12	372.00	259.16	146.32	
	336.04	327.36	368.28	260.40	147.56	
		326.12	374.48	264.12	148.80	
	307.82	348.44	369.52	246.78	217.00	
	319.92	344.72	368.28	254.00	195.92	
	310.00	345.96	373.24	248.00	198.40	
	313.72	349.68	374.48	250.48	202.12	
	303.80	339.76	319.92	199.64	183.52	
	305.04	337.28	326.12	205.84	195.92	
	301.32	334.80	322.40	208.32	195.20	
	302.56		321.16	207.08	188.48	
	<b>PROMEDIO</b>	<b>315.44</b>	<b>336.72</b>	<b>353.30</b>	<b>255.73</b>	<b>196.69</b>
	Desv. Stand.	13.16	9.30	22.75	6.37	9.40

**NOTA:** Los resultados sombreados de gris y rojo de la mezcla  $\epsilon - IV$  y  $\epsilon - V$  tienen resistencias un 40% a 60% menos que los datos de control, existe un error en la cantidad de cemento.

TABLA # 35  
 ROTURAS DE CILINDROS A LOS 28 DÍAS  
 HORMIGON  $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$

Tipo de Mezcla	$\alpha - I$	$\alpha - II$	$\alpha - III$	$\alpha - IV$	$\alpha - V$	
Rotura $\text{kg/cm}^2$	317.44	350.92	369.52	226.92	303.80	
	322.40	358.36	367.04	245.52	292.64	
	325.16	355.88	365.80	236.84	293.88	
	332.32	352.16	367.84	225.68	300.08	
	295.12	370.76	316.20	285.20	298.84	
	312.48	381.92	318.68	266.60	311.24	
	311.24	372.00	314.96	272.80	302.56	
	297.60	375.72	319.92	279.00	308.76	
	375.72	385.64	318.68	<b>168.64</b>	300.08	
	372.00	376.94	301.32	<b>173.60</b>	292.64	
	379.44	386.88	305.04	<b>171.12</b>	282.20	
	374.48	381.00	311.24	<b>174.84</b>	281.48	
	<b>PROMEDIO</b>	<b>334.62</b>	<b>370.68</b>	<b>331.35</b>	<b>254.82</b>	<b>297.60</b>
	<b>Desv. Stand.</b>	30.54	12.55	26.14	22.38	8.48

**NOTA:** Los resultados sombreados tienen resistencias un 50% menos que los datos de control, existe un error en la cantidad de cemento.

### 2.3 PREPARACIÓN DE VIGAS TESTIGOS

En general se fabricaron 4 cilindros de 16 x 32 cm y 3 vigas de 11 x 27 x 15 cm., además como se indicó anteriormente se comprobaron los asentamientos y contenidos de aire de las muestras, en la **figura 2.9** se observan todos los materiales utilizados en la tesis. Para evaluar los inhibidores se fundieron vigas con 3 varillas las cuales quedaron embebidas como lo indica la norma ASTM G-109. Esta triada consiste en una varilla en la parte superior y dos varillas equidistantes en la parte inferior, así formando un triángulo isósceles. Las varillas fueron de aproximadamente 34 cm. de largo, de tal forma que se extiendan cerca de 5 cm desde los lados de las vigas. Las barras fueron de un diámetro de 10 mm. La altura de las vigas fue de 15 cm. El recubrimiento usado fue de 2.5 cm. Todas las dimensiones se basaron en la norma de la ASTM G 109-92.

Las vigas tomaron forma con unos molde de plywood los cuales fueron taladrados previamente para ser introducidos las barras antes de la fundir las vigas ( ver **figura 2.10** ) y para prevenir la adherencia del concreto fueron recubiertas con aceite.

Las barras a fin de minimizar los efectos de la corrosión existentes en las barras, estas fueron decapadas en una solución al 10% de Ácido Clorhídrico, luego fueron lavadas ( ver **figura 2.11** ) y cepillada con cepillo con cerda de acero para eliminar residuos de cloruros, después fueron colocadas en un reservorio con un 20 % de ácido fosfórico ( ver **figura 2.12** ), nuevamente fueron cepilladas, lavadas con agua y luego secadas en horno por unos 2 minutos, por último se las cepillo y se las limpio con hexano (diluyente) para eliminar cualquier residuo. En la **figura 2.13** se observan los estanques utilizados en la prueba. Para prevenir la corrosión y minimizar efectos en los extremos las barras fueron pintas con una pintura epóxica con 3 mils de espesor de película seca ( ver **figura 2.14**).

Se pesó todos los materiales de acuerdo a los diseños respectivos como se indica anteriormente y se colocaron en la concretera , luego el concreto fue mezclado continuamente por unos cuatro minutos en una concretera rotatoria con un 0.1 m<sup>3</sup> de capacidad. Se controló los asentamientos y contenidos de aire para cada mezcla. El concreto fue puesto en los moldes de madera en tres capas y el procedimiento de vibrado fue similar al de un cilindro de prueba para resistencia mecánica ( ver **figura**

2.15). La superficie de las vigas fueron enlucidas con una regla de acero ( ver **figura 2.16** ). Paralelamente se fundieron cilindros para comprobar posteriormente la resistencia a la compresión de la mezcla del hormigón.

Los moldes fueron llenados y dejados fijos durante 24 horas ( ver **figura 2.17** ), luego se desencofraron las vigas y los cilindros y fueron curados por 28 días ( ver **figura 2.18**). Después del curado las vigas permanecieron a temperatura ambiental por 24 horas.

Pequeños reservorios de plywood fueron construidos y colocados sobre la superficie y pegados con silicona ( ver **figuras 2.19 y 2.20** ). Los lados fueron recubiertos con un impermeabilizante cementoso para prevenir las perdida de humedad y el ingreso de sal por los lados, además reducir la difusión de oxígeno y vapor de agua ( ver **figuras 2.21 y 2.22**). Luego fue cepillado una de los extremos de las varillas para luego armar el circuito entre las varillas y formar la macrocelda ( ver **figura 2.23**). En el circuito se utilizo una resistencia de 100 Ohm ( ver **figura 2.24** ).

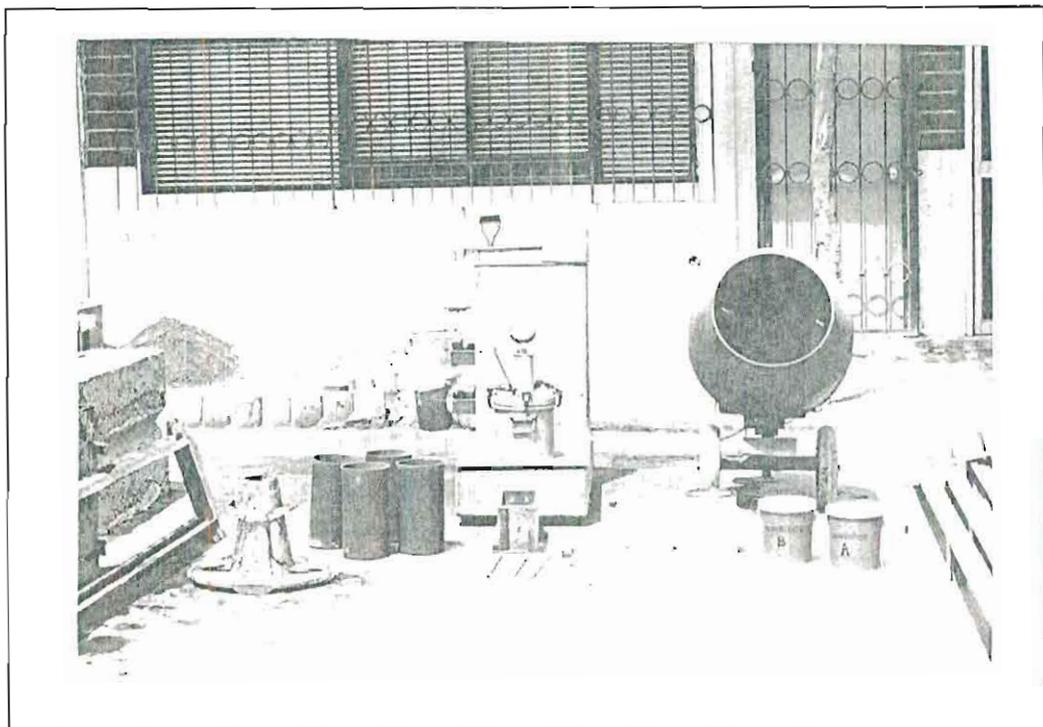


Figura 2.9

### MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

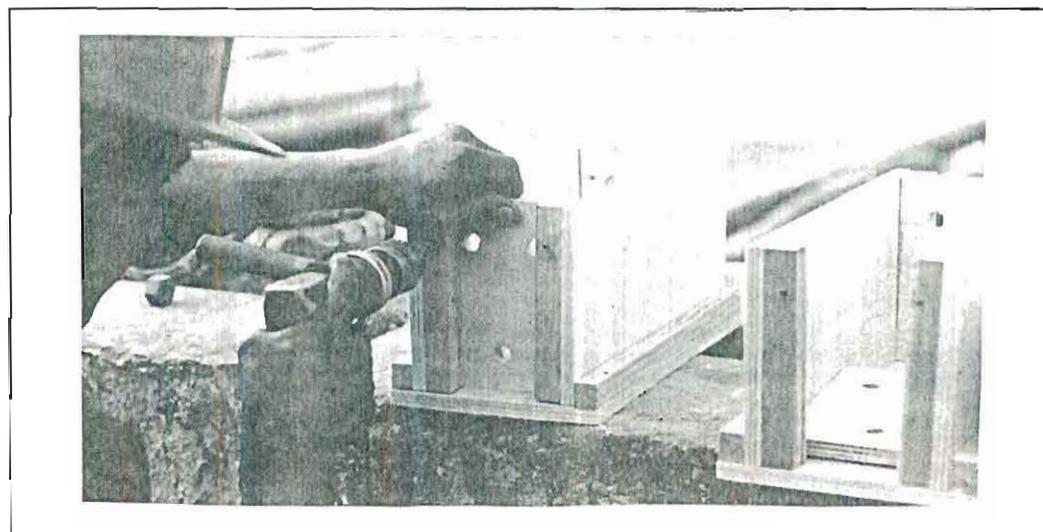


Figura 2.10

### PREPARACIÓN DE MOLDE DONDE SE FUNDIRÁN LAS VIGAS

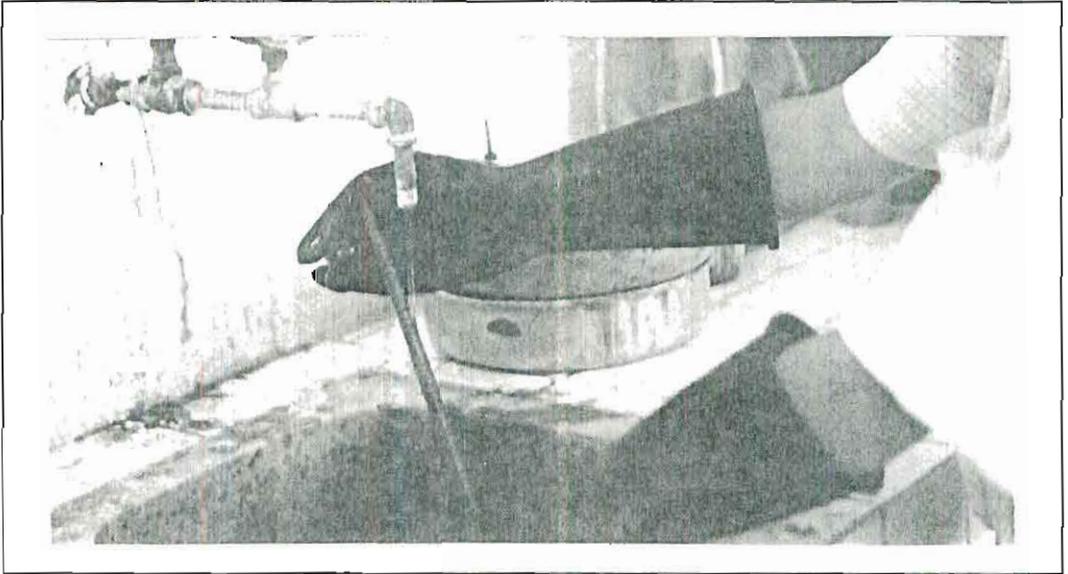


Figura 2.11

**LIMPIEZA CON AGUA ANTES DE COLOCARSE LAS VARILLAS EN  
EL RESERVORIO CON ÁCIDO FOSFÓRICO**

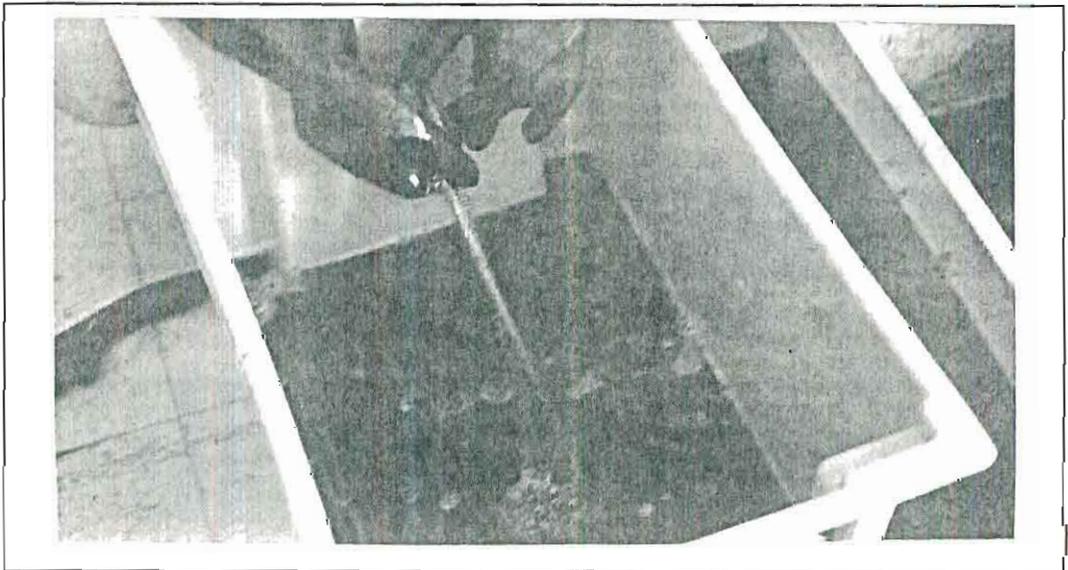
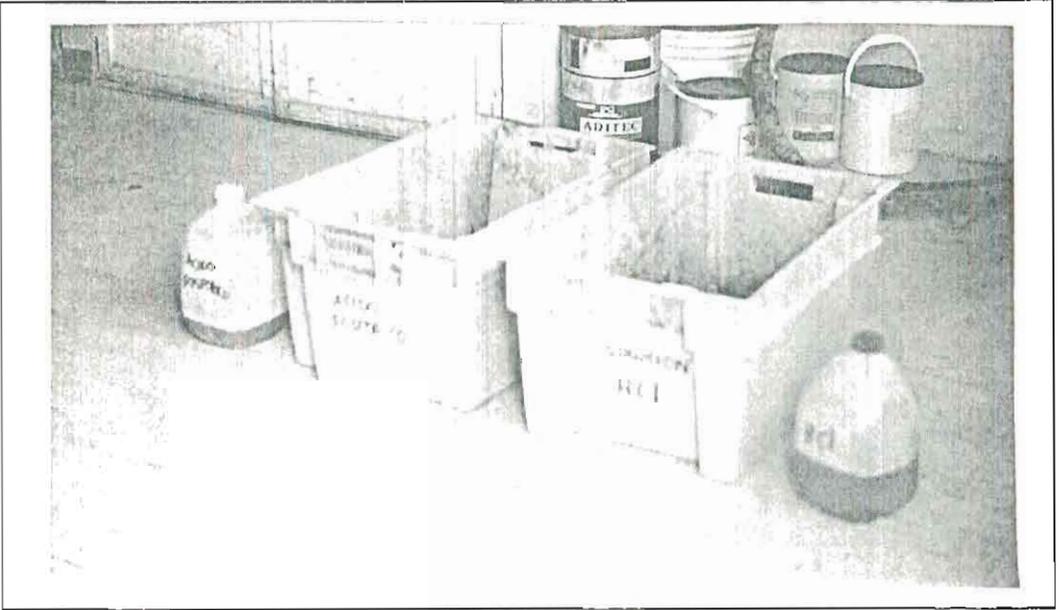


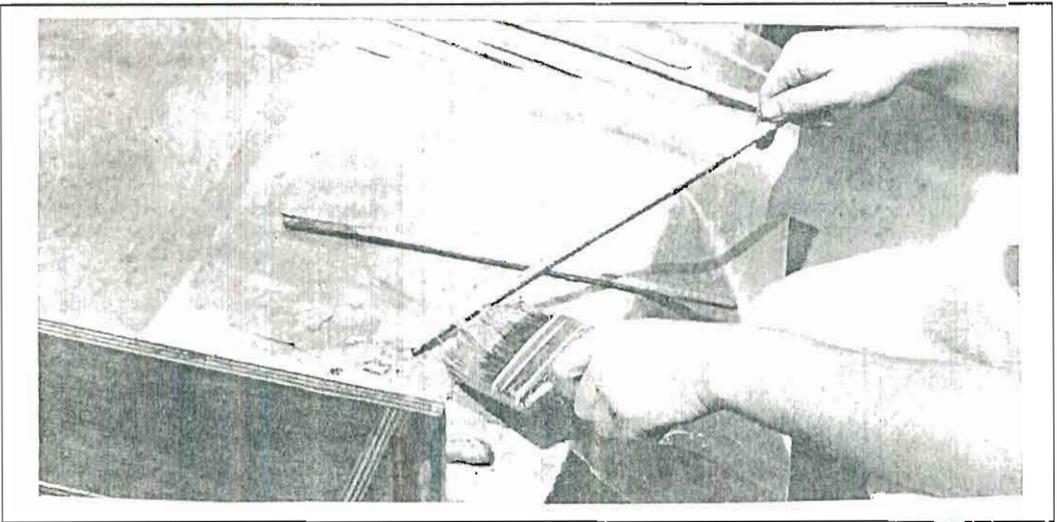
Figura 2.12

**VARILLAS LUEGO DE PERMANECER EN LA TINA CON ÁCIDO  
FOSFÓRICO FUERON CEPILLADAS Y LAVADAS CON AGUA**



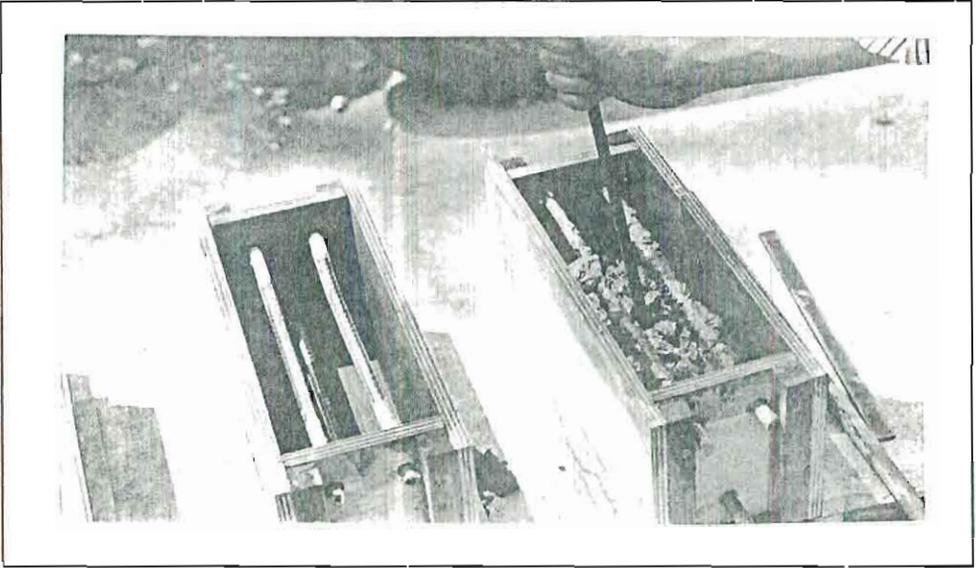
**Figura 2.13**

**MUESTREO DE LAS TINAS DONDE SE REALIZO LA LIMPIEZA DE  
LAS VARILLAS**



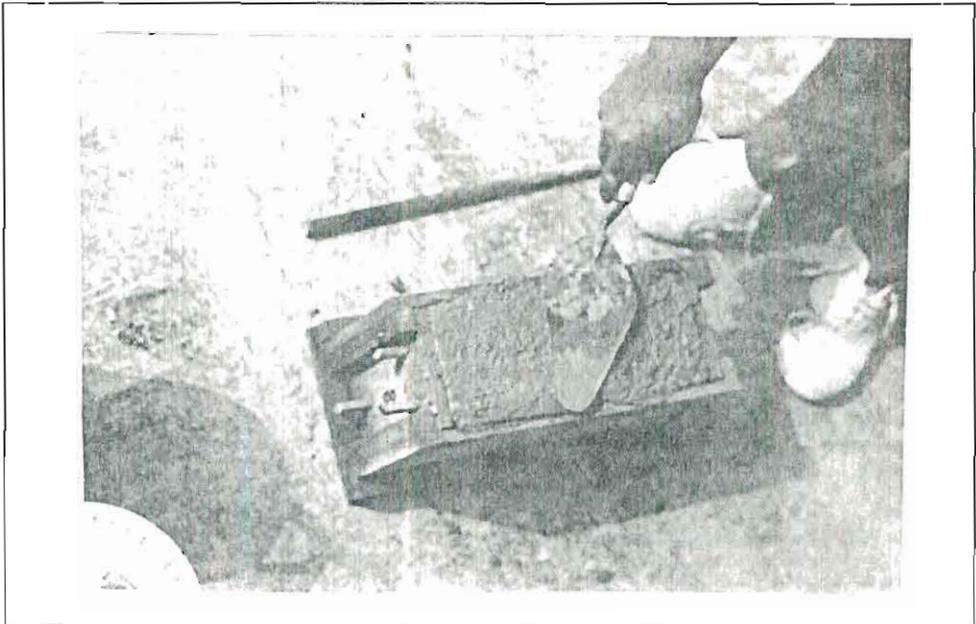
**Figura 2.14**

**PARA ELIMINAR DISTORSIONES EN LOS EXTREMOS, ESTOS  
FUERON PINTADOS CON PINTURA EPÓXICA**



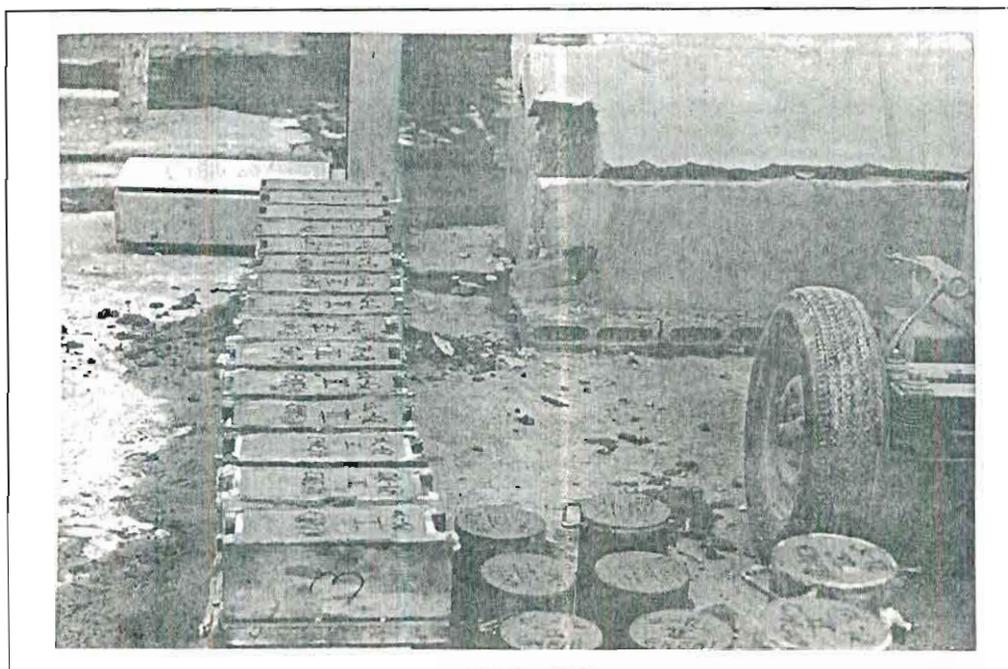
**Figura 2.15**

**VIBRADO DEL HORMIGÓN EN LOS MOLDES DE LAS VIGAS**



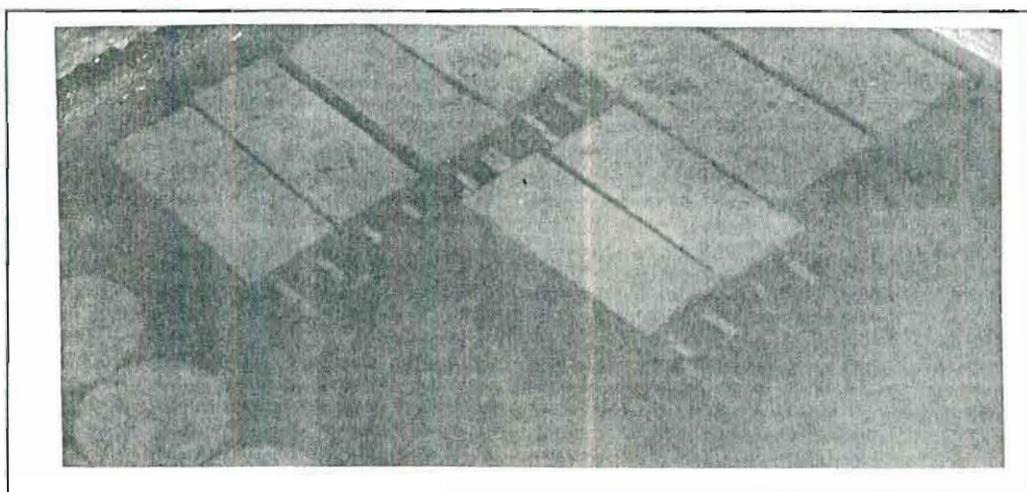
**Figura 2.16**

**ENLUCIDO DE LAS VIGAS LUEGO DEL VIBRADO**



**Figura 2.17**

**MUESTREO DE LOS CILINDROS Y VIGAS TESTIGOS DESPUÉS DE  
UN DÍA DE TRABAJO**



**Figura 2.18**

**LAS VIGAS Y CILINDROS PERMANECIERON 28 DÍAS PARA SU CURADO**

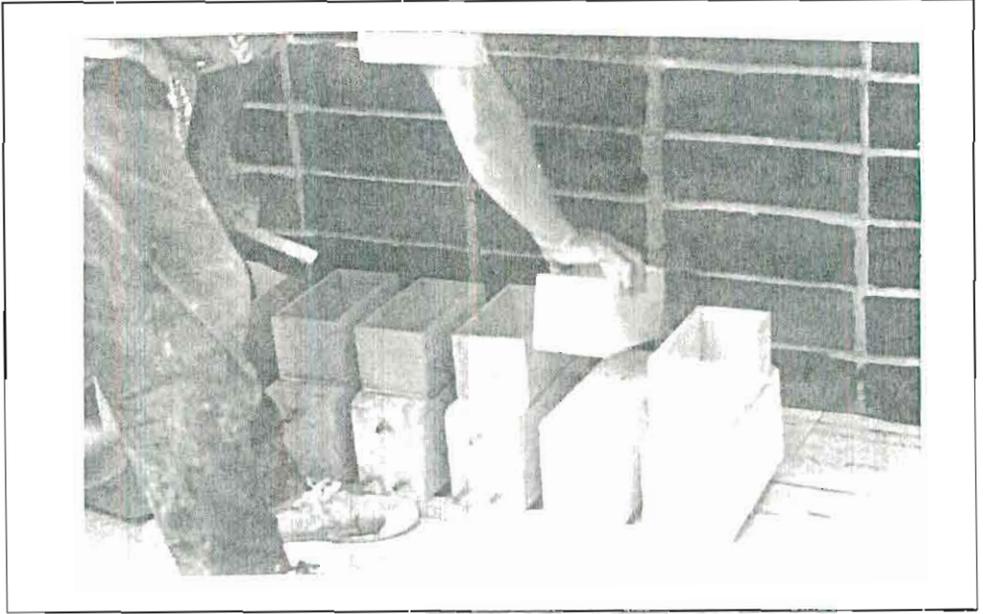


Figura 2.19

PARA PEGAR LOS RESERVORIOS DE PLYWOOD SE UTILIZÓ  
SILICONA.

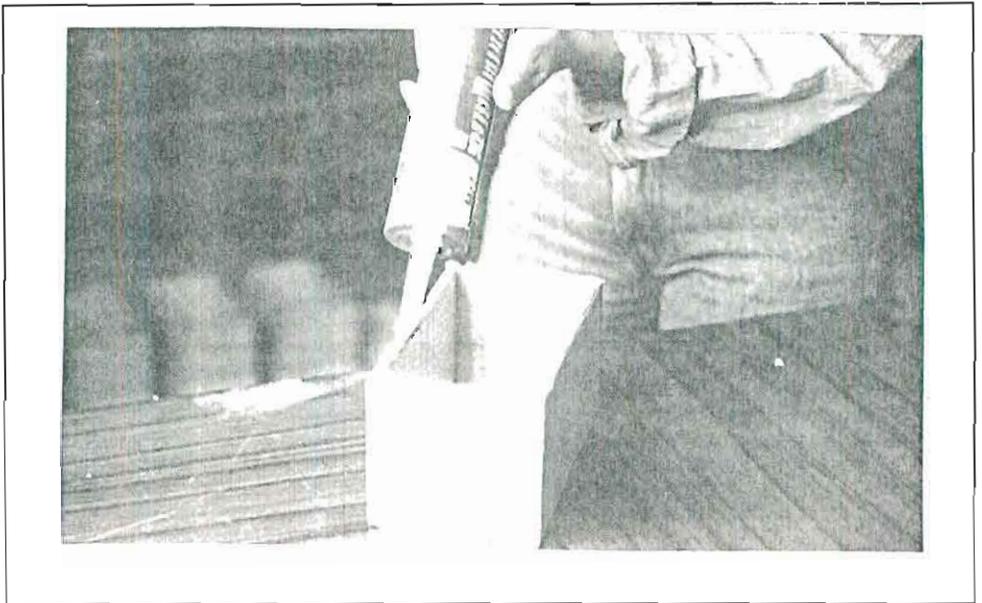


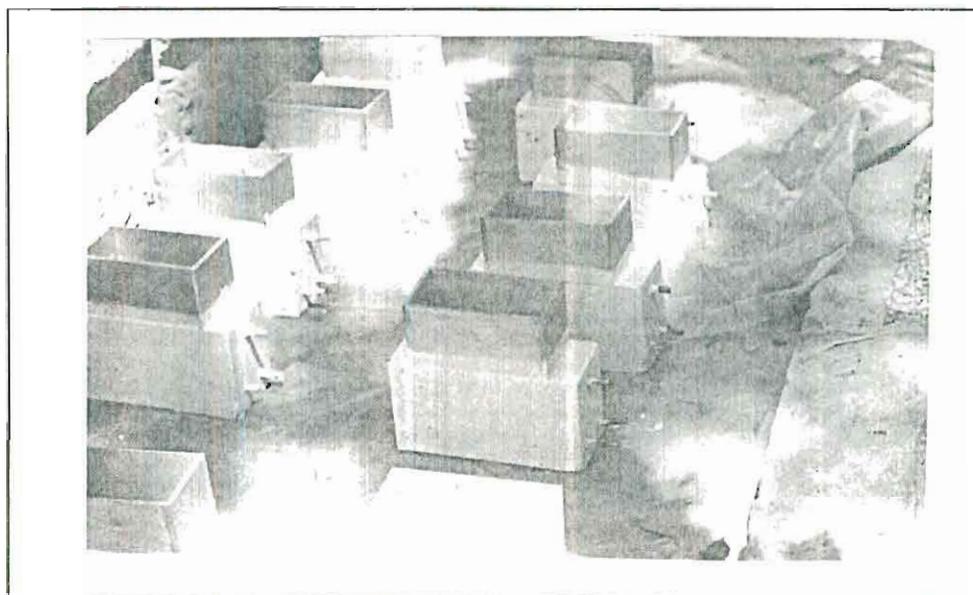
Figura 2.20

LOS RESERVORIOS SE PEGARON EN LA CARA SUPERIOR



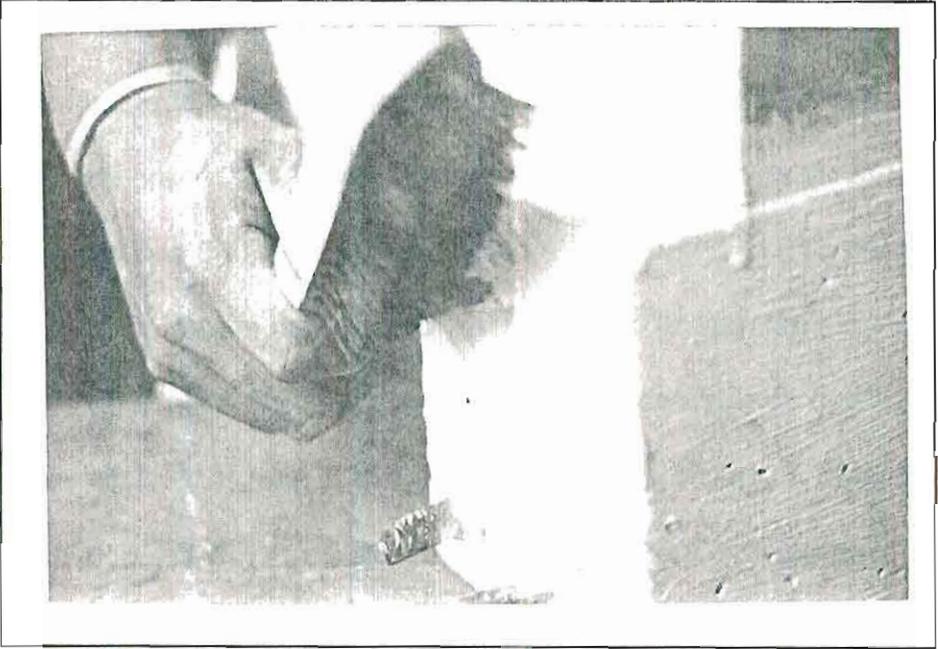
**Figura 2.21**

**VIGAS ANTES DE PINTAR LAS CARAS LATERALES**



**Figura 2.22**

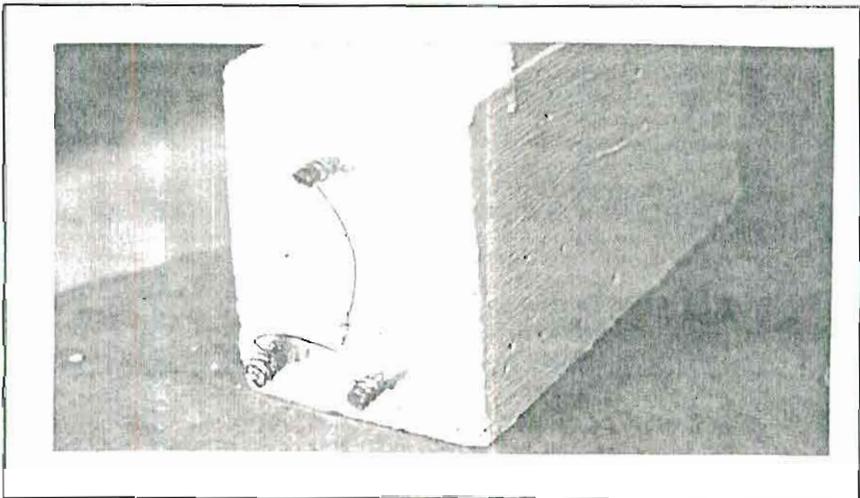
**VIGAS DESPUÉS DE PINTAR LAS CARAS LATERALES**



**Figura 2.23**

**CEPILLADO DE UNO LOS EXTREMOS DE LAS VARILLAS**

**ANTES DE ARMAR EL CIRCUITO**



**Figura 2.24**

**CIRCUITO DE LA CELDA CONECTADO**

## 2.4 PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS

Una vez que existe la macrocelda con la resistencia de 100 ohm y se han preparado todas las vigas se llenaron los reservorios de madera con 500 ml de una solución al 15% de NaCl ( 15 partes de NaCl y 85 partes de agua por masa) o 91.000 ppm del ión cloruro, esto equivale a 5 veces mayor la cantidad de cloruros que el agua de mar ( ver **figura 2.25** ) . La prueba fue cíclica: 7 días con la solución y 7 días se dejó secar a temperatura ambiental. Este ciclo se lo repitió hasta completar el doceavo ciclo ( 195 días ) . Al final de cada ciclo seco se obtuvieron las siguientes medidas:

- **Potenciales de Corrosión,  $E_{corr}$  (mV)**
- Corriente de la Macrocella,  $i_{mac}$  ( $\mu A$ )

Con estas mediciones se calcularon la :

- Corriente Integral de corrosión o Corrosión total, CTC ( Coulombios )
- **Corriente de corrosión o densidad de corriente,  $i_{corr}$  ( $\mu A/cm^2$ )**
- Velocidad de corrosión,  $I_{corr}$  ( $\mu mpy$  )
- Eficiencia de inhibición , IE ( % )
- Reducción de la corrosión total, RC, (%)

Los *potenciales de corrosión* y las *corrientes de corrosión* son mediciones utilizadas para determinar las velocidades de corrosión de un estructuras de hormigón armado. Ambos son métodos no destructivos y nos indican cualitativamente y cuantitativamente la corrosión del acero. En base a estas mediciones los investigadores han determinado las probabilidades de corrosión de un estructura y los daños previsto por corrosión de la armadura.



**Figura 2.25**

**COLOCACIÓN DE 500ML DE SOLUCIÓN SALINA EN LOS  
RESERVORIOS DE PLYWOOD**

### 2.4.1 Potenciales de corrosión

Con el electrodo de referencia Cobre Sulfato de cobre ( ver **figura 2.26** ) según la norma ASTM 876-87 se midieron los **Potenciales de corrosión**,  $E_{corr}$ . En las **tablas # 36, # 37 y # 38** se encuentran tabulados los Potenciales de corrosión , Corrientes de la Macrocela en el tiempo de duración de la primera fase.



Figura 2.26

**ELECTRODO  $Cu/SO_4Cu^6$  UTILIZADO PARA MEDIR LOS  
POTENCIALES DE CORROSIÓN.**

<sup>6</sup> Electrodo de Referencia  $Cu/SO_4Cu$ , marca Thinker Razor con dimensiones según norma ASTM 876-87

TABLA # 36

## POTENCIALES DE CORROSIÓN (mV)

DE LOS DIFERENTES MEZCLAS EN EL DISEÑO f'c= 210 kg/cm<sup>2</sup>

	I	II	III	IV	V
Días	E <sub>corr</sub>				
15	267	270	285	284	299
30	408	268	290	258	270
45	392	307	277	243	266
60	424	452	232	236	249
75	474	451	218	323	242
90	482	392	362	434	230
105	463	463	465	418	199
120	496	437	474	443	222
135	523	484	469	430	218
150	531	469	474	430	216
165	546	498	475	435	222
180	522	470	334	411	230

TABLA # 37

POTENCIALES DE CORROSIÓN (mV)

DE LOS DIFERENTES MEZCLAS EN EL DISEÑO  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$

	I	II	III	IV	V
Días	$E_{corr}$	$E_{corr}$	$E_{corr}$	$E_{corr}$	$E_{corr}$
15	283	289	261	267	257
30	246	259	212	244	235
45	231	239	212	252	235
60	219	222	219	226	258
75	217	220	199	220	410
90	211	213	210	296	424
105	210	204	217	475	436
120	214	223	196	469	408
135	290	285	209	469	402
150	364	252	187	443	394
165	348	287	192	444	394
180	418	412	182	444	394

TABLA # 38

POTENCIALES DE CORROSIÓN (mV)

DE LOS DIFERENTES MEZCLAS EN EL DISEÑO  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$

	I	II	III	IV	V
Días	$E_{corr}$	$E_{corr}$	$E_{corr}$	$E_{corr}$	$E_{corr}$
15	284	257	261	251	296
30	251	212	229	238	265
45	341	206	215	226	258
60	308	191	208	216	258
75	357	199	237	207	245
90	312	186	335	197	212
105	340	213	405	202	241
120	373	224	429	219	225
135	407	244	395	319	216
150	395	244	429	386	265
165	413	219	421	406	329
180	342	201	428	417	337

### 2.4.2 Corrientes de Corrosión

Para determinar la corriente de corrosión se tomaron mediciones de la corriente de la macrocelda y mediante algunos cálculos al final se obtuvo la corriente de corrosión.

Como las varillas superiores llegan a estar contaminadas con cloruros y humedad de los estanques de agua se convierten en varillas "anódicas", y como las varillas inferiores permanecen libre de un ambiente de cloruros y estando secas tienen un mayor acceso de oxígeno actúan como "catódicas", un flujo de electrones se da lugar desde las varillas anódicas a las catódicas, es decir las varillas anódicas ceden sus electrones a las varillas catódicas originándose este flujo denominado corriente de la macrocelda,  $i_{mac}$  ( $\mu A$ ), la cual es una corriente galvánica y es medible aplicando la ley de ohm :

$$V = R i_{mac}$$

(Ec. 8 )

La **Corriente de la macrocelda** ( $\mu\text{A}$ ) fue mediada con el amperímetro que se muestra en la **figura 2.27** en base al esquema de la **figura 2.28**.



Figura 2.27

**AMPERÍMETRO<sup>7</sup> UTILIZADO PARA REALIZAR LAS MEDICIONES DE CORRIENTES DE LA MACROCELDA**

<sup>7</sup> Amperímetro marca Brother, Rango de medición 0 a 200  $\mu\text{A}$ , sensibilidad 0.1  $\mu\text{A}$ .

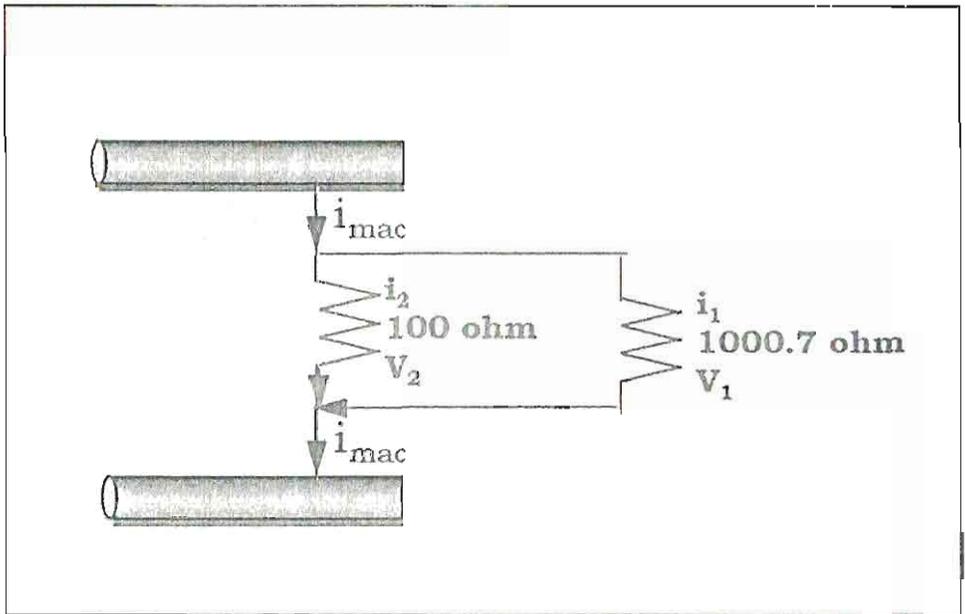


Figura 2.28

**ESQUEMA DE NODOS DEL CIRCUITO ELÉCTRICO  
FORMADO EN UN EXTREMOS DE LAS VARILLAS**

Matemáticamente la corriente de la macrocelda ( $i_{mac}$ ) es igual a la suma de la corriente que pasa a través de la resistencia de  $100\text{ ohm}$  colocada para armar el circuito ( $i_2$ ) y la corriente medida - con el amperímetro- que pasa a través de la resistencia de  $1000.7\text{ ohm}$  del equipo ( $i_1$ ), esta suma queda expresada de la siguiente manera:

$$i_{mac} = i_1 + i_2 \quad (\text{Ec. 9})$$

Los voltajes  $V_1$  y  $V_2$  son iguales , por lo tanto aplicando la **ecuación no. 8** y la **ecuación no. 9** la corriente de la macrocelda queda representada por la siguiente expresión:

$$i_{mac} = 11.007 i_1 \quad (\text{Ec. 10})$$

En la **tablas # 39, # 40 y # 41** se encuentran registradas las corrientes de la macrocelda para los diferentes diseños y tipos de mezclas desde el inicio del test hasta los 195 días en que concluyo la primera fase del estudio.

El valor  $i_1$  utilizado en la ecuación no. 10 para calcular las  $i_{mac}$  es el valor promedio de todas las  $i_1$  medidos para cada viga. El proceso de la toma de datos, cálculos con la ecuación no.10 y el diagrama de flujo del proceso estadístico para obtener los valores promedio de las corrientes de la macrocelda y los potenciales de corrosión se muestran en la **figuras 2.29 , 2.30, 2.31 y 2.32.**



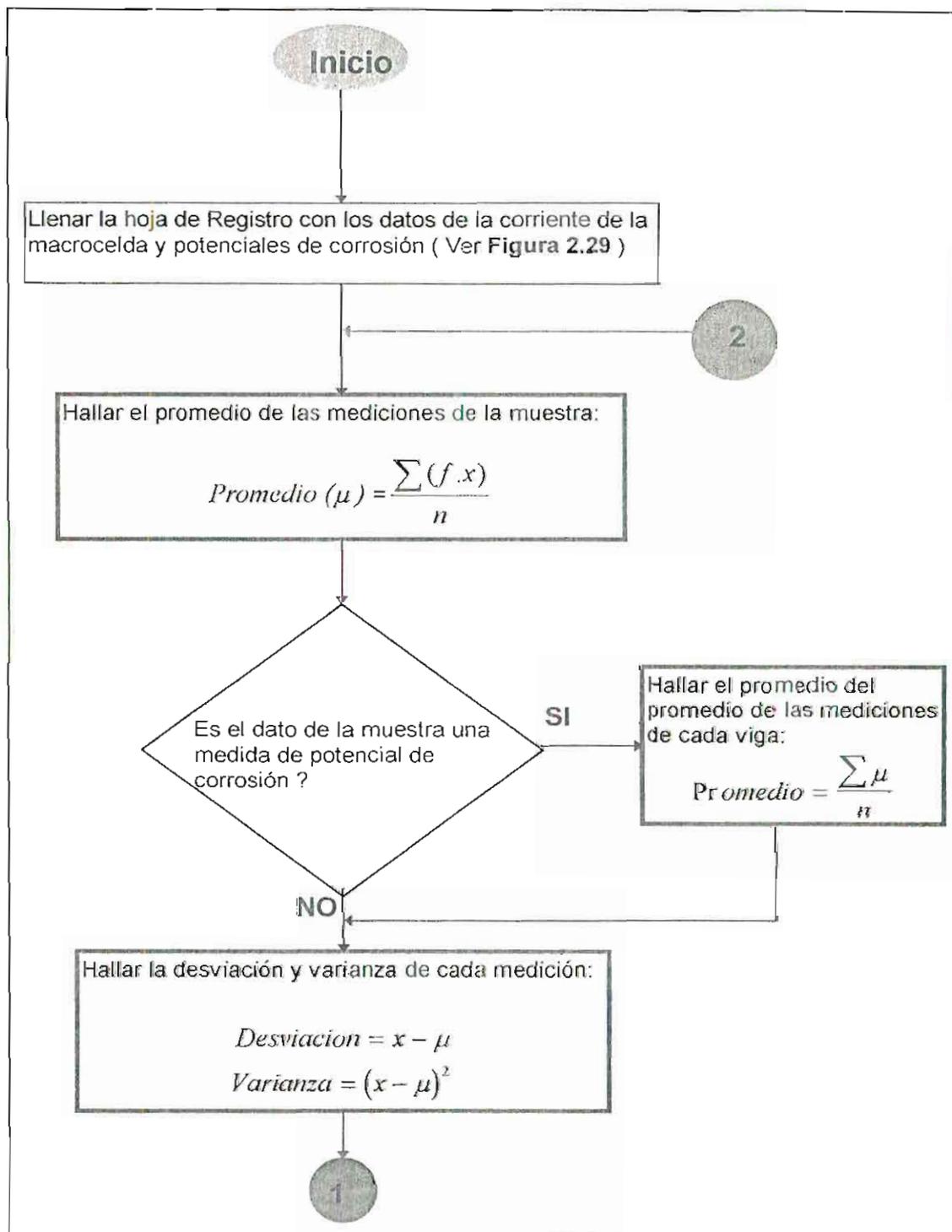


Figura 2.30

DIAGRAMA DE FLUJO RESPECTO AL MUESTREO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE LAS CORRIENTES Y POTENCIALES DE CORROSIÓN

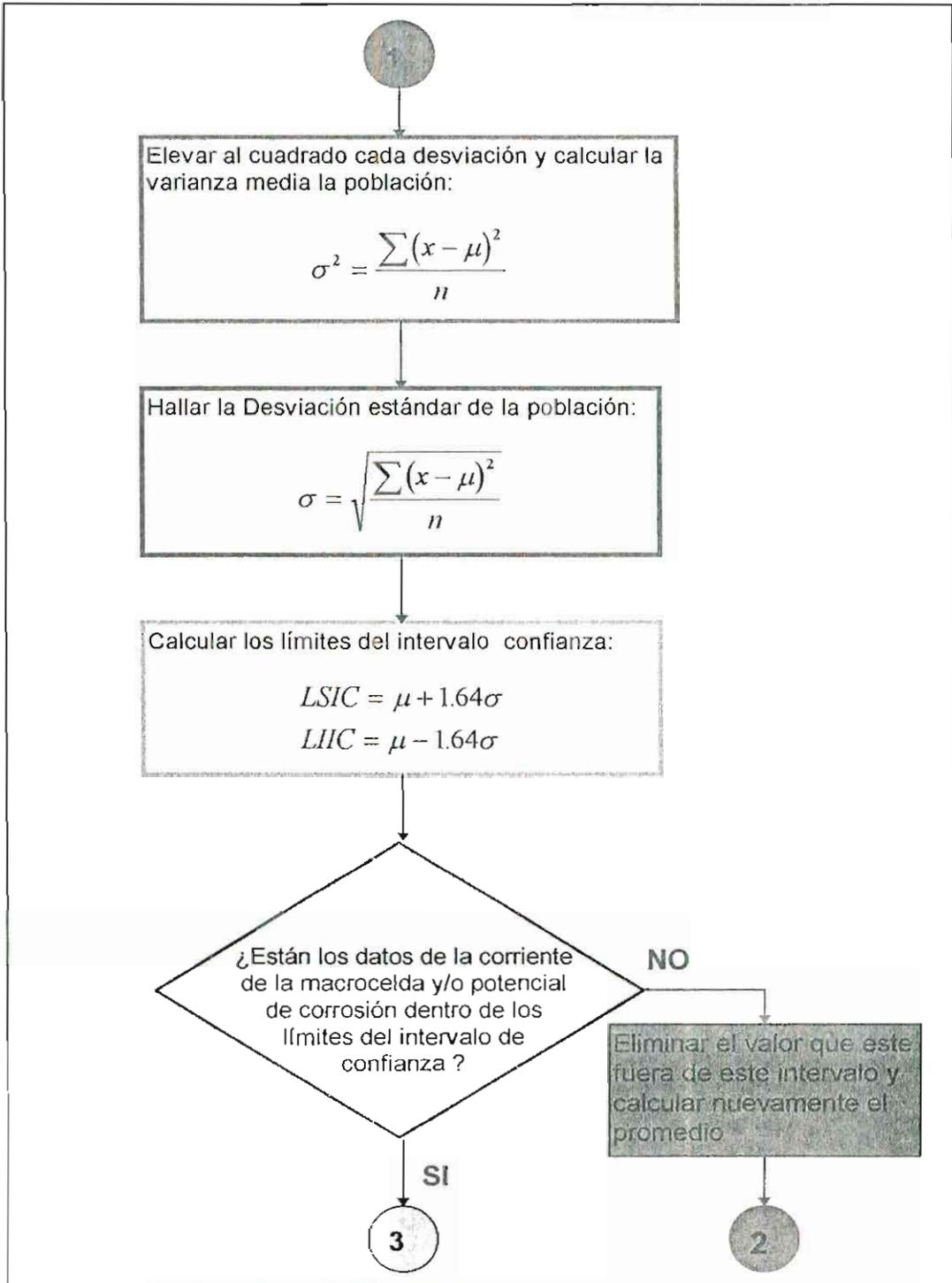


Figura 2.31

CONTINUACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DE LA FIGURA 2.30

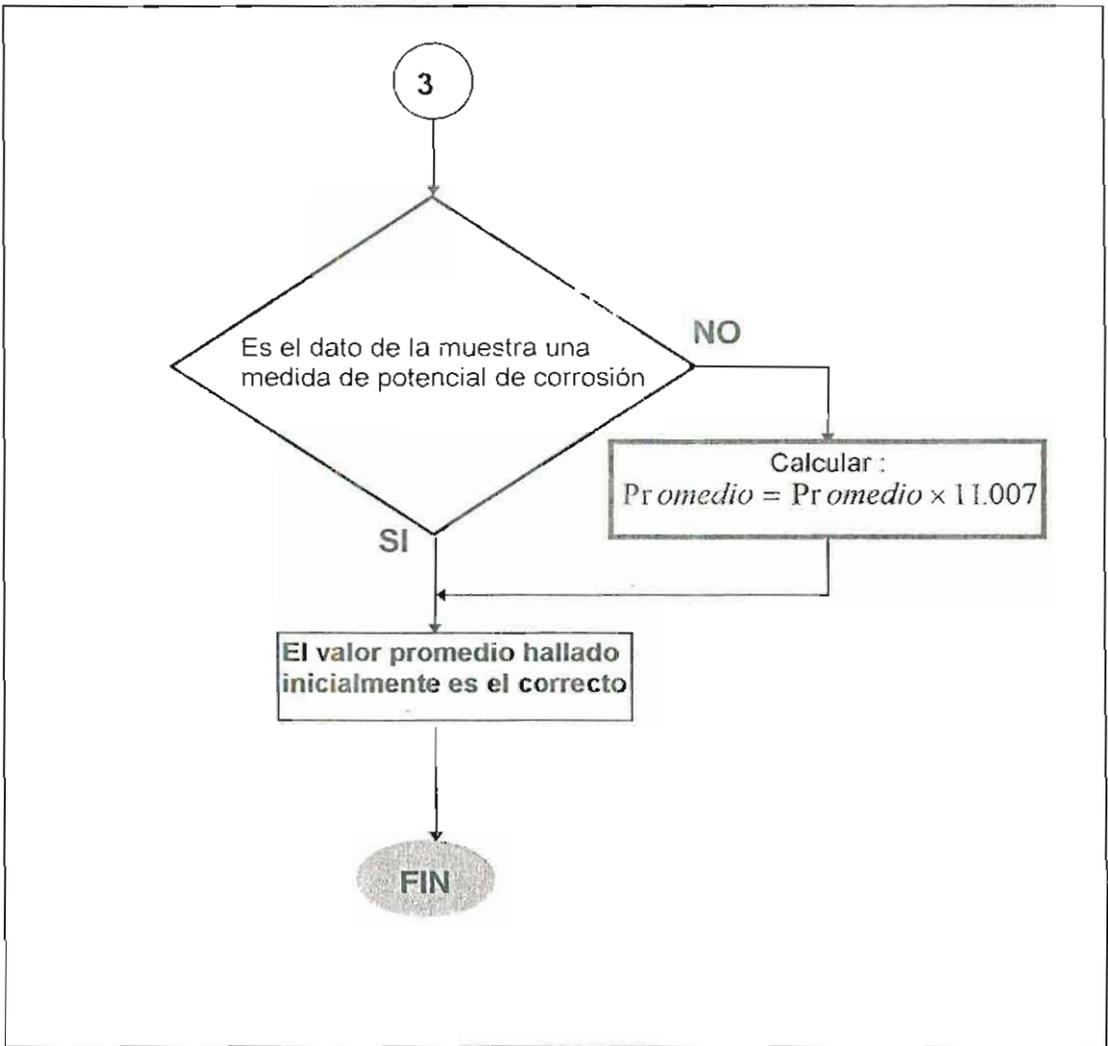


Figura 2.32

CONTINUACIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DE LA FIGURA 2.31

TABLA # 39

CORRIENTE DE LA MACROCELDA - HORMIGON  $f_c=210 \text{ kg/cm}^2$

Tiempo (días)	$\Omega - I$	$\Omega - II$	$\Omega - III$	$\Omega - IV$	$\Omega - V$
15	0.44028	0	0	0.506322	0
30	15.222681	0	0	0.297189	0
45	19..8126	0	0	2.3510952	0
60	21.540699	3.85245	0	4.534884	0
75	27.880731	8.486397	0	7.066494	0
90	23.532966	8.486397	4.4028	10.269531	0
105	19.37232	7.858998	6.6042	12.019644	0
120	24.2154	7.15455	5.866731	12.1077	0
135	26.141625	6.82434	6.450102	12.43791	0
150	22.487301	5.129262	6.6042	13.2084	0
165	26.559891	3.85245	6.6042	15.74001	0
180	27.660591	3.75238	5.558535	17.06085	0
195	28.001808	3.74238	5.17329	20.946321	0

TABLA # 40

CORRIENTE DE LA MACROCELDA - HORMIGON  $f_c=280 \text{ kg/cm}^2$

Tiempo (días)	$\epsilon - I$	$\epsilon - II$	$\epsilon - III$	$\epsilon - IV$	$\epsilon - V$
15	0.33021	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0.11007	0
60	0.11007	0	0	0.44028	0.44028
75	0.11007	0	0	2.53161	4.07259
90	0	0	0	7.81497	15.29973
105	0	0	0	19.70253	18.16155
120	0.44028	0	0	19.26225	15.4098
135	2.31147	0	0	21.79386	13.86882
150	7.26462	0.77049	0.77049	17.83134	16.6480875
165	9.785223	0.22014	1.1007	22.12407	15.277716
180	10.027377	3.544254	0.44028	19.705	16.90000

TABLA # 41

CORRIENTE DE LA MACROCELDA - HORMIGON  $f_c=350 \text{ kg/cm}^2$ 

Tiempo (días)	$\alpha - I$	$\alpha - II$	$\alpha - III$	$\alpha - IV$	$\alpha - V$
15	0.781497	0	0.275175	0	0
30	0	0	0	0	0
45	0.7341669	0	0	0	0
60	5.228325	0	0	0	0
75	9.5265585	0	0.4722003	0	0
90	11.282175	0	0.44028	0	0
105	9.78324566	0	0.913581	0	0
120	10.324566	0	1.728099	0.363231	0
135	13.351491	0	1.728099	7.7049	0
150	13.945869	0	1.1007	12.1077	0
165	12.1077	0	0.62893998	11.370231	0
180	14.793408	0	0.473301	12.54798	0
195	15.717996	0	0.3136995	13.0571	0

A los 195 días con el valor obtenido de las *Corrientes de la Macroelda* ,  $i_{mac}$  ( $\mu A$ ) de todos los discos y tipos de mezclas se las dividió para el área "superficies desnuda" ( ver **figura 2.33** ) o no pintada por material epóxico,  $A_s$  ( $cm^2$ ) de la varilla anódica obteniendo como resultado la **Corriente de corrosión** ,  $i_{corr}$  ( $\mu A/cm^2$  ), como se indica en la **ecuación No. 11**

$$i_{corr} = \frac{i_{mac}}{A_s} \quad (\text{Ec. 11})$$

donde :  $i_{corr}$  : corriente de corrosión ( $\mu A/cm^2$ )

$i_{mac}$  : corriente de la macroelda ( $\mu A$ )

$A_s$  : Área de las superficie sin pintar ( $cm^2$ )

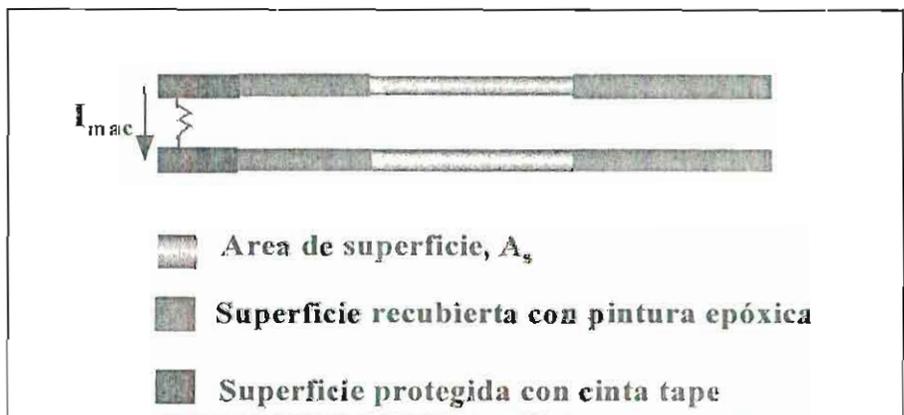


Figura 2.33

ESQUEMA DEL ÁREA DE SUPERFICIE DE LAS VARILLAS

Otra medición que indica en la norma ASTM G-109 es el cálculo de la **Corriente Total Integral o Corriente Total de Corrosión** la cual es una corriente de la macrocelda acumulada en función del tiempo en el que se desarrollo la tesis, los cálculos obtenidos reflejan la corrosión total en este ensayo y matemáticamente es expresada por la siguiente ecuación:

$$TC_j = TC_{j-1} + [(t_j - t_{j-1}) \times (i_j + i_{j-1}) / 2] \quad (\text{Ec. 12})$$

donde :

TC = Corrosión total ( Coulombios )

$t_j$  = tiempo (segundos) transcurrido cuando se tomo la lectura de la corriente de la macrocelda

$i_j$  = Corriente de la macrocelda (  $\mu\text{A}$  ) al tiempo  $t_j$

En las **Tablas # 42 , 43 y 44** se muestran los datos de la Corriente Integrales totales y las Corrientes de la macrocelda en el período de 195 días.

TABLA # 42

CORRIENTE TOTAL DE CORROSIÓN - HORMIGÓN  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ 

Días	$\Omega - I$		$\Omega - II$		$\Omega - III$		$\Omega - IV$		$\Omega - V$	
	$i_{mac}$	CTC	$i_{mac}$	CTC	$i_{mac}$	CTC	$i_{mac}$	CTC	$i_{mac}$	CTC
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.44028	0.2853	0	0	0	0	0.5063	0.3281	0	0
30	15.2227	10.435	0	0	0	0	0.29718	0.8487	0	0
45	19.8126	33.138	0	0	0	0	0.22014	1.1839	0	0
60	21.5407	59.935	3.8525	2.4964	0	0	0	1.3265	0	0
75	27.8807	91.960	8.4864	10.492	0	0	7.06649	5.9056	0	0
90	23.5329	125.28	8.4864	21.490	4.4028	2.8530	10.2695	17.139	0	0
105	19.3723	153.08	7.859	32.082	6.6042	9.9855	12.0196	31.583	0	0
120	24.2154	181.32	7.1546	41.811	5.8667	18.067	12.1077	47.217	0	0
135	26.1416	213.95	6.8243	50.876	6.4501	26.048	11.3372	62.410	0	0
150	22.4873	245.47	5.1293	58.628	6.6042	34.507	12.3278	77.744	0	0
165	26.5599	277.25	3.8525	64.448	6.6042	43.066	16.3784	96.346	0	0
180	27.6606	312.38	3.7424	69.370	5.5585	50.948	17.0609	118.02	0	0
195	28.0018	348.45	3.7424	74.220	5.1733	57.902	20.9463	142.64	0	0

TABLA # 43

CORRIENTE TOTAL DE CORROSIÓN - HORMIGÓN  $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$ 

Días	ε - I		ε - II		ε - III		ε - IV		ε - V	
	$i_{mac}$	CTC								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.33021	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0.214	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0.214	0	0	0	0	0.1101	0.0713	0	0
60	0.11007	0.2853	0	0	0	0	0.4403	0.428	0.4403	0.2853
75	0.11007	0.428	0	0	0	0	2.5316	2.3537	4.0726	3.2096
90	0	0.4993	0	0	0	0	7.815	9.0583	15.300	15.763
105	0	0.4993	0	0	0	0	19.703	26.89	18.162	37.446
120	0.44028	0.7846	0	0	0	0	19.262	52.139	15.410	59.200
135	2.31147	2.5677	0	0	0	0	21.794	78.743	13.869	78.173
150	7.26462	8.773	0.22014	0.1427	0.77049	0.4993	17.831	104.42	16.648	97.948
165	9.785223	19.821	0.22014	0.428	1.1007	1.7118	22.124	130.31	15.278	118.65
180	10.02738	32.66	3.54425	2.8673	0.44028	2.7104	19.705	157.42	16.900	139.49

TABLA # 44

CORRIENTE TOTAL DE CORROSIÓN - HORMIGÓN  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ 

Días	$\alpha - I$		$\alpha - II$		$\alpha - III$		$\alpha - IV$		$\alpha - V$	
	$i_{mac}$	CTC	$i_{mac}$	CTC	$i_{mac}$	CTC	$i_{mac}$	CTC	$i_{mac}$	CTC
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0.7815	0	0	0	0.27518	0	0	0	0	0
30	0	0.5064	0	0	0	0.17831	0	0	0	0
45	0.73417	0.9822	0	0	0	0.17831	0	0	0	0
60	5.22833	4.8458	0	0	0	0.17831	0	0	0	0
75	9.52656	14.407	0	0	0.4722	0.4843	0	0	0	0
90	11.2822	27.891	0	0	0.44028	1.07559	0	0	0	0
105	9.78302	41.541	0	0	0.91358	1.95289	0	0	0	0
120	10.3246	54.571	0	0	1.7281	3.6647	0.36323	0.23537	0	0
135	13.3515	69.913	0	0	1.7281	5.90431	7.7049	5.46352	0	0
150	13.9459	87.602	0	0	1.1007	7.73738	12.1077	18.3021	0	0
165	12.1077	104.48	0	0	0.62894	8.85818	11.3702	33.5158	0	0
180	14.7934	121.92	0	0	0.4733	9.57243	12.548	49.0148	0	0
195	15.718	141.69	0	0	0.3137	10.0824	13.0571	65.6069	0	0

La Densidad de corriente o corriente de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ) en  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  se la puede transformar a  $\mu\text{m}/\text{año}$  que son las unidades de la **Velocidad de Corrosión** ( $r$ ), esto nos indica la cantidad de material que se esta convirtiendo en corrosión, mediante la ecuación de Faraday como se indica a continuación:

$$i_{\text{corr}} = \frac{i_{\text{corr}} a}{n F} \quad (\text{Ec. 13})$$

donde :

$i_{\text{corr}}$  : corriente de corrosión calculada en la **ec.11** a

los 195 días

A : peso atómico del acero de la varilla

n : número atómico del acero de la varilla

F: Constante de Faraday igual a 96.500

Coulombios

Realizando los cálculos para la **ec. 13**  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  es igual a  $11.6 \mu\text{m}/\text{año}$ . Este dato se utilizo para calcular la velocidad de corrosión de la varilla anódica a los 195 días de iniciado el test.

Con los datos de la corriente de corrosión y de la corriente integral de corrosión se pueden hallar la eficiencia de inhibición y la reducción de la corrosión respectivamente.

La **eficiencia de inhibición** es la capacidad de inhibición del acero de un tipo de mezcla con adiciones comparado la mezcla de control de un mismo diseño, que está determinado por la siguiente ecuación:

$$IE = \frac{i_{\text{corr}}^a - i_{\text{corr}}^o}{i_{\text{corr}}^a} \quad (\text{ec. 14})$$

donde:

$i_{\text{corr}}^a$  : corriente de corrosión de la mezcla control calculada por la **ec. 11** a los 195 días

$i_{\text{corr}}^o$  : corriente de corrosión de las mezclas que contienen inclusive de aire, inhibidor A e inhibidor B calculadas por la **ec. 11** a los 195 días

La Reducción de la disminución de los Coulombios (  $6.2 \times 10^{18}$  electrones ) entregado por las varillas anódicas a las catódicas

de los diferentes tipos de mezclas comparados con el de control se denomina **Reducción de Corrosión** se los determina por la siguiente ecuación:

$$RC = \frac{TC^a - TC_0}{TC^a} \quad (\text{ec. 15})$$

donde :

$TC^a$  : Corrosión Total de la mezcla control a los 195 días calculada por la **ec. 12**

$TC^0$  : Corrosión Total de las mezclas que contienen inductores de aire inhibidor A e inhibidor B a los 195 días calculadas por la **ec. 12**

Los datos de las corrientes de corrosión, velocidad de corrosión, eficiencia de inhibición, corriente integral de corrosión o corrosión total y reducción de la corrosión total a los 195 días para todos los diseños y mezclas se encuentra tabulados en las Tablas # 45 , # 46 y # 47 .

A los 195 días se rompieron algunas vigas las cuales fueron fotografiadas como se muestran en las **figuras 2.34, 2.35, 2.36 y 2.37.**

TABLA # 45

**MEDICIONES A LOS 195 DÍAS DE INICIADA LA PRUEBA  
HORMIGON F<sub>c</sub>=210 kg/cm<sup>2</sup>**

	Ω - I	Ω - II	Ω - III	Ω - IV	Ω - V
Corriente de corrosión, $i_{corr}$ (μA/cm <sup>2</sup> )	0.557	0.075	0.103	0.417	0.0
Velocidad de corrosión, $I_{corr}$ (μmpy)	6.462	0.8636	1.1939	4.844	0.0
Eficiencia de inhibición, IE, %	-----	86.64	81.53	25.20	100.00
Corriente integral de corrosión, CTC, (Coulombs)	348.45	74.22	57.91	142.64	0.0
Reducción de la corrosión total, RC, %	-----	78.70	83.38	59.06	100.00

TABLA # 46

**MEDICIONES A LOS 195 DÍAS DE REALIZADA LA PRUEBA**

**HORMIGON  $f_c=280 \text{ kg/cm}^2$**

	$\epsilon - I$	$\epsilon - II$	$\epsilon - III$	$\epsilon - IV$	$\epsilon - V$
Corriente de corrosión, $i_{corr}$ , ( $\mu\text{A/cm}^2$ )	0.199	0.071	0.009	0.392	0.336
Velocidad de corrosión, $I_{corr}$ , ( $\mu\text{mpy}$ )	0.092	0.032	0.004	0.180	0.155
Eficiencia de inhibición, IE, %	-----	65.22	95.65	95.65	68.48
Corriente integral de corrosión, CTC, (Coulombs)	32.660	2.867	0.440	157.42	139.49
Reducción de la corrosión total, RC, %	-----	91.22	98.65	98.65	327.10

**NOTA:** las mezclas que se encuentran sombreadas de rojo tuvieron un error en la dosificación del cemento

TABLA # 47

**MEDICIONES A LOS 195 DÍAS DE REALIZADA LA PRUEBA  
HORMIGON  $f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$**

	$\alpha - I$	$\alpha - II$	$\alpha - III$	$\alpha - IV$	$\alpha - V$
Corriente de corrosión, $i_{\text{corr}}$ , ( $\mu\text{A/cm}^2$ )	0.313	0	0.006	0.333	0
Velocidad de corrosión, $I_{\text{corr}}$ , ( $\mu\text{mpy}$ )	3.63	0	0.072	3.013	0
Eficiencia de inhibición, IE, %	-----	100.00	98.00	16.93	100.00
Corriente integral de corrosión, CTC, (Coulombs)	141.690	0	10.082	65.607	0
Reducción de la corrosión total, RC, %	-----	100.00	92.88	53.65	100.00

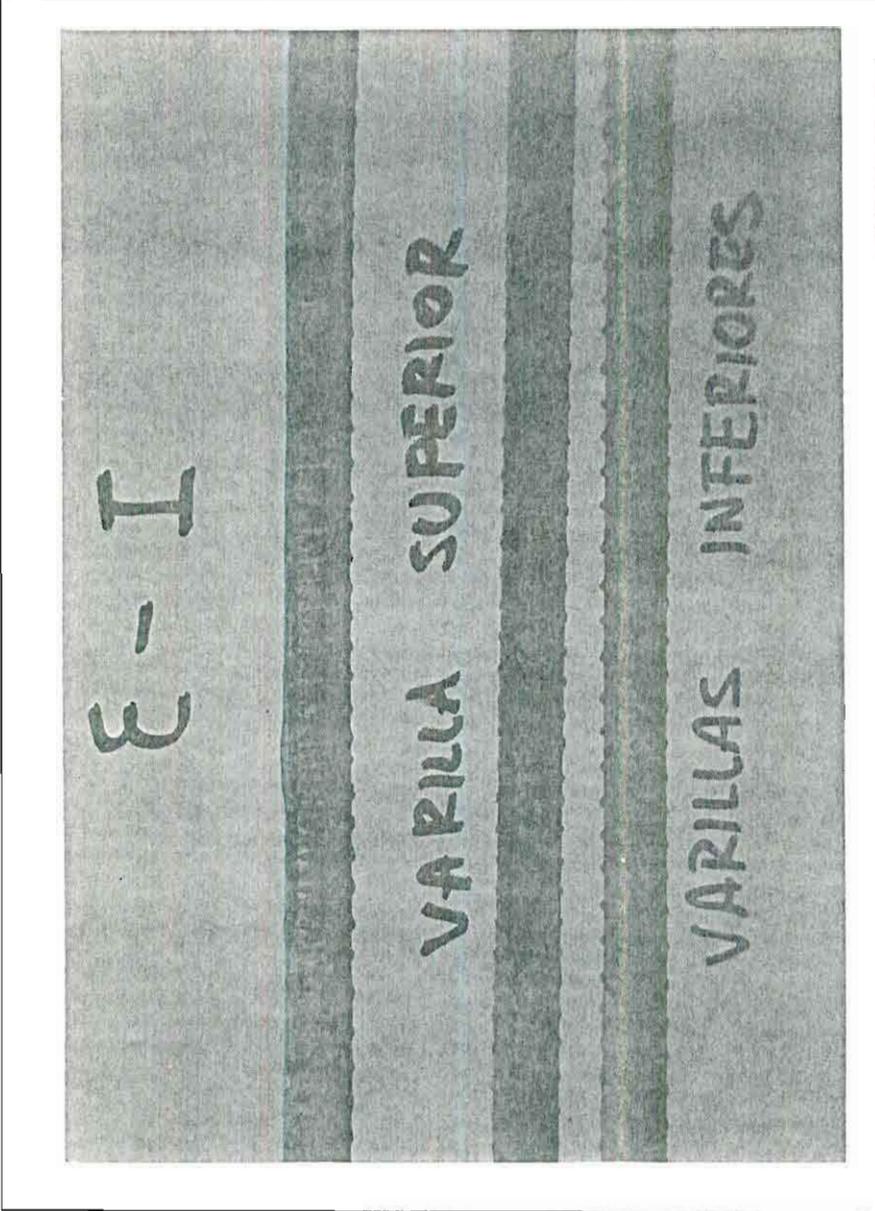


Figura 2.34

VARILLAS DE LAS UNA DE LAS VIGA DE TIPO DE MEZCLA E - I

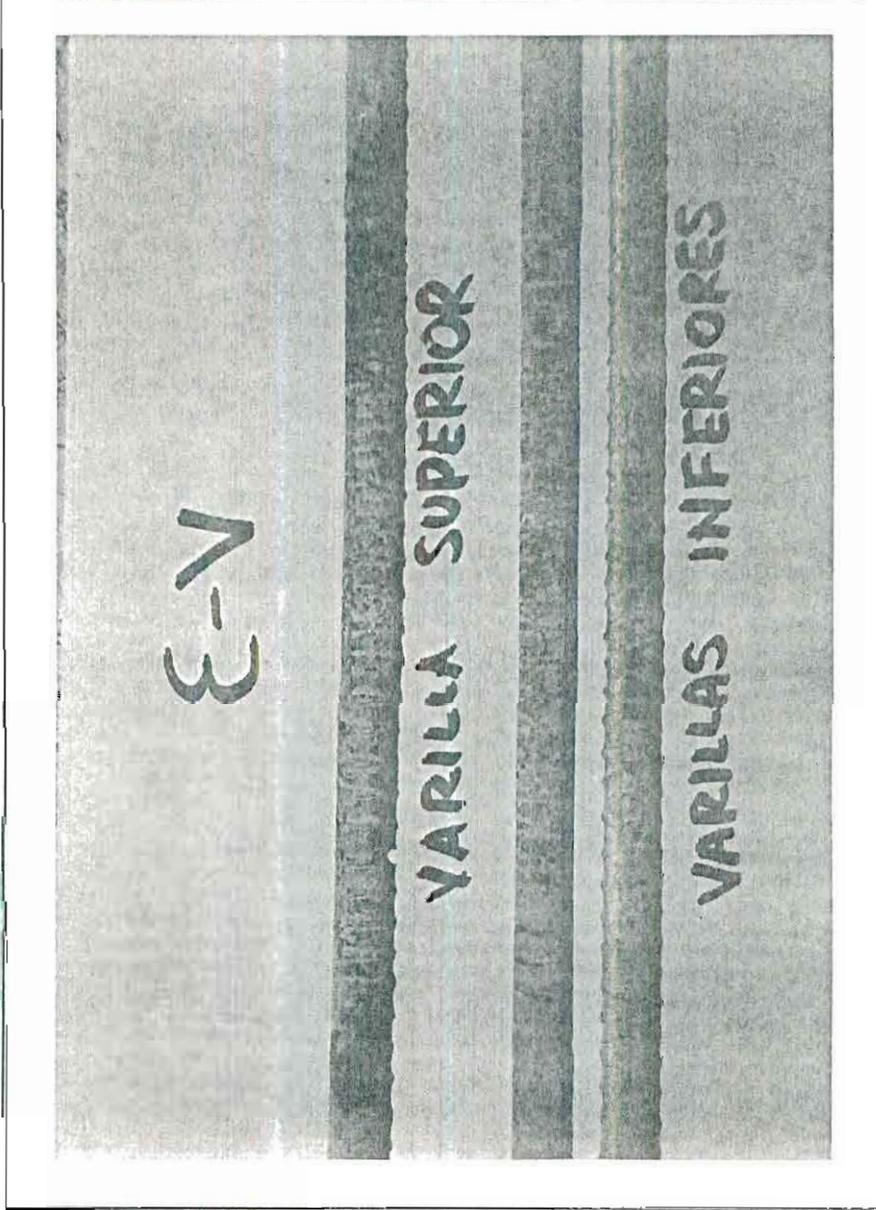


Figura 2.35

VARILLAS DE LAS UNA DE LAS VIGA DE TIPO DE MEZCLA E - V

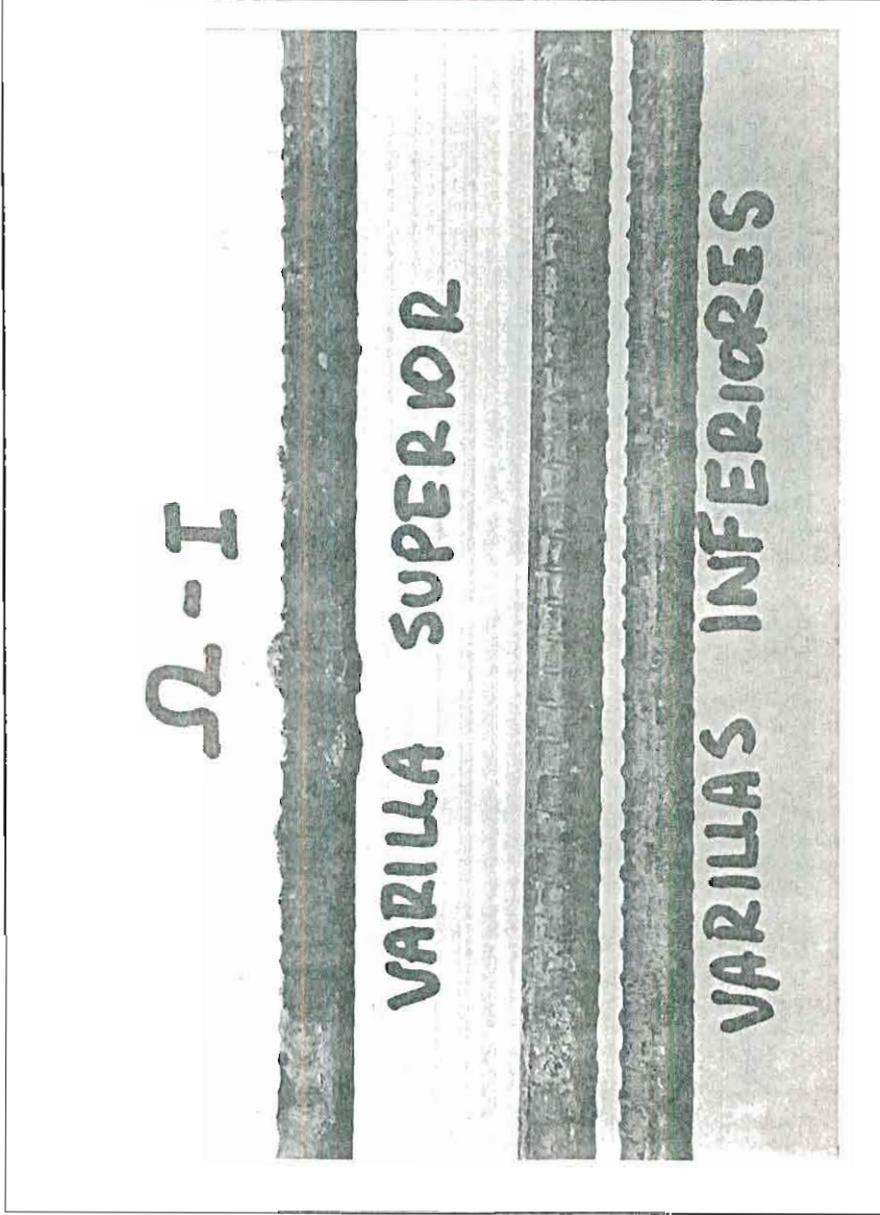


Figura 2.36

VARILLAS DE LAS UNA DE LAS VIGAS DE TIPO DE MEZCLA  $\Omega - I$



Figura 2.37

CORROSIÓN DE VARILLA ANÓDICA DE LA VIGA DE LA FIGURA 2.36

Luego de los 195 días de iniciado el test se cambiaron las resistencias de 100 ohm a 10 ohm para aumentar la corriente de la macrocelda, se dejó secar las vigas por un espacio de 25 días y luego se llenaron los reservorios sobre las vigas con la solución al 15% de CINA por 40 días.

La Corriente de la macrocelda, corrientes de corrosión, velocidad de corrosión y eficiencia de inhibición al final ( 260 días ) se encuentra tabladados en las **tablas # 48 , # 49 y # 50**.

TABLA # 48

MEDICIONES A LOS 260 DÍAS EN AMBIENTES DE CLORUROS

HORMIGON  $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$

	Tipo de Mezcla				
	$\Omega - I$	$\Omega - II$	$\Omega - III$	$\Omega - IV$	$\Omega - V$
Corriente de la Macrocela, $i_{mac}$ ( $\mu A$ )	30.571	8.96	9.73	25.09	1.47
Corriente de corrosión, $i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	0.61	0.18	0.19	0.50	0.03
Velocidad de corrosión, $I_{corr}$ ( $\mu mpy$ )	7.076	2.073	2.166	5.8	0.348
Eficiencia de inhibición (IE) %	-----	70.70	69.39	18.03	95.08

NOTA : Luego de tomada la última medición a los 195 días se cambio la resistencia de 100 ohm a 10 ohm , se dejo sin agua aproximadamente 25 días y se llenaron los con la solución al 15% de ClNa por un espacio aproximado de 40 días.

TABLA # 49

MEDICIONES A LOS 260 DÍAS EN AMBIENTES DE CLORUROS

HORMIGON  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$

	Tipo de Mezcla				
	$\epsilon - I$	$\epsilon - II$	$\epsilon - III$	$\epsilon - IV$	$\epsilon - V$
Corriente de la Macrocela, $i_{mac}$ ( $\mu A$ )	13.44	3.62	0	18	15.71
Corriente de corrosión, $i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	0.267	0.072	0	0.358	0.315
Velocidad de corrosión, $I_{corr}$ ( $\mu mpy$ )	3.097	0.835	0	4.151	3.654
Eficiencia de inhibición (IE) %	-----	73.04	100	34.03	17.99

Nota : Luego de tomada la última medición a los 195 días se cambió la resistencia de 100 ohm a 10 ohm , se dejó sin agua aproximadamente 35 días y se llenaron los con la solución al 15% de ClNa y se las tapó por un espacio aproximado de 30 días. Mezcla sombreadas error en la cantidad de cemento

TABLA # 50

**MEDICIONES A LOS 260 DÍAS EN AMBIENTES DE CLORUROS  
HORMIGÓN  $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$**

	Tipo de Mezcla				
	$\alpha - I$	$\alpha - II$	$\alpha - III$	$\alpha - IV$	$\alpha - V$
Corriente de la Macrocela, $i_{mac}$ ( $\mu A$ )	11.98	0	0	10.18	0
Corriente de corrosión, $i_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	0.238	0	0	0.2027	0
Velocidad de corrosión, $I_{corr}$ ( $\mu mpy$ )	2.761	0	0	2.351	0
Eficiencia de inhibición (IE) %	-----	100	100	14.5	100

**Nota :** Luego de tomada la última medición a los 195 días se cambió la resistencia de 100 ohm a 10 ohm , se dejó sin agua aproximadamente 35 días y se llenaron los con la solución al 15% de ClNa y se las tapó por un espacio aproximado de 30 días.

## 2.5 ENSAYOS FISICO-QUIMICOS

Estos ensayos se realizaron al final del test para determinar para motivo de la incongruencia en los datos de las  $i_{corr}$  obtenidos en la vigas  $\epsilon$ -I, y  $\epsilon$ -V con respecto al resto de vigas de este diseño y de los otros diseños. Las pruebas a realizarse son algunas de las que se utilizan para determinar las causas por las cuales una estructura presenta corrosión en el acero de refuerzo, estas pruebas fisico-químicas son las siguientes:

- Porosidad
- Contenido de cloruros

### 2.5.2 Porosidad

La prueba de porosidad es una método no destructivo que nos permitirá conocer el porcentaje de porosidad total. La prueba se realizará con una viga de las mezclas  $\epsilon$ -I, y  $\epsilon$ -V

En la prueba un pedazo cortado de las vigas  $\epsilon$ -I, y  $\epsilon$ -V ( ver figura 2.38 ) se las se las deseca en una estufa a 105°C por 24 horas ( ver figura 2.39 ), luego se apaga el

horno y cuando la temperatura en aproximadamente 30 a 40 °C - aproximadamente 12 horas dentro del horno - se las pesa (  $P_{seco}$  ), a continuación se las sumerge en unas tinas con agua, luego se las hierva por dos horas mínimo , se las deja enfriar por unas 12 horas y luego se las seca con un paño absorbente en la superficie y se las pesa (  $P_{sat}$  ). A continuación se vuelve a introducir en la misma agua y se la pesa nuevamente suspendiendo la viga suspendiendo la muestra directamente en la balanza sin extraer la de la tina con agua (  $P_{sumerg}$  ) como se observa en la figura 2.40.

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

$$\text{Porosidad (\%)} = \frac{P_{sat} - P_{seco}}{P_{sat} - P_{sumerg}} \quad (\text{Ec. 18})$$

donde :  $P_{sat}$  = peso de la viga saturada

$P_{seco}$  = peso de la probeta seca

$P_{sumerg}$  = peso de la probeta saturada y sumergida en agua.

**TABLA # 51**  
**CRITERIOS DE VALORIZACIÓN DE POROSIDAD**

Porosidad, %	Indicativo
$P < 10 \%$	Hormigón de buena calidad y compacto
$10\% < P < 15\%$	Hormigón bueno pero permeable y no adecuado para ambientes agresivos
$P > 15\%$	Hormigón muy permeable e inadecuado para proteger a la armadura a largo plazo

**TABLA # 52**  
**PESOS Y PORCENTAJES DE POROSIDAD**

Muestra	$P_{\text{seco}}$	$P_{\text{sat}}$	$P_{\text{sumerg.}}$	Porosidad, %
$\epsilon - I$	301.1	321.62	171.9	13.7
$\epsilon - V$	437.5	485.5	245.90	20.0

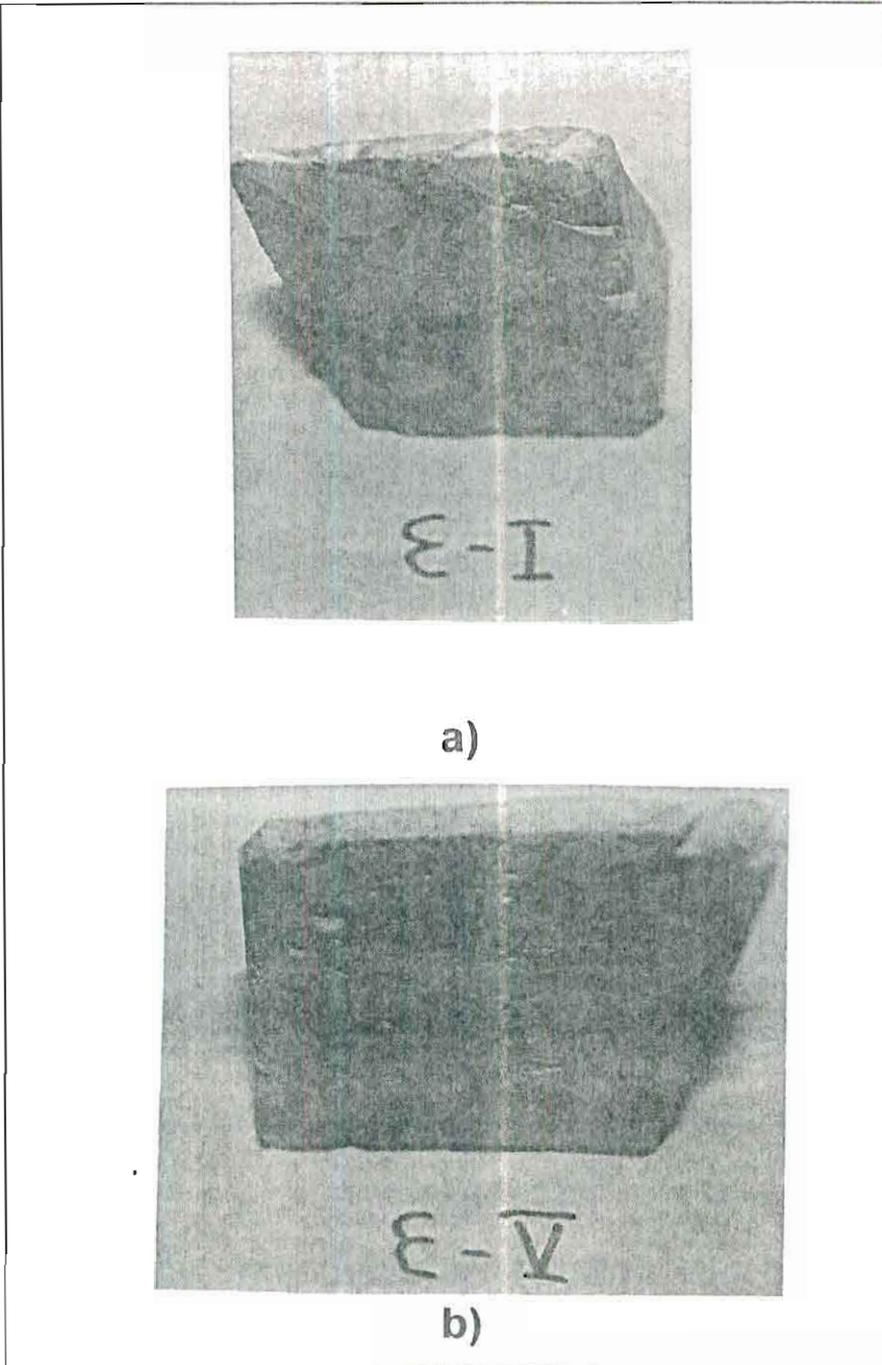


Figura 2.38

A) MUESTRA DEL PEDAZO DE UNA VIGA  $\varepsilon - I$

B) MUESTRA DEL PEDAZO DE UNA VIGA  $\varepsilon - V$

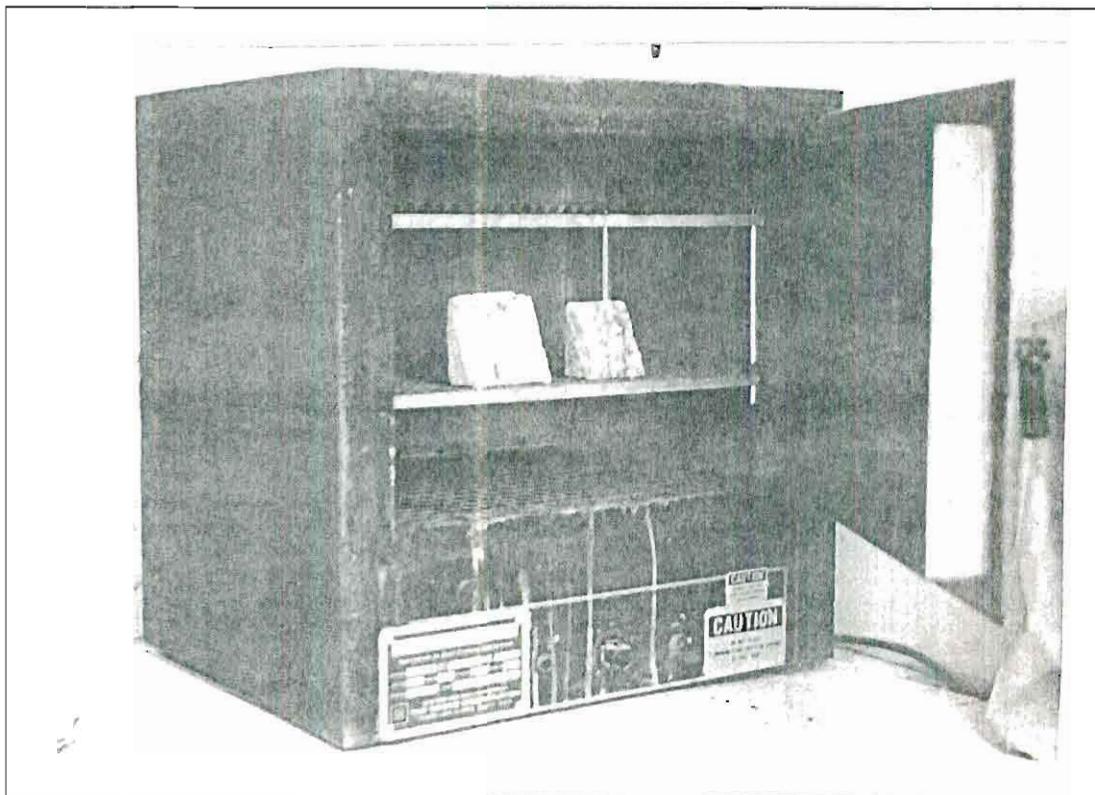
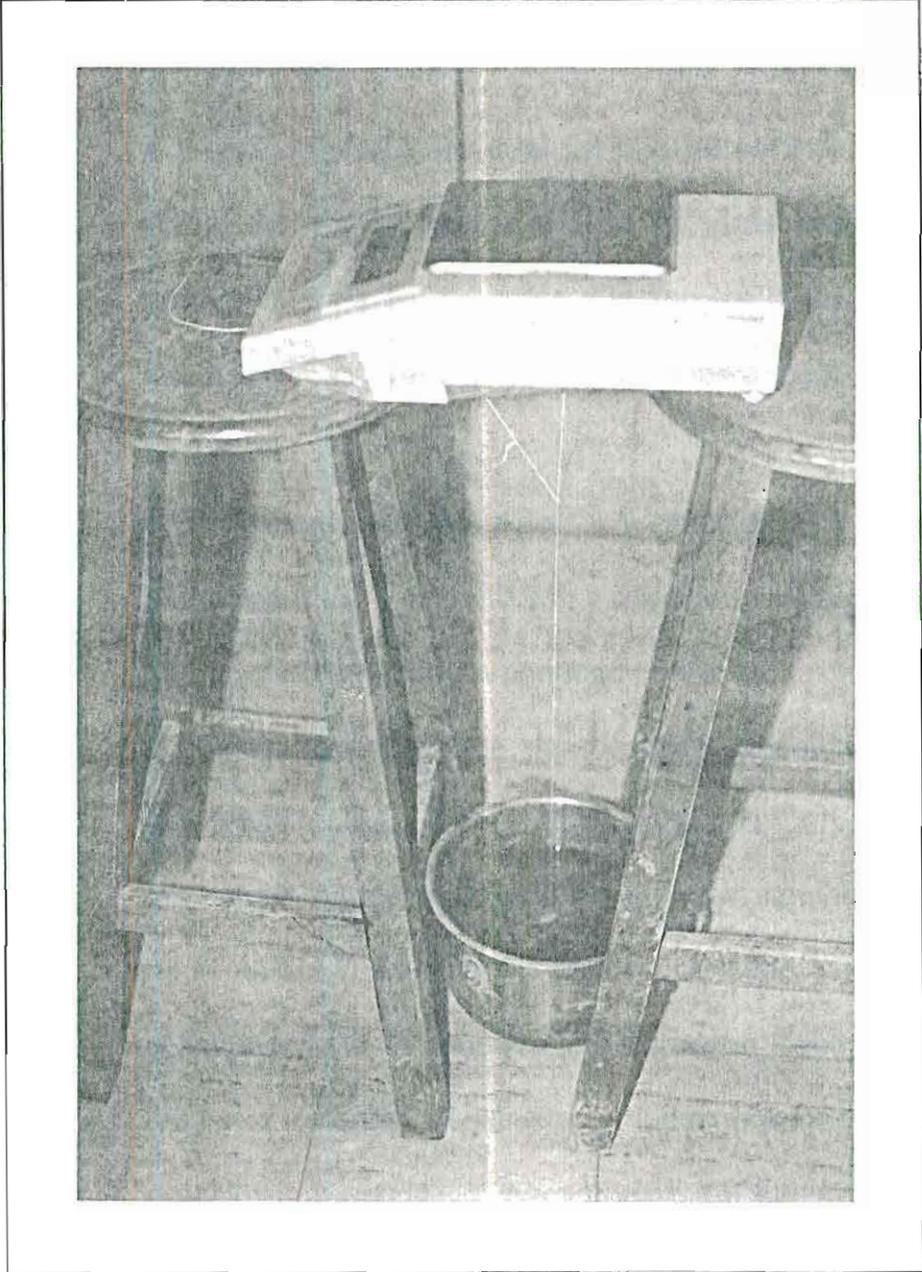


Figura 2.39

PEDAZOS INTRODUCIDOS EN HORNO PARA DESECARSE



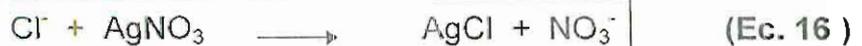
**Figura 2.40**

**PESO SUMERGIDO DE LA MUESTRAS**

### 2.5.2 Contenido de cloruros

Esta prueba determinará el contenido de cloruros libres o solubles presente en el hormigón. Esta prueba se basará en el método de Mohr el cual permite determinar los cloruros libres, así los cloruros en forma de iones presentes en el agua contenida en los poros que son los iones que pueden ser agresivos y producir corrosión en las armaduras.

Las muestras de hormigón se obtuvieron taladrando la superficie a los 1 cm., 2.0 cm. y a los 7 cm. Bajo la superficie que ha permanecido en contacto con la solución salina, vale la pena recordar que las varillas anódicas tiene un recubrimiento de 2.5 cm. Estas muestras fueron llevadas al laboratorio donde se realizo las pruebas siguiendo la norma de la ASTM D 1411, este método consiste en disolver en agua destilada la muestra de hormigón seco, agitar esta solución, calentarla , filtrarla y luego agregar Cromato de potasio (  $K_2 CrO_4$  ) para tornar la solución de color amarillenta actuando como un indicador; a continuación de agrega Nitrato de Plata ( $AgNO_3$  , 0.014N) :



Inicialmente se puede apreciar que el color de la solución se torna amarillo-blanquinoso, esto se debe a la reacción entre el  $\text{AgNO}_3$  con todos los cloruros formando cloruro de plata ( $\text{AgCl}$ ), conforme los  $\text{AgCl}$  se vayan precipitando los iones cromatos reaccionan con la  $\text{Ag}$  del  $\text{AgNO}_3$  formando Cromato de plata  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$  al final la solución tiene una apariencia turbia de color blanco-amarillenta, lo que nos indica que es el final de la titulación, es decir:



Como criterio de valorización se tiene que un hormigón con una cantidad mayor 0.1% en la relación al peso del hormigón causará corrosión al acero.

**TABLA # 53**

**CONTENIDO DE CLORUROS**

Muestra	Profundidad ( cm. )	Contenido de Cloruro %
$\epsilon - I$	1	0.23
$\epsilon - IV$	1	0.96
$\Omega - V$	1	0.95
$\epsilon - V$	2	0.28
$\epsilon - V$	7	0.06

## CAPITULO III

### ANÁLISIS DEL ESTUDIO

#### 3.1 RESPECTO A LOS ENSAYOS ELECTROQUÍMICOS

##### A. Corriente de la Macroelda

En la **figura 3.1** para el hormigón  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  se observa que la corriente de la macroelda empieza a los 15 días y a los 75 días alcanza su nivel máximo de  $28 \mu\text{A}$  y al final del estudio se mantuvo en este valor. La mezcla conteniendo el inhibidor A empezó la corrosión a los 45 días llegando su máximo nivel cerca de  $8.5 \mu\text{A}$  ( la tercera parte comparada con la mezcla - control ) y baja paulatinamente hasta que a los 195 días llega la corriente a  $3.7 \mu\text{A}$  notándose el efecto del inhibidor. En la curva de las vigas tratadas con el inhibidor B, la corriente de las macroelda empezó a los 75 días llegando después a un valor máximo de  $6.4 \mu\text{A}$  manteniéndose este valor muy estable con el tiempo llegando al final del estudio a  $5 \mu\text{A}$

con el tiempo llegando al final del estudio a  $5 \mu\text{A}$  comprobándose los efectos inhibidores tanto para retrasar el inicio de la corrosión (su máximo nivel 5 veces más bajo que la mezcla de control) como para mantener un nivel estable inclusive con presencia de cloruros. En la mezcla conteniendo el inclusor de aire se retrasa la corrosión a 60 días pero la curva siempre tiende a subir llegando al final la corriente a su valor máximo de  $21 \mu\text{A}$ , es decir, si bien la corriente de la macrocelda se retrasa, una vez que esta empieza no se estabiliza ni disminuye. La mezcla conteniendo el inclusor de aire y el inhibidor A fue la óptima, definitivamente el inclusor de aire disminuye la absorción de humedad y cuando los cloruros llegan al acero ya existe una barrera molecular estable por las acción del inhibidor A que no permite corrosión alguna.

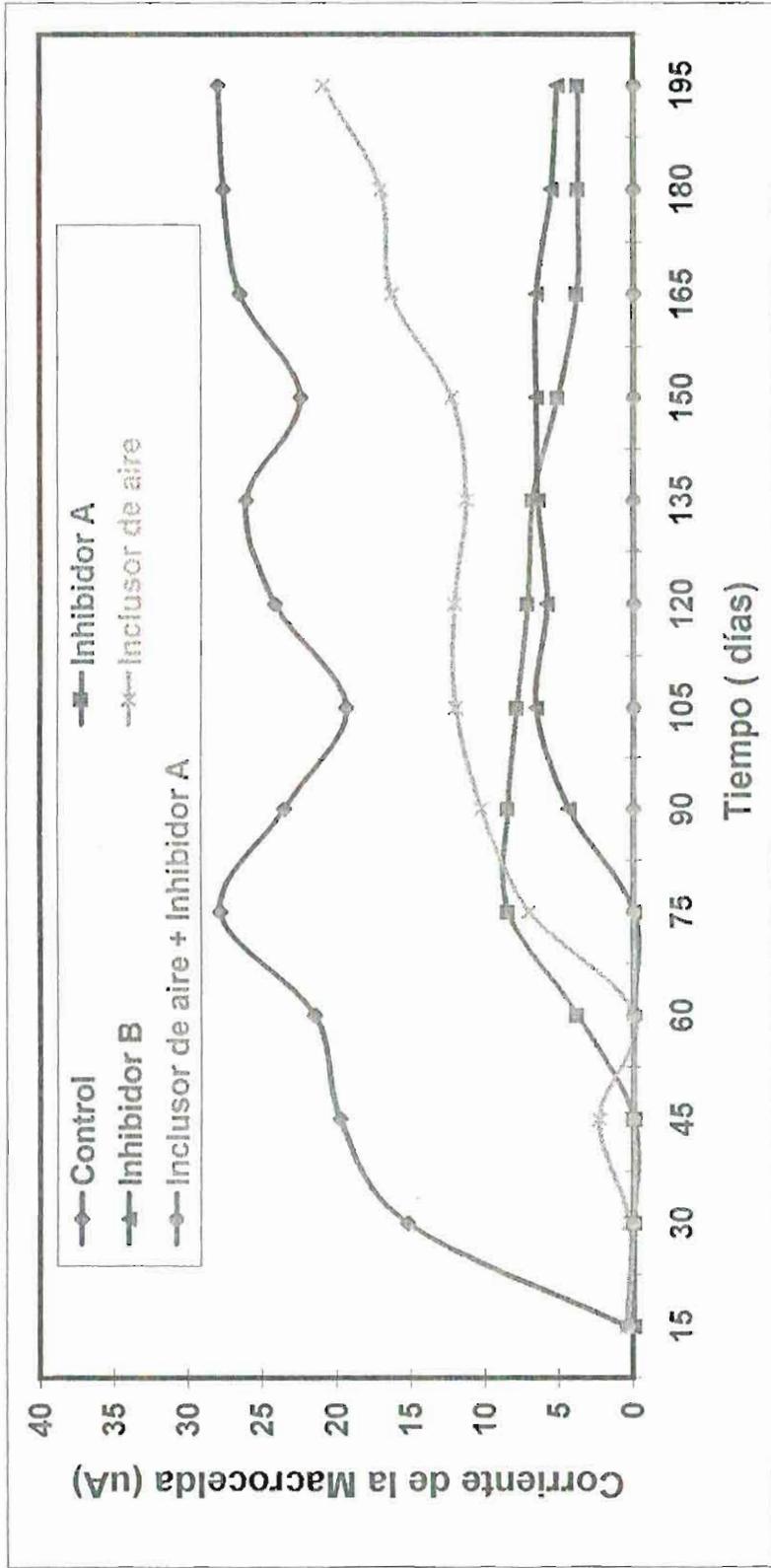
En la **figura 3.2** en el hormigón  $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$  la corrosión en la mezcla patrón se inicia a los 120 días, existe una deficiencia en el circuito eléctrico por lo que la macrocelda no funciona en esta mezcla, es de considerar que a los 105 días se realizó una limpieza del circuito y la curva recién despegó a los 120 días, es decir la corriente esta "desfasada" y que debió haber

inhibidor A y tratadas con el inhibidor B se obtuvieron valores al final de corrientes finales 3.5 y 0.44  $\mu\text{A}$  respectivamente. En la mezcla que contiene el inclusor de aire y el inhibidor A debido existe un error en la dosificación de cemento y las curvas de esta mezcla se aleja del resto de curvas de la corriente de la macrocelda de todas las vigas que contienen los inhibidores por esto esta curva esta fuera de análisis. La curva de la mezcla conteniendo el inclusor de aire llegó a un nivel máximo de 18  $\mu\text{A}$  y a los 195 días se llegó a 17  $\mu\text{A}$ , es decir mantuvo estable.

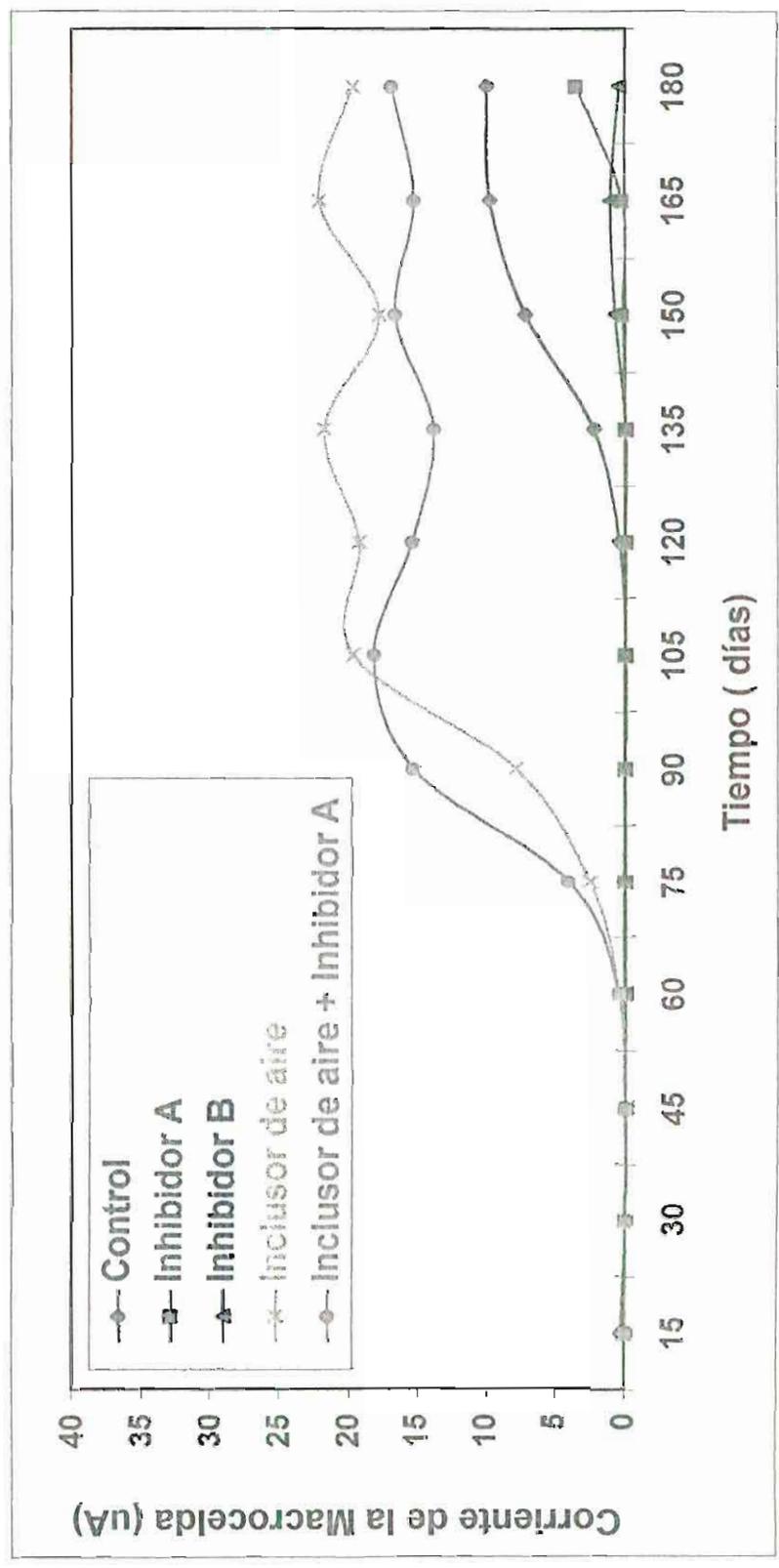
En la **figura 3.3** para el diseño  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$  se observa un inicio de la corriente de la macrocelda para la mezcla control a los 45 días aumentado esta corriente a 16  $\mu\text{A}$  que es el valor a los 195 días, siendo esta corriente casi la mitad de la corriente de la mezcla control del hormigón  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ . En la mezcla conteniendo el inhibidor A y la mezcla conteniendo el inhibidor A y el inclusor de aire la corriente es cero, la curva de la mezcla control tratada con el inhibidor B muestra una pequeña corriente inicial de 0.5  $\mu\text{A}$  que llega a un valor máximo de 2  $\mu\text{A}$  y que disminuye a los 150 días llegando al final a 0.3  $\mu\text{A}$  observándose la efectividad del inhibidor B.

La mezcla que contiene solo el inductor de aire tiene un comportamiento similar a las mezclas de en los otros diseños, es decir un al iniciarse la corrosión, ésta no se detiene, ni se estabiliza.

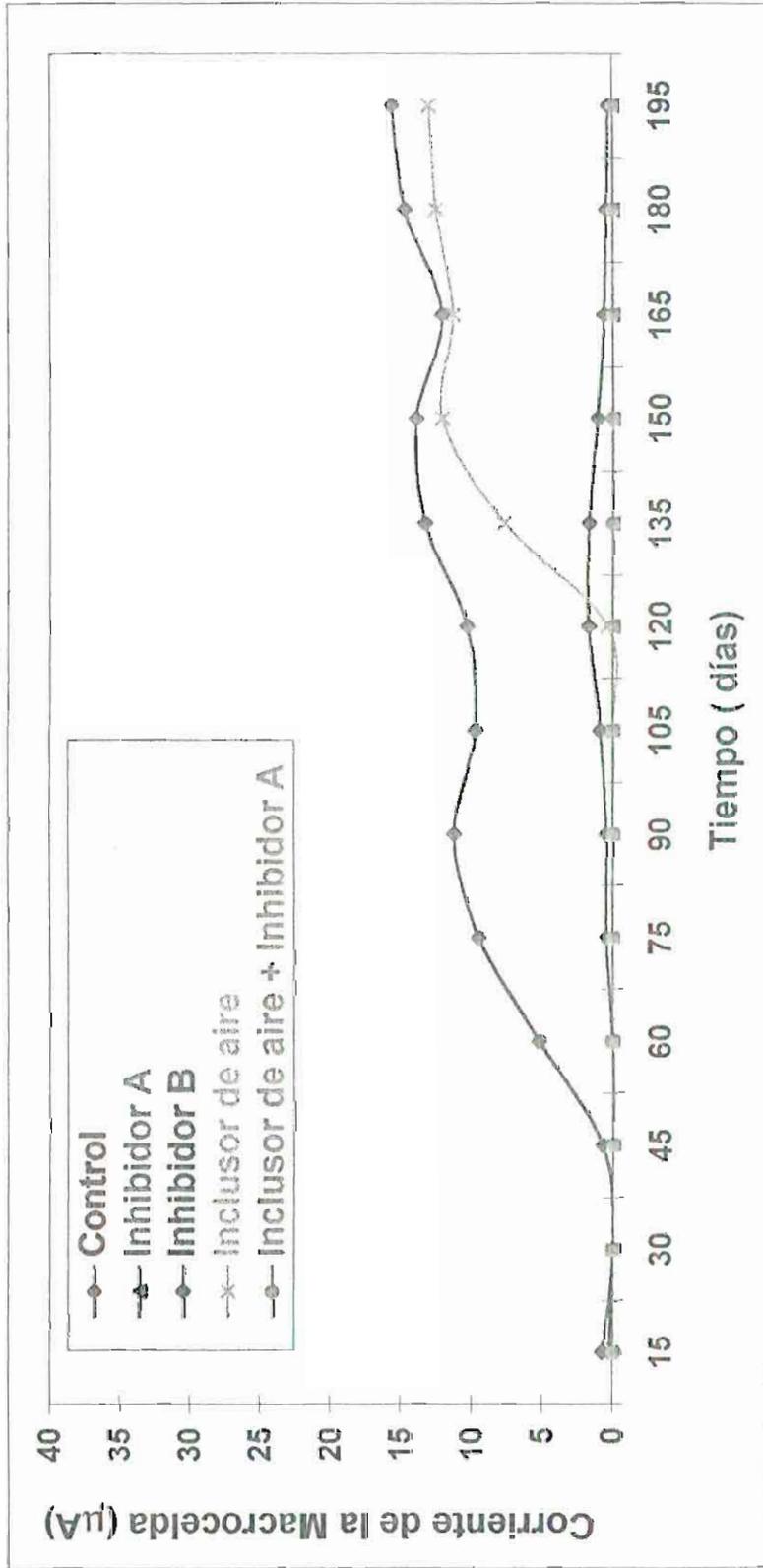
**FIGURA 3.1**  
**CORRIENTE DE LA MACROCELDA**  
**HORMIGON  $f_c=210 \text{ kg/cm}^2$**



**FIGURA 3.2**  
**CORRIENTE DE LA MACROCELDA**  
**HORMIGON  $f_c = 280 \text{ kg/cm}^2$**



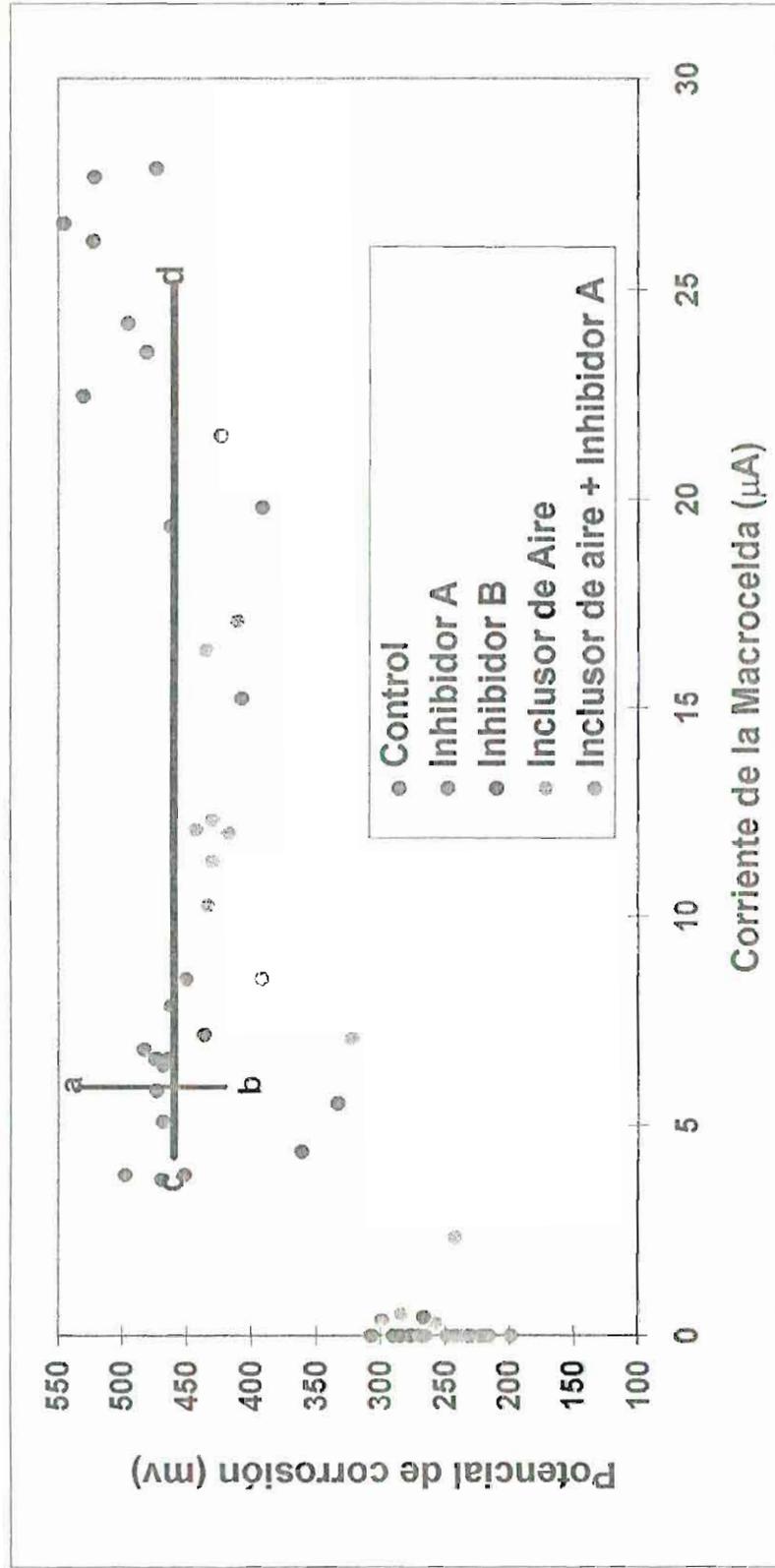
**FIGURA 3.3**  
**CORRIENTE DE LA MACROCELDA**  
**HORMIGÓN  $f_c = 350 \text{ kg/cm}^2$**



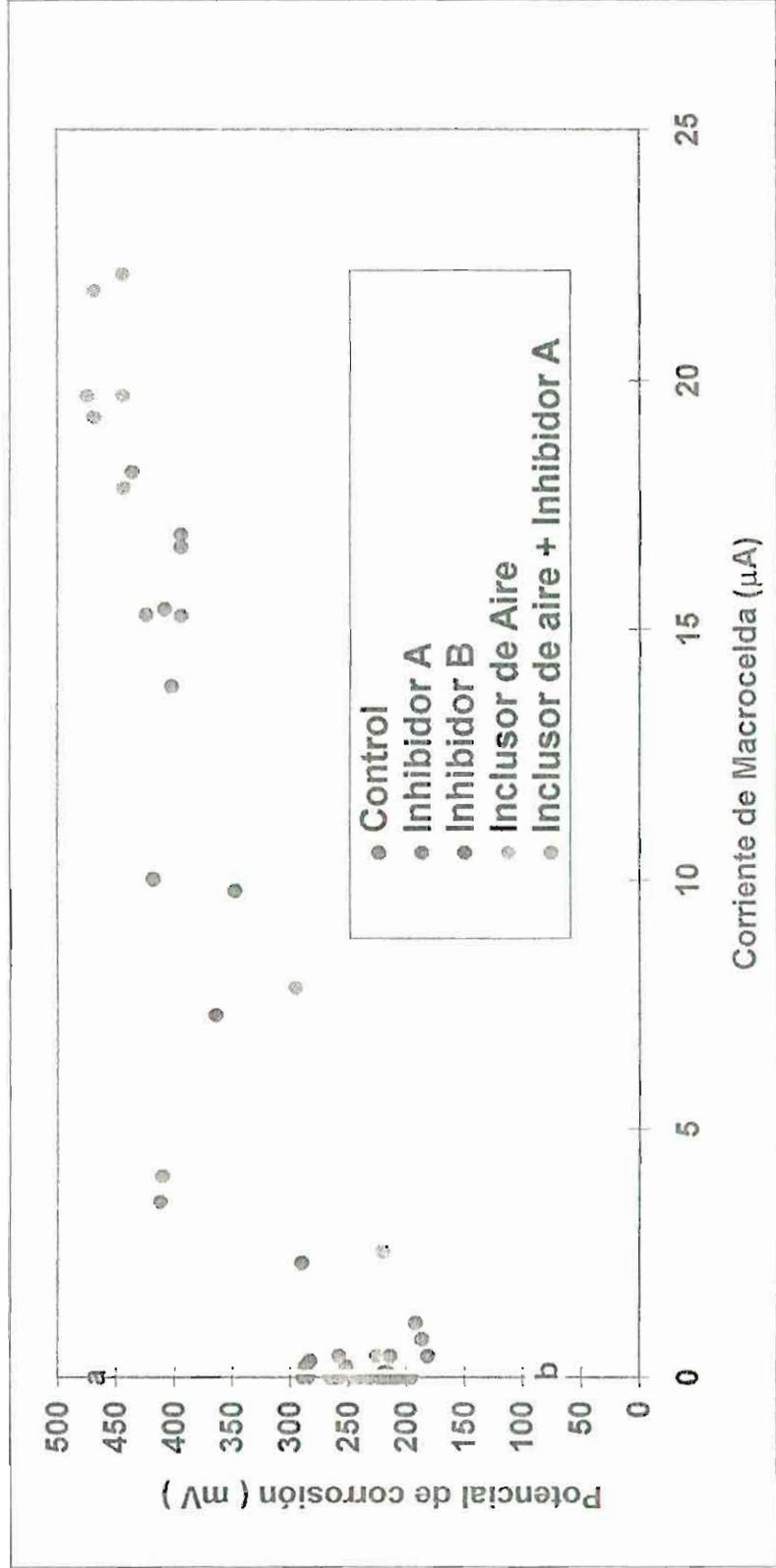
## B. Potenciales de corrosión

En las **figuras 3.4, 3.5 y 3.6** respecto a gráficas potenciales de corrosión vs. corriente de la macrocelda no se observan relación alguna entre ambas mediciones, en las líneas ab o cd se puede apreciar que para iguales valores de corriente existen diferentes potenciales de corrosión y viceversa. Algo que se puede indicar es que un hormigón con inclusores de aire, es decir con menor absorción de agua que un hormigón sin inductor de aire o con inhibidor A o B tiene potenciales de corrosión menores a iguales corrientes. Aunque es evidente que si existe una gran cantidad de puntos con corrientes nulas a potenciales entre 200 y 300 mV, mientras que con potenciales mayores a 300 mV la corrientes tienen un rango de variabilidad muy grande y no se puede determinar alguna correlación, comprobándose que este equipo solo indica una probabilidad de que existe corrosión y nada más, es decir no se puede especificar o concluir un estado o nivel de corrosión.

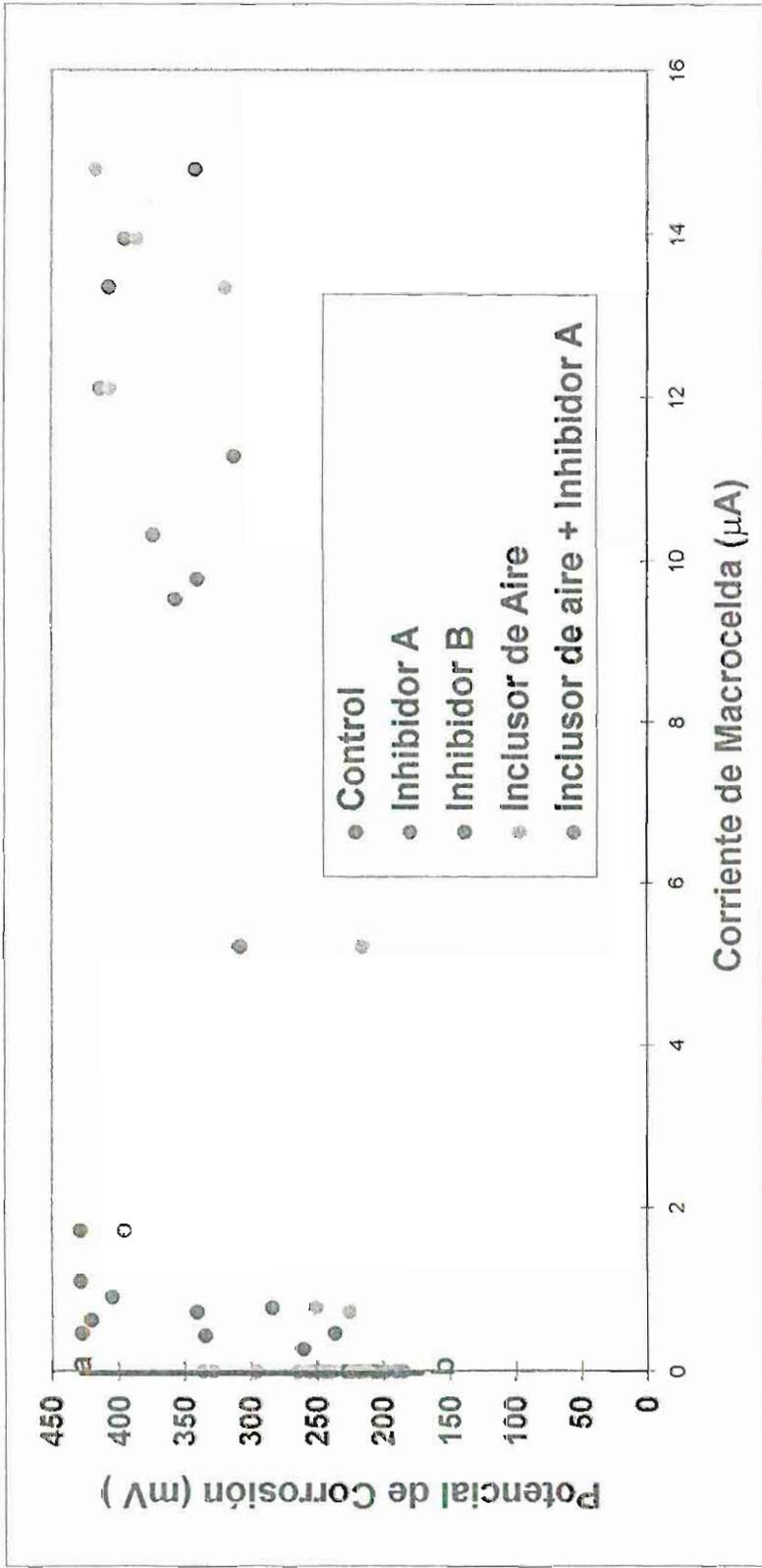
**FIGURA 3.4**  
**CORRIENTE DE LA MACROCELDA VS. POTENCIAL DE CORROSION**  
**HORMIGON  $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$**



**FIGURA 3.5**  
**CORRIENTE DE LA MACROCELDA VS. POTENCIAL DE CORROSION**  
**HORMIGON f<sub>c</sub> = 280 kg/cm<sup>2</sup>**



**FIGURA 3.6**  
**CORRIENTE DE LA MACROCELDA VS. POTENCIAL DE CORROSION**  
**HORMIGON  $f_c = 350 \text{ kg/cm}^2$**



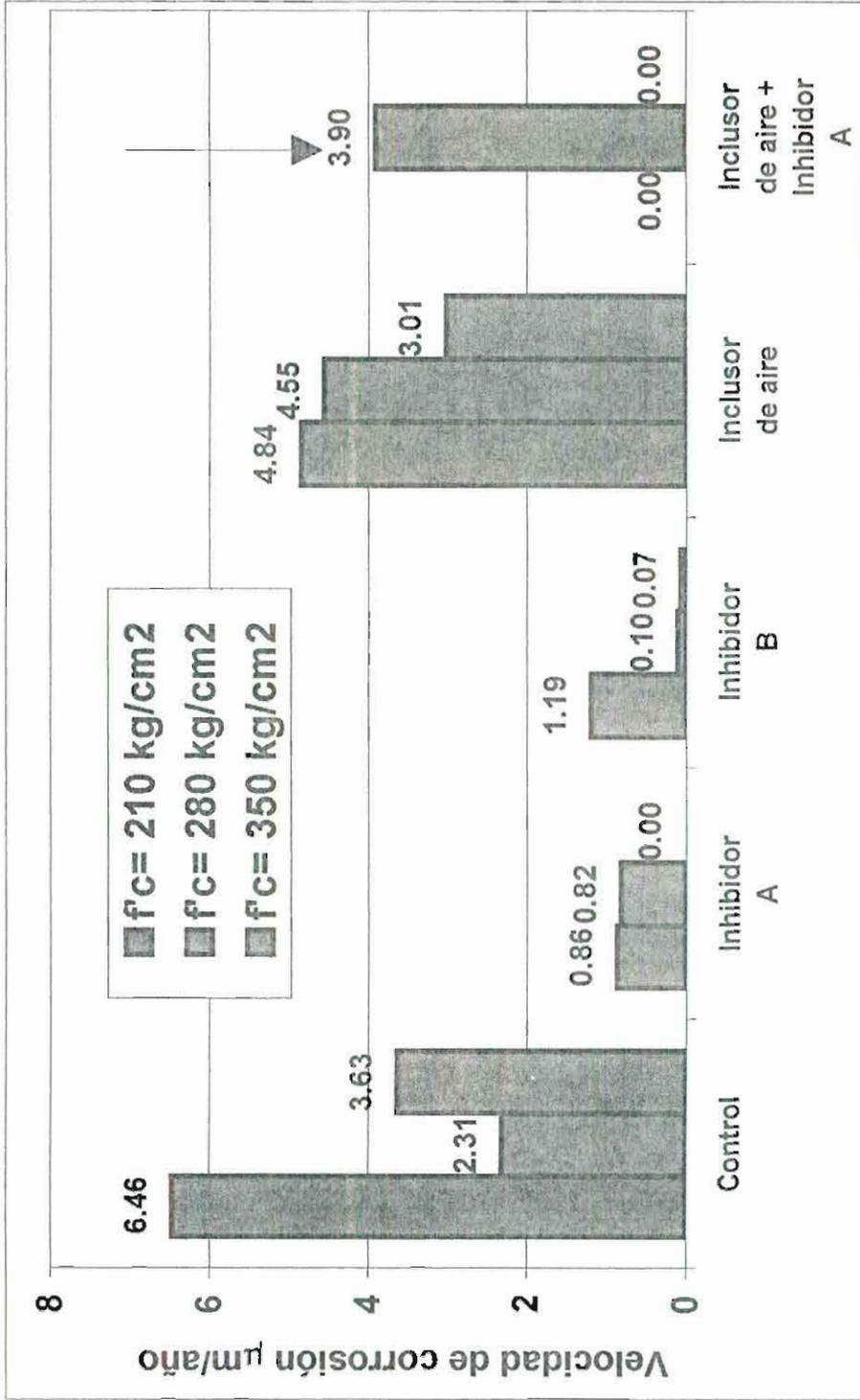
### C. Velocidades de corrosión

Como se observa en la **figura 3.7** a los 195 días de todos en los tipos de mezclas conteniendo los inhibidores A y B se obtuvieron valores con velocidades de corrosión inferiores a  $1.2 \mu\text{m/año}$  que son condiciones pasivas del acero, excepto el diseño  $\varepsilon - V$  en que las condiciones son de corrosión baja a moderada, como se indicó anteriormente el contenido de cemento no fue el adecuado. En el diseño  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  la mezcla control y la mezcla que contiene el inclusor de aire presenta velocidades con valores mayores o cercanas  $5 \mu\text{m/año}$  respectivamente siendo estas condiciones de corrosión moderada a alta. En los diseños  $f'c = 280$  y  $350 \text{ kg/cm}^2$  la mezcla control y la que contiene el inclusores de aire presenta velocidades entre  $2.3$  y  $4.6 \mu\text{m/año}$  que son condiciones de corrosión baja a moderada.

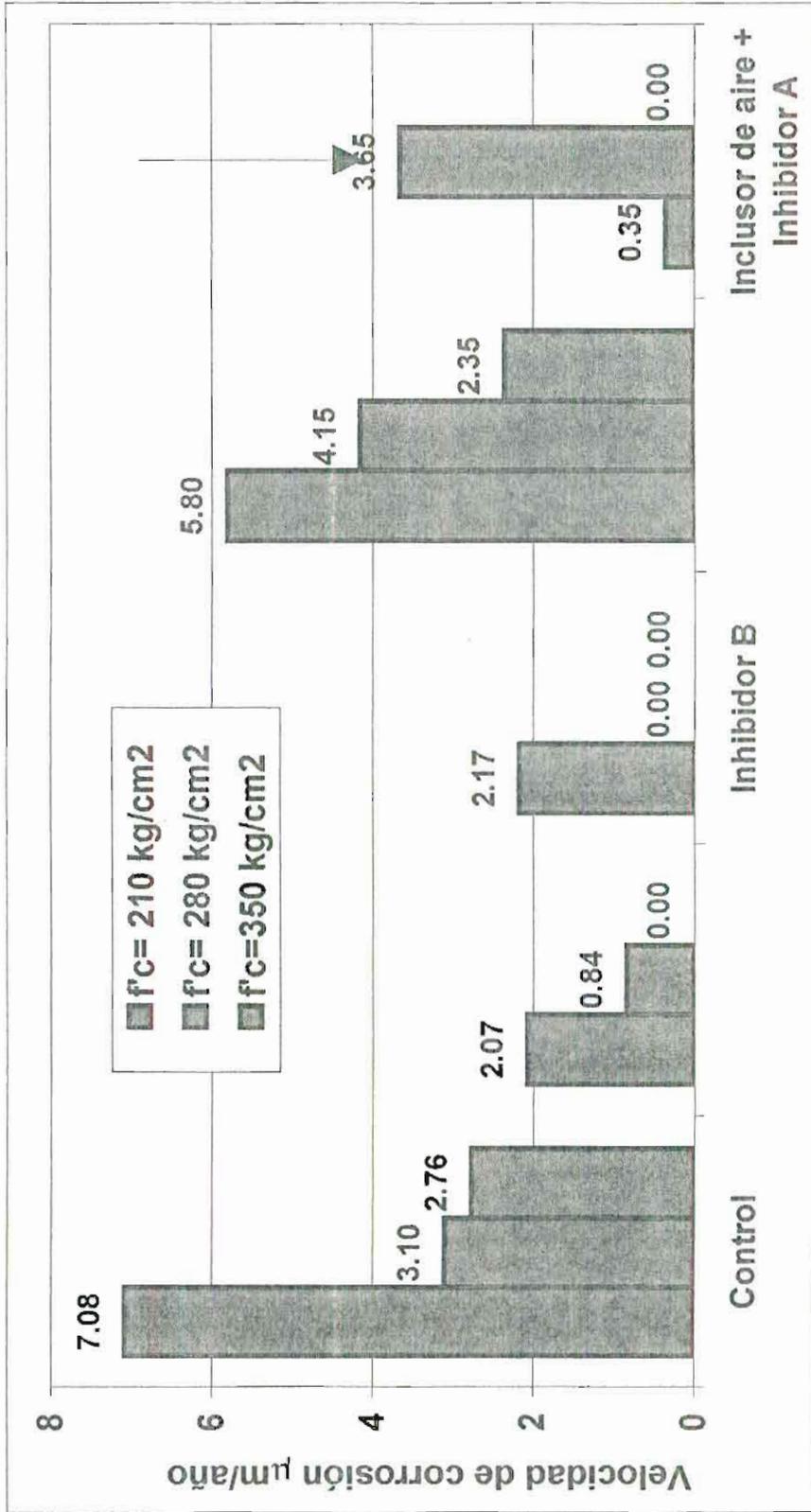
En la **figura 3.8** a los 260 días se observa que las condiciones pasivas de corrosión se mantienen en las mezclas conteniendo los inhibidores para el diseños de hormigón  $f'c = 280$  y  $350 \text{ kg/cm}^2$ , mientras para el hormigón  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  las condiciones son corrosión baja a moderada, observándose que

de todas maneras las velocidades de corrosión con los inhibidores muy bajas comparadas con la mezcla control o con la que contiene el inclusor de aire. Se puede apreciar que tanto para la mezcla control como para la mezcla con inclusores de aire forman como una "escalera" en la cual el escalón más alto ( más corrosión ) lo representa el diseño  $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$  ( excepción mezcla  $\epsilon$ - I a los 195 días por la el desfaseamiento en esta curva ) luego se baja al diseño  $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$  y luego al escalón mas bajo el diseño  $f'c= 350 \text{ kg/cm}^2$

**FIGURA 3.7**  
**VELOCIDAD DE CORROSION A LOS 195 DIAS DE INICIADO EL ESTUDIO**



**FIGURA 3.8**  
**VELOCIDAD DE CORROSION A LOS 260 DIAS DE INICIADO EL ESTUDIO**

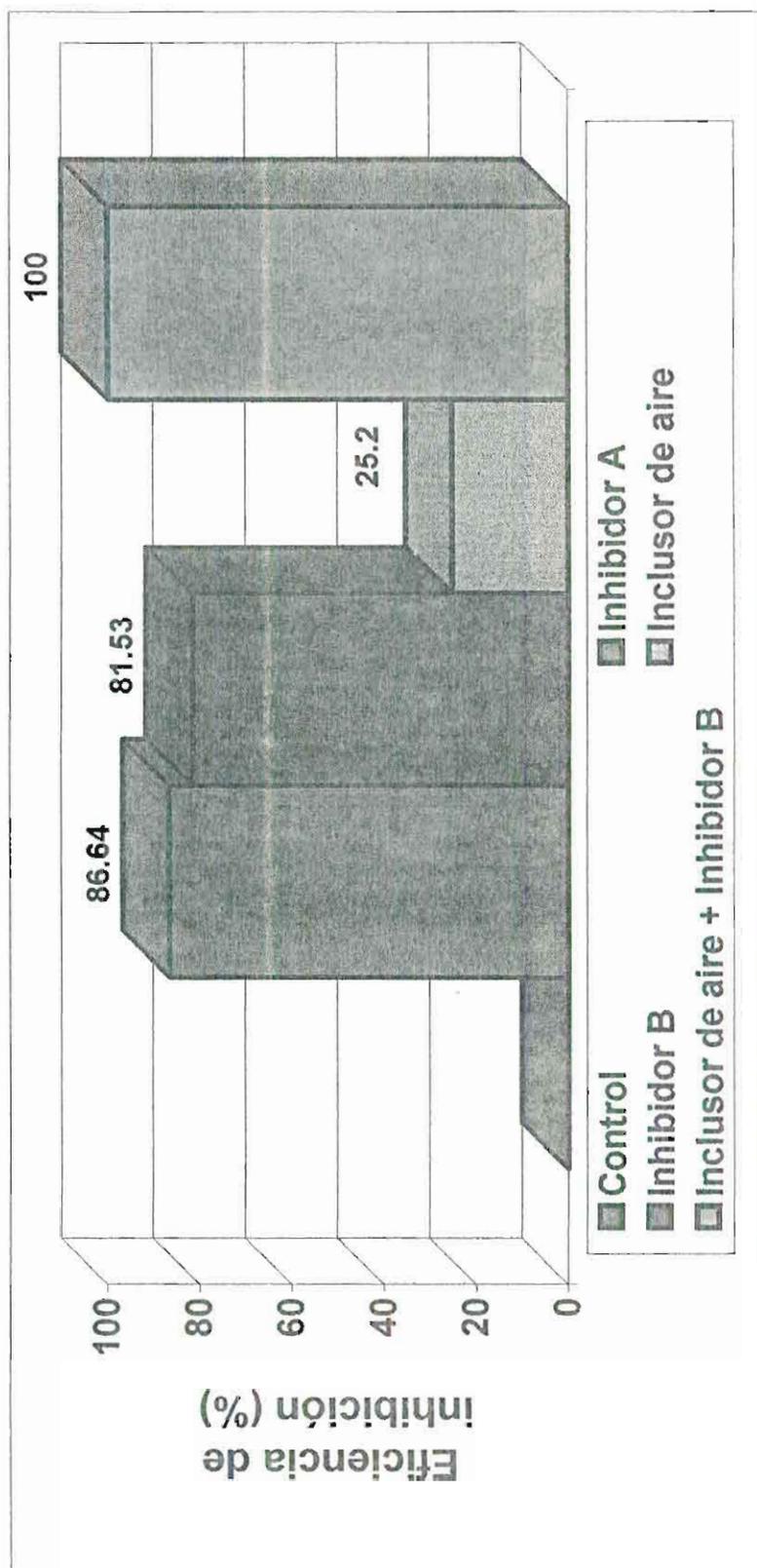


### E. Eficiencia de inhibición

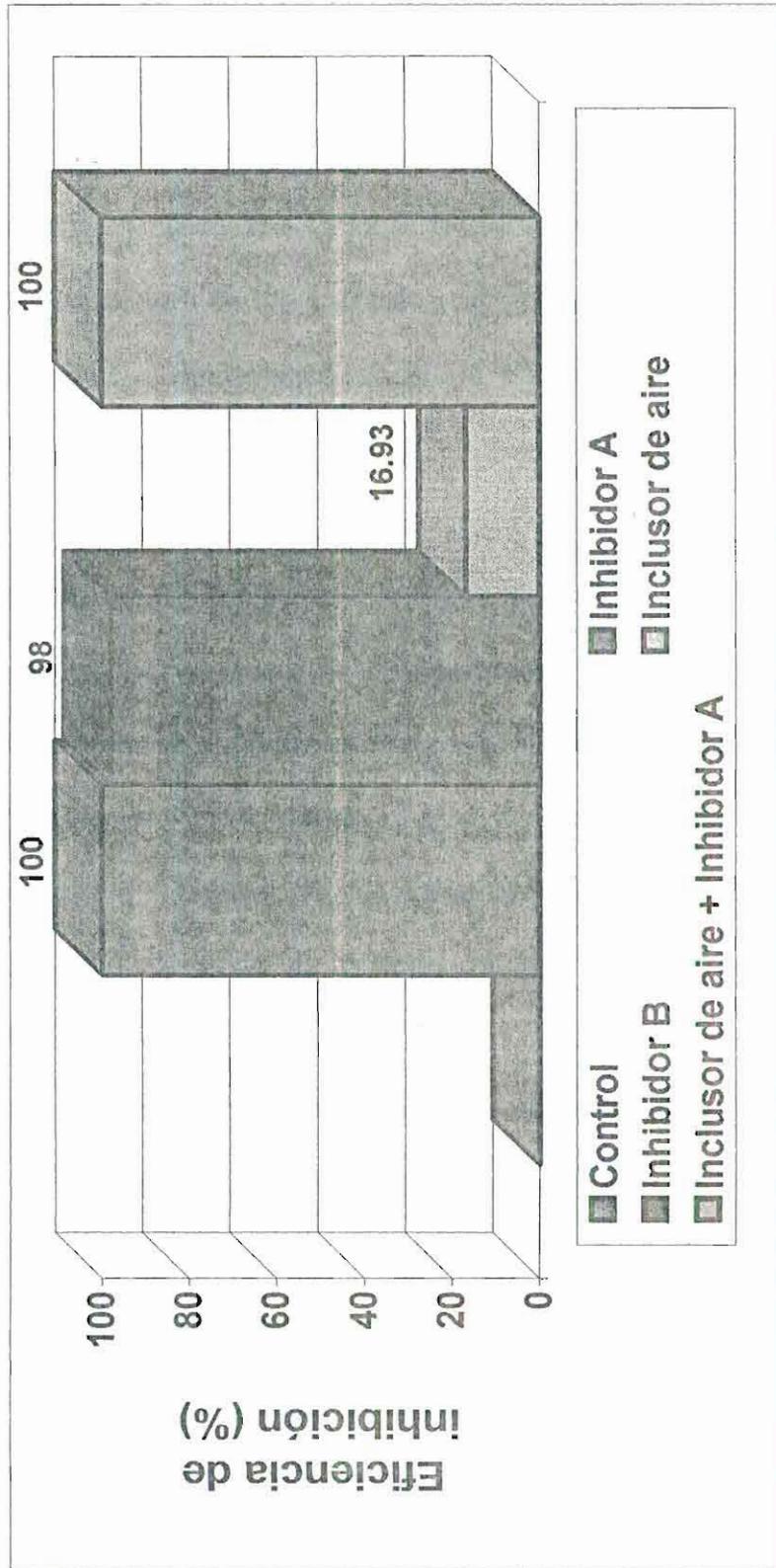
En la **figura 3.9** comparando las eficiencias de inhibición a los 195 días de iniciado el estudio entre los tipos de mezclas del diseño  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  con la mezcla control se observan un alto porcentaje de eficiencia de las mezclas con los inhibidores A y B (86 y 81 % respectivamente) , obteniendo la mejor eficiencia de la mezcla conteniendo el inclusor de aire y el inhibidor A (100%) . En lo que respecta a la mezcla conteniendo el inclusor de aire solo es un 25% más eficiente que la mezcla de control.

En la **figura 3.10** a los 195 días en el hormigón  $f'c= 350 \text{ kg/cm}^2$  la eficiencia de los inhibidores es mayor siendo estas 100% con el inhibidor A, 98% con el inhibidor B y 100% con el inclusor de aire/inhibidor A observando lo que se indico anteriormente que la cantidad de cemento es importante en cualquier diseño resistente a la corrosión. La eficiencia de la mezcla con inclusor de aire es muy baja esta mezcla es solo un 17% "mejor" que la mezcla de control.

**FIGURA 3.9**  
**EFICIENCIA DE INHIBICION A LOS 195 DIAS DE INICIADO EL ESTUDIO**  
**HORMIGON  $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$**



**FIGURA 3.10**  
**EFICIENCIA DE INHIBICION A LOS 195 DE INICIADO EL ESTUDIO**  
**HORMIGON  $f_c = 350 \text{ kg/cm}^2$**



#### **F. Corrosión total o Corriente Total de corrosión**

En la **figura 3.11** para el hormigón  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  la curva de la mezcla de control se observa alejada del resto, luego se encuentra la curva con inductor de aire, un poco más abajo y juntas las curvas de las mezclas con inhibidor A e inhibidor B y sin corrosión o sin transferencia de electrones la mezcla con inductor de aire e inhibidor A.

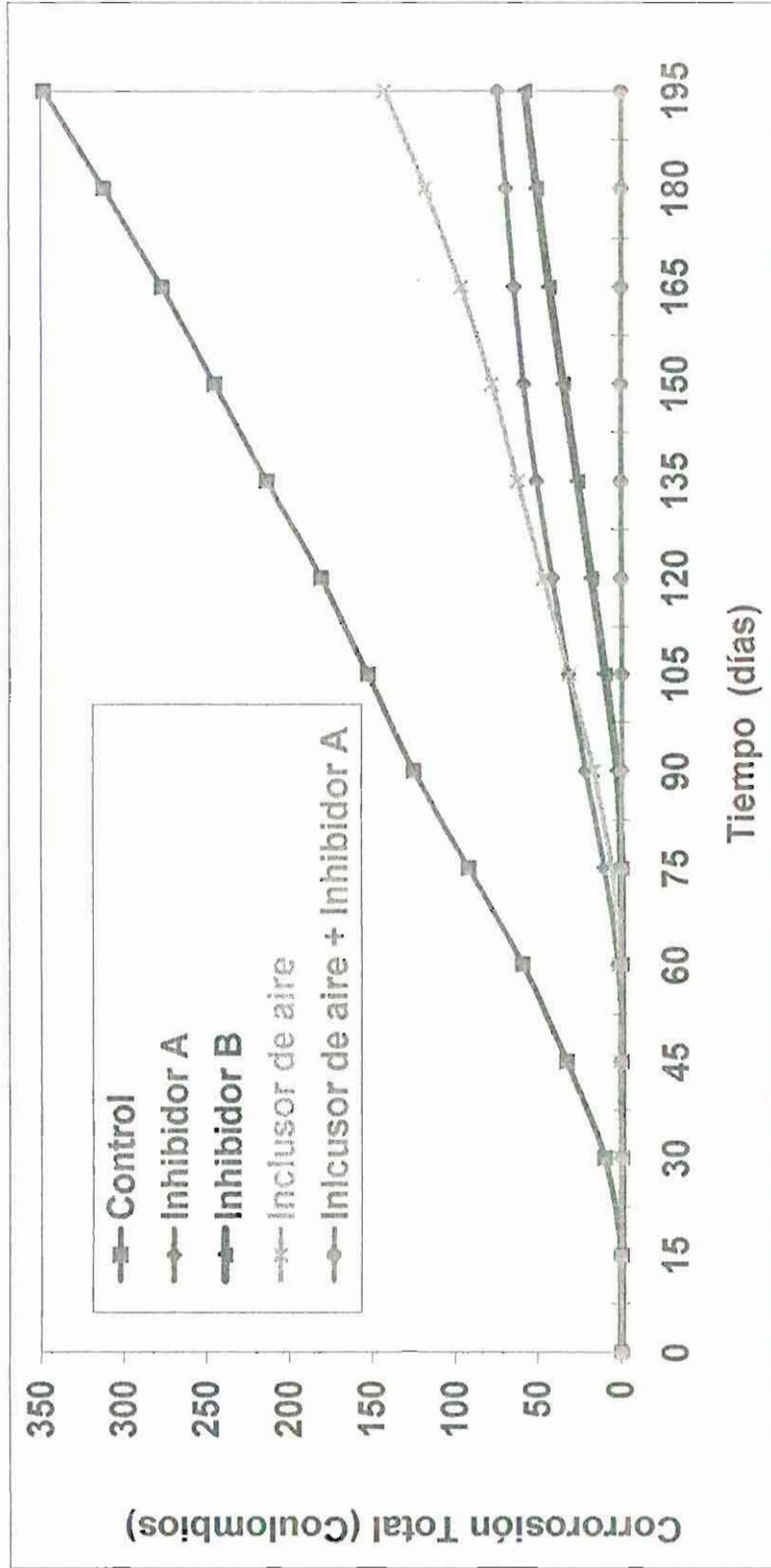
En la **figura 3.12** para el hormigón  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$  en la mezcla control se inicia el transporte de electrones a los 120 días aumentado llegando al final a 33 C. Mientras que con los inhibidores A y B no llegan ni a 4 C. La situación anómala como en las curvas de la corriente de la macrocelda se presenta comparando las mezclas con el inductor de aire y con el inductor de aire/inhibidor A. como se explicó anteriormente se debe a la cantidad de cemento de estas mezclas.

En la **figura 3.13** se observa solo dos curvas que se levantan vertiginosamente la de control y la de inductor de aire aunque es de considerar que esta se atrasa 45 días en iniciarse. Mientras que todas las mezclas que contienen inhibidor A no existe transferencia de electrones y las vigas tratadas con el

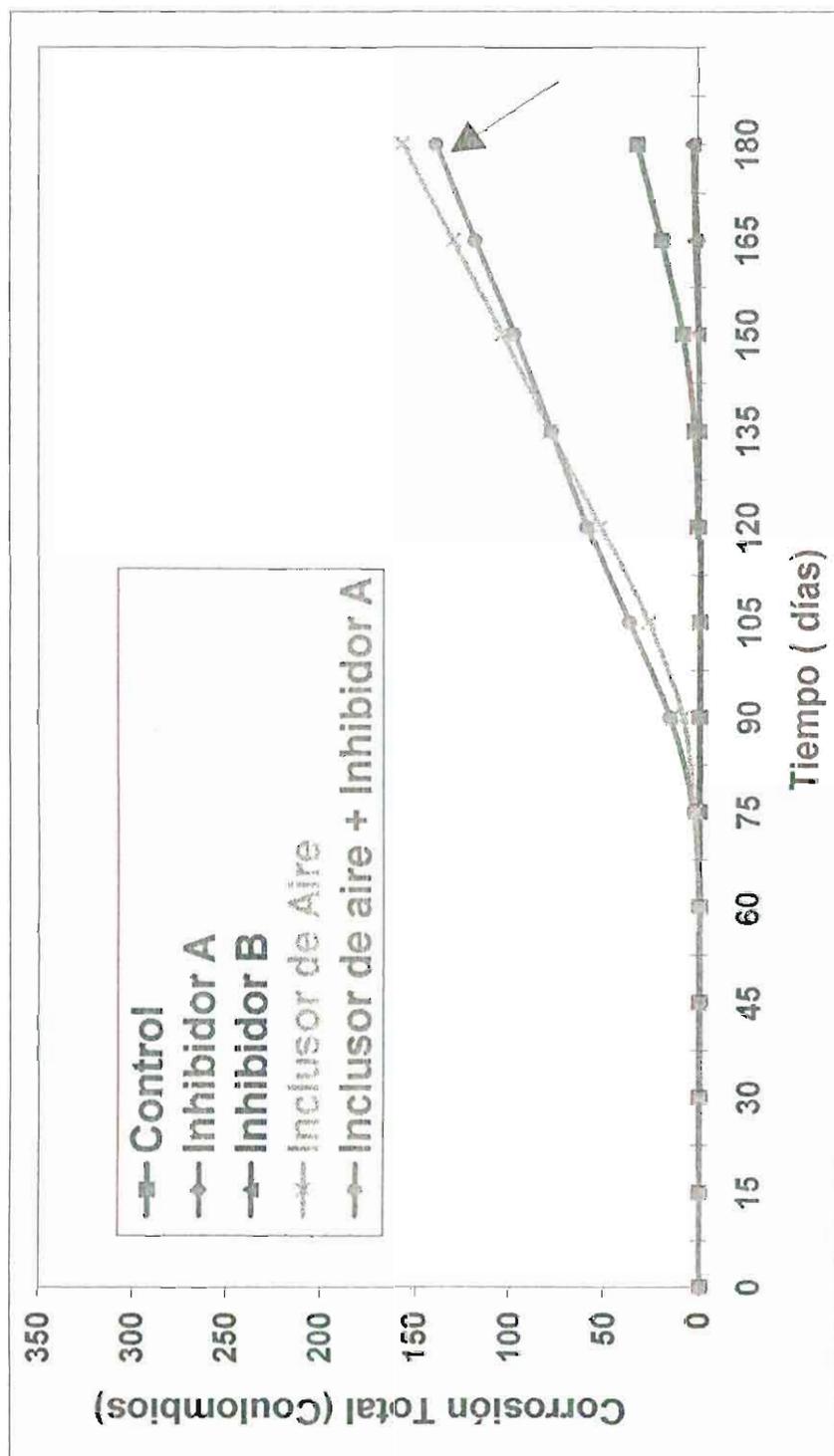
existe transferencia de electrones y las vigas tratadas con el inhibidor A existe una tendencia muy evidente a la disminución hasta hacerse despreciable la transferencia de electrones ( curva se vuelve horizontal ).

En la **figura 3.14** se muestran a los 195 días los últimos valores de las corrosiones totales, se puede observar que las mezclas de control y con inductor de aire tienen una corrosión total de más de 100 C., solo el diseño  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$  la corrosión total llegó a 65.6 C. Aunque es evidente que la tendencia de la corriente de la macrocelda es a aumentar ( ver **tabla # XLIII** ), mientras que las mezclas que contienen el inhibidor A y las tratadas con el inhibidor B muestran una disminución siendo las corrosiones totales máximas hasta 10 C. ( la mayoría es 0 C. ), solo la mezcla del hormigón  $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$  con el inhibidor llega a 74 C. pero como se indica en la **tabla # XLII** la tendencia de la corriente de la macrocelda es a disminuirse y por ende disminuir la transferencia de electrones; el  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$  conteniendo el inductor de aire /inhibidor A muestra un comportamiento que difiere de todas las curvas con los inhibidores.

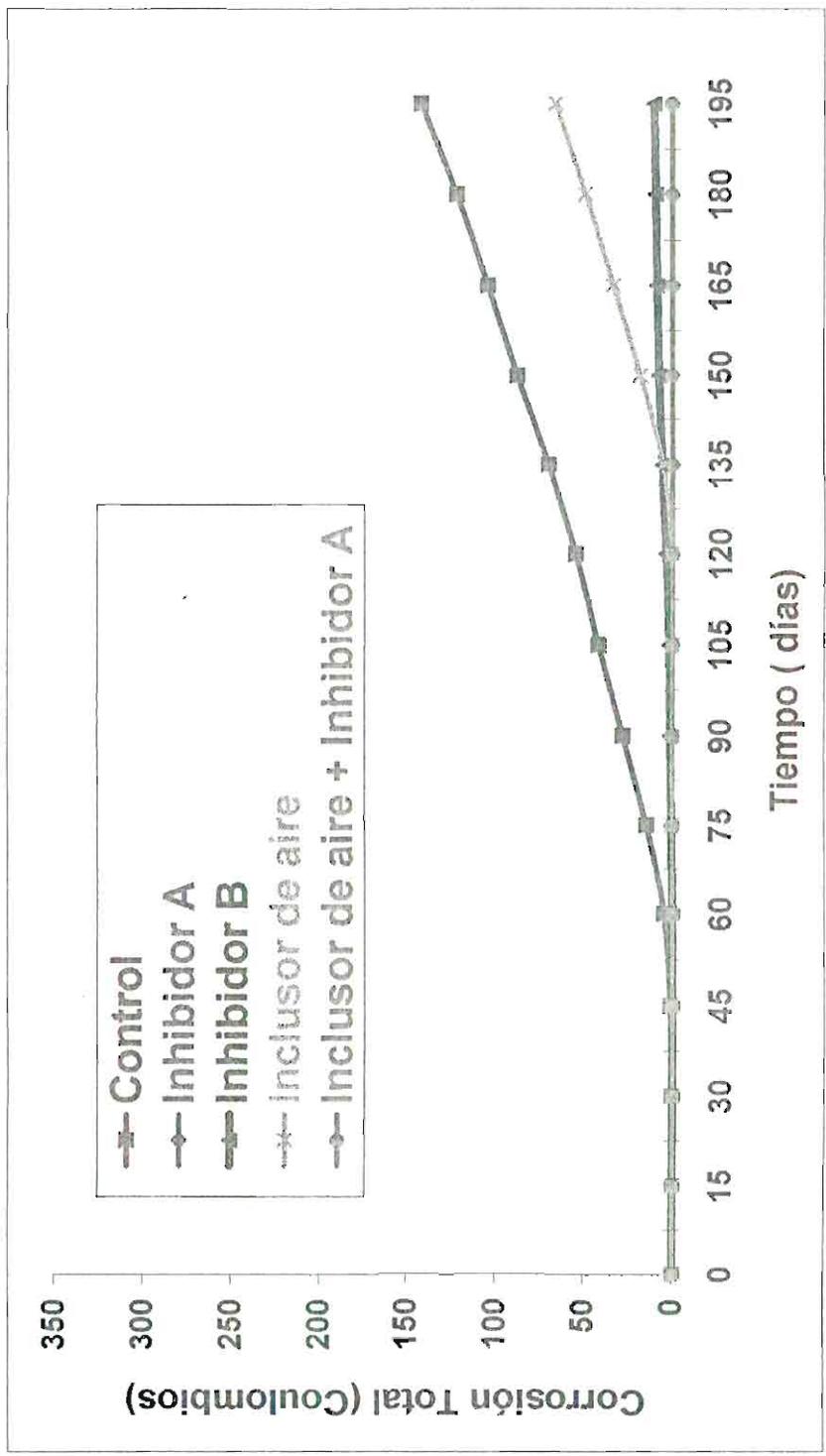
**FIGURA 3.11**  
**CORROSION TOTAL DE LAS MINIVIGAS**  
**HORMIGON  $f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$**



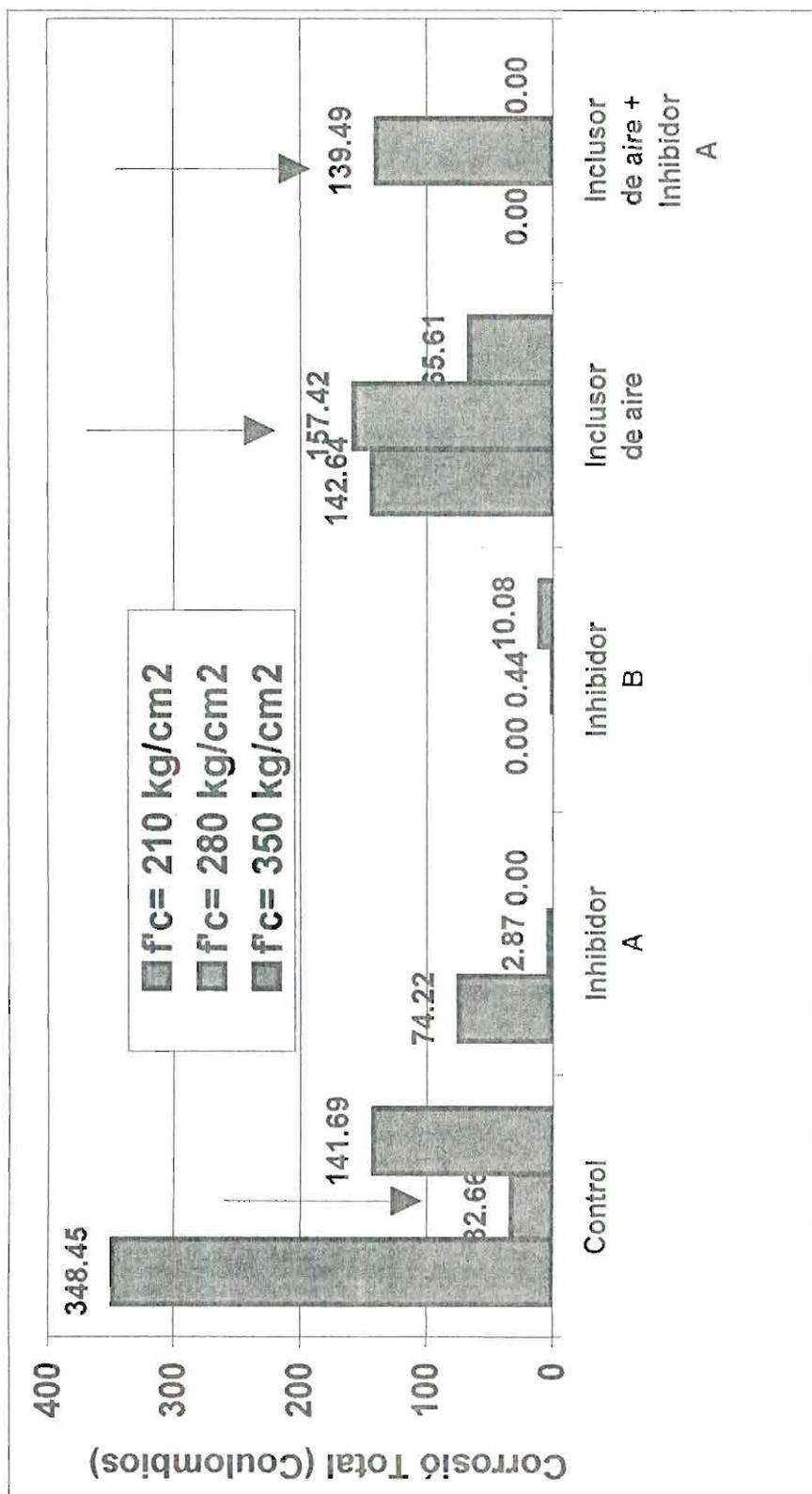
**FIGURA 3.12**  
**CORROSION TOTAL DE LAS MINIVIGAS**  
**HORMIGON  $f_c = 280 \text{ kg/cm}^2$**



**FIGURA 3.13**  
**CORROSION TOAL DE LAS MINIVIGAS**  
**HORMIGON  $f_c = 350 \text{ kg/cm}^2$**



**FIGURA 3.14**  
**CORROSION TOTAL DE LAS MINIVIGAS HASTA 195 DIAS DE ESTUDIO**

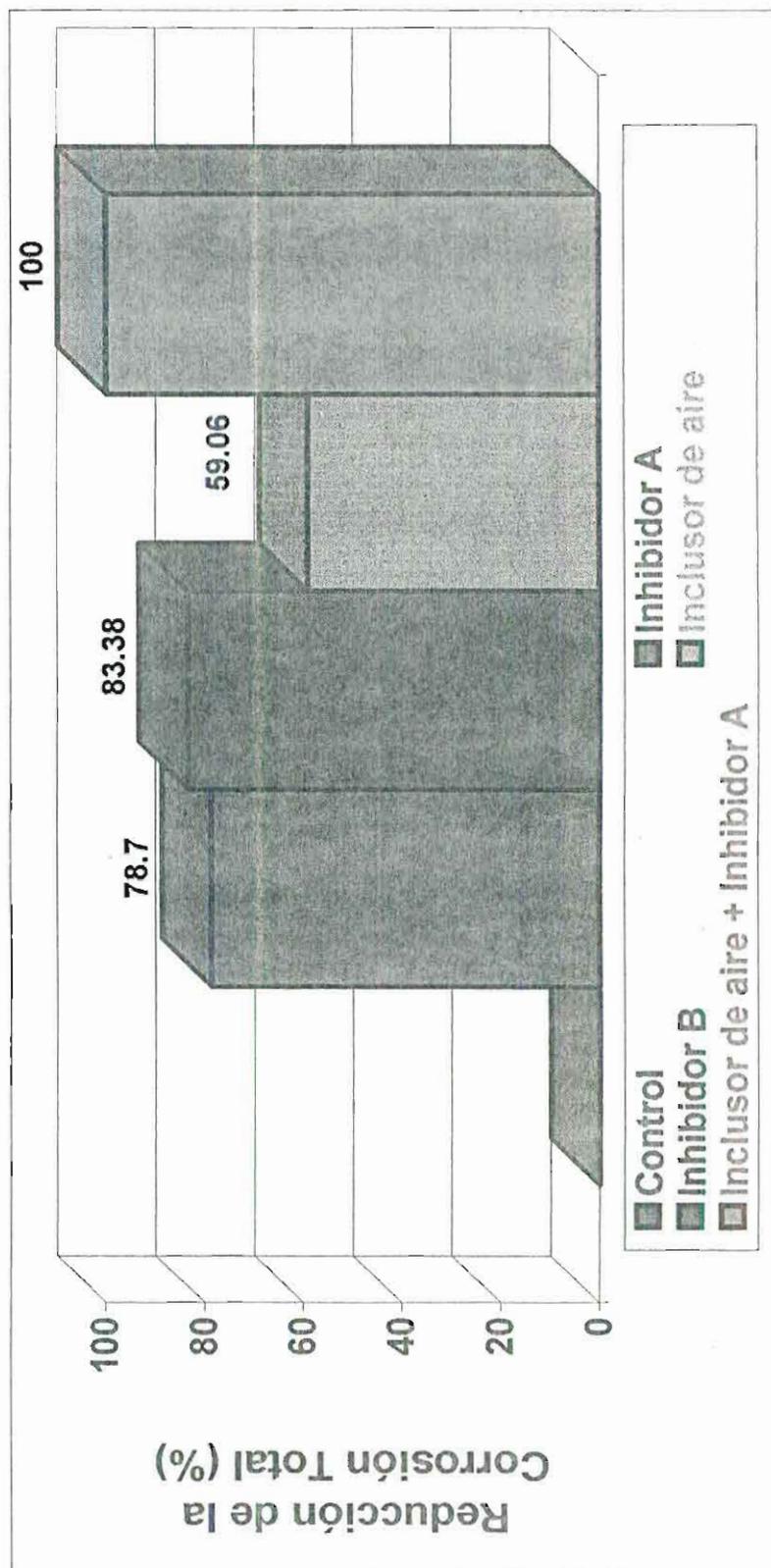


### **E. Reducción de la corrosión total**

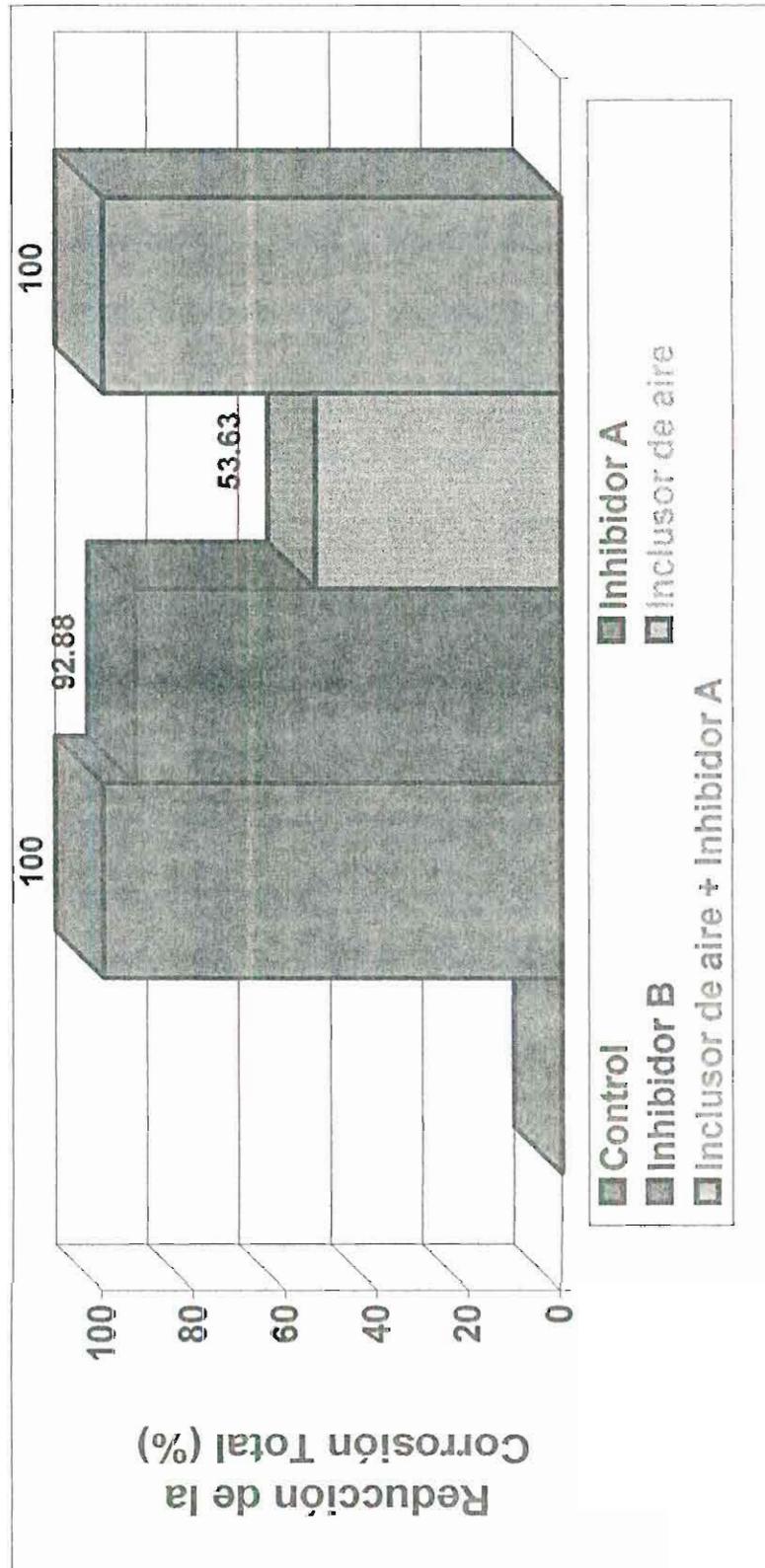
En las **figuras 3.15 y 3.16** se observa que las mezclas conteniendo inclusores de aire y el inhibidor A combinados y en el diseño  $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$  con el inhibidor A solo son las más óptimas ( reducción es del 100% ) , luego continúan las que contienen el inhibidor A y las vigas tratadas con el inhibidor B ( reducción entre el 79 y 93% ) , mientras que con el inclusor de aire se obtiene una reducción solo entre el 54 y 59% .

Es importante considerar que los porcentajes de reducción hallados en este tesis corresponden a estas pruebas, debido a que las vigas que contenían inhibidores sufrieron un ligera corrosión al inicio deliberadamente para probar la migración de los inhibidores. Por ejemplo, en el caso de las vigas con el inhibidor de superficie se debería haber esperado un 40 días ( solo se espero 7 días ) para que una cantidad apreciable de inhibidores llegue hasta el acero "anódico".

**FIGURA 3.15**  
**REDUCCION DE LA CORROSION A LOS 195 DIAS**  
**HORMIGON  $f_c=210 \text{ kg/cm}^2$**



**FIGURA 3.16**  
**REDUCCION DE LA CORROSION A LOS 195 DIAS**  
**HORMIGON  $f_c = 350 \text{ kg/cm}^2$**



## 3.2 RESPECTO A LAS DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL HORMIGÓN

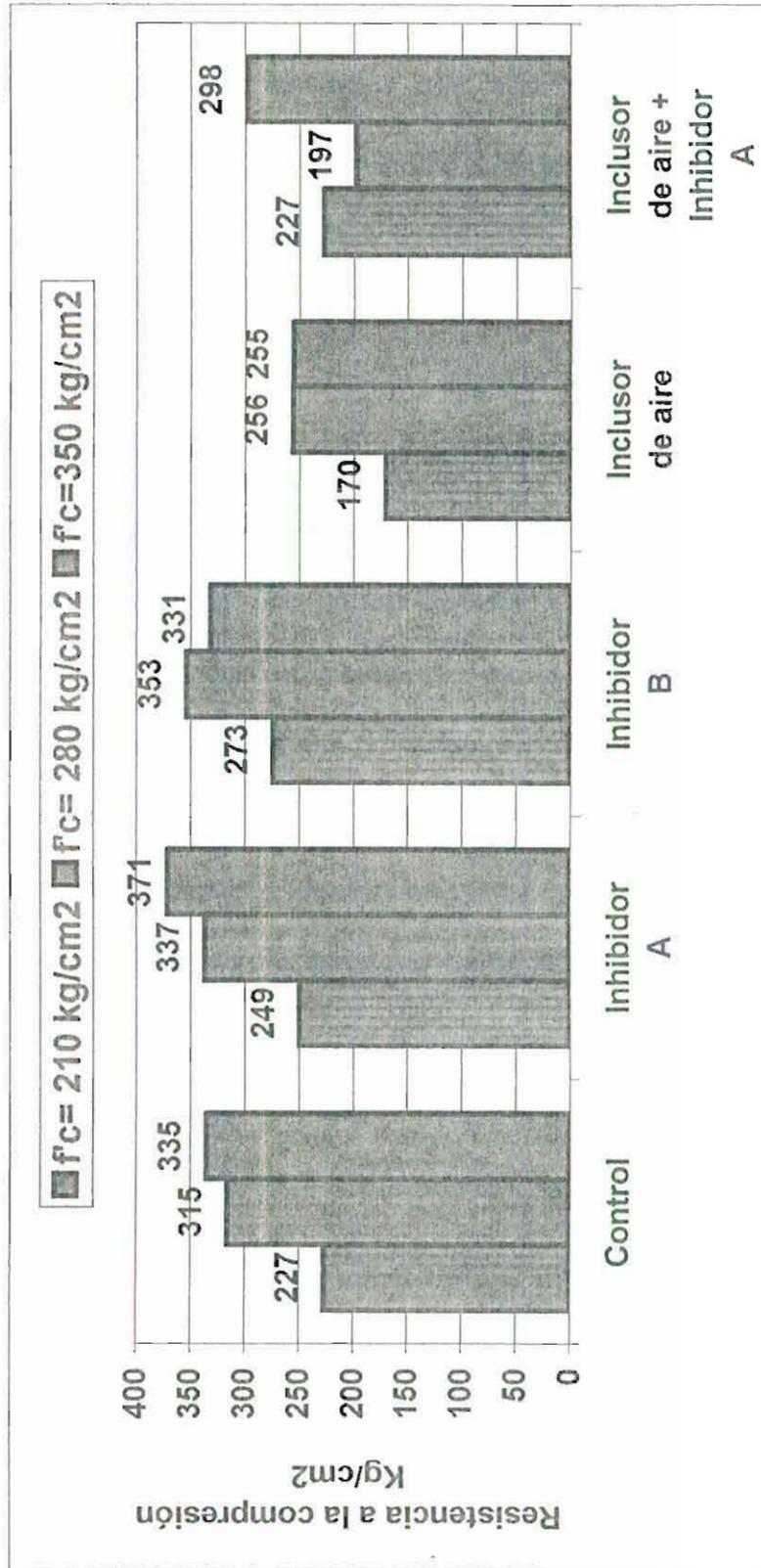
### A. Prueba de Resistencia a la compresión

En la **figura 3.17** se observan las resistencias a la compresión de los diseños y mezclas utilizados en el estudio, comparando con la mezcla control el tipo de mezcla conteniendo el inhibidor A hubo un ligero aumento en la resistencia a la compresión, se observa un aumento en un 7 a 10%,

El inclusor de aire (5%) disminuye la resistencia a la compresión disminuye aproximadamente entre un 20 a 25% , mientras que al aditivar a la mezcla el inclusor de aire y el inhibidor A la resistencia a la compresión se mantuvo igual para el diseño  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  , disminuyó un 48% ( solo se alcanzó  $197 \text{ kg/cm}^2$  ) para el diseño  $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$  - se evidencia el error en la dosificación del cemento - y disminuyo solo un 10% para el diseño  $f'c= 350 \text{ kg/cm}^2$ .

Como se indico anteriormente la mezcla indicada con el inhibidor B es una mezcla de control, ya que el inhibidor solo se aplicó a las vigas ya fundidas después de curadas.

**FIGURA 3.17**  
**RESISTENCIA A LA COMPRESION DE TODOS LOS DISEÑOS Y**  
**MEZCLAS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO**



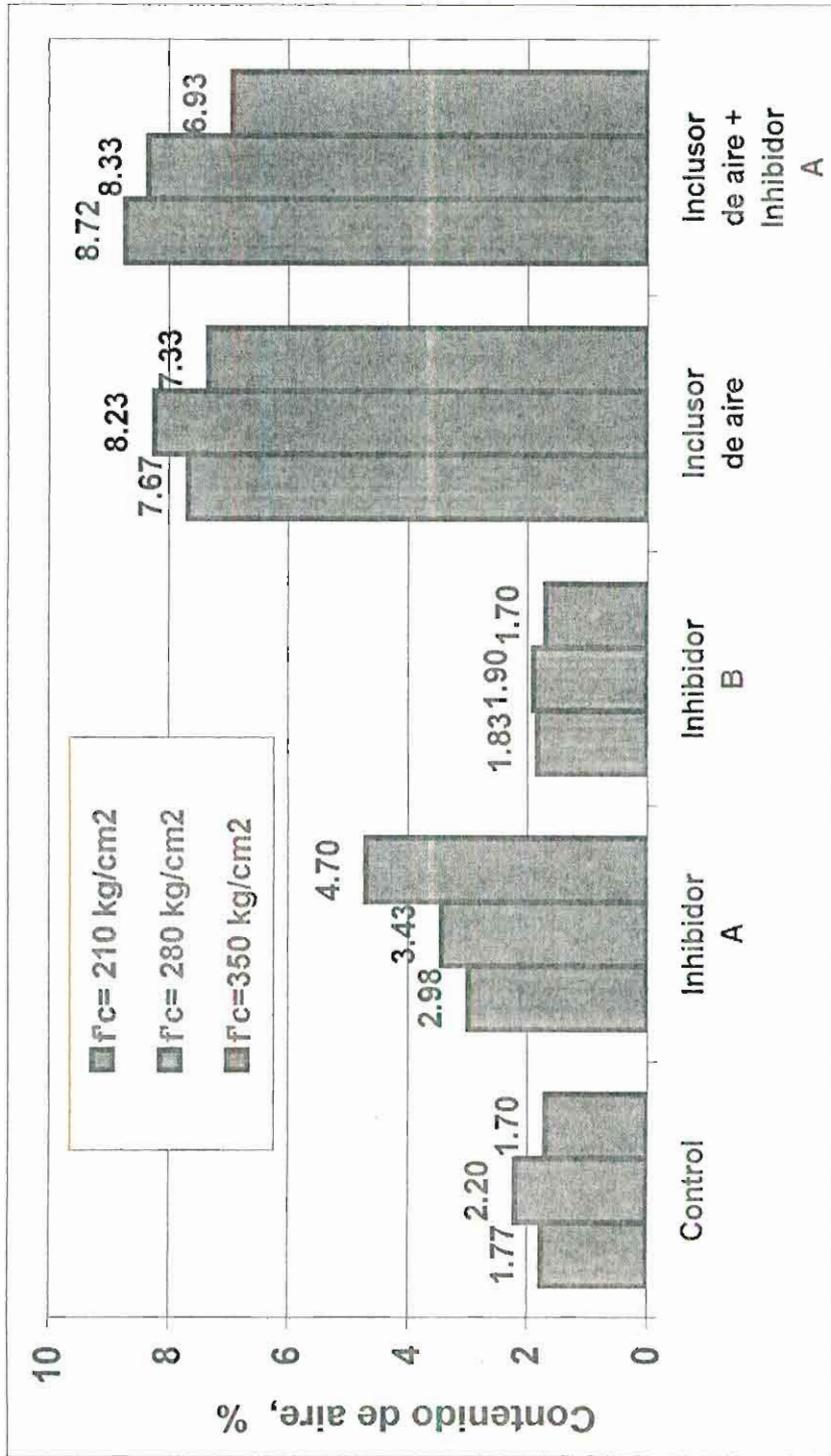
## **B. Prueba de Contenido de aire**

como se indica en la **figura 3.18** el adicionar el inhibidor A aumenta de un 36 a un 63% el ( 2,98 a 4,70% ) contenido de aire comparando con la mezcla control ( 1,70 a 2,20 ) en cada diseño, es importante apreciar que conforme se aumenta la cantidad de cemento en un diseño también aumenta el contenido de aire cuando se añade a la mezcla el inhibidor A y aunque aparezca exagerado este incremento del contenido de aire, este aumento no causa perjuicio , más bien mejoró la plasticidad del concreto fresco y como se indicó anteriormente aumento la resistencia a la compresión

Es importante apreciar que conforme se aumenta la cantidad de cemento en un diseño también aumenta el contenido de aire cuando se añade a la mezcla el inhibidor A

Las mezclas que contienen el inductor de aire y el inhibidor A solos y combinados mantuvieron aproximadamente en un 7%. A estos contenidos de aire la resistencia a la compresión disminuye.

**FIGURA 3.18**  
**CONTENIDO DE AIRE DE TODOS LOS DISEÑOS Y**  
**MEZCLAS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO**



### C. Prueba de Asentamiento

Si bien es cierto que los diseños se basaron en un asentamiento constante de 12 cm. En las **tablas # 27, # 28 y # 29** se puede observar que en las mezclas incluyendo el inhibidor de corrosión A y el inclusor de aire sólo y combinados debió añadirse menos cantidad de agua, aproximadamente un 10% para poder mantener el asentamiento de diseño. Inclusive una mala dosificación de agua y del inclusor de aire especialmente puede alterar en algunos centímetros el asentamiento volviendo más líquida la consistencia del hormigón y sobre pasando el límite máximo de valores de asentamientos para diferentes tipo de obras indicado en la **tabla # 25**.

El asentamiento de las mezclas utilizadas en esta investigación corresponde a valores para obras como: muros, bases, cimientos, losas, vigas, paredes de hormigón armado y columnas de edificios como se indica en la **tabla # 26**.

#### D. Prueba de Porosidad

La muestra de la viga  $\epsilon - I$  reveló un porcentaje de porosidad de 13.7% siendo este un indicativo de un hormigón bueno pero permeable y no adecuado para ambientes agresivos mientras que la porosidad de la muestra de la viga  $\epsilon - V$  resultó 20% , considerándose este un hormigón muy permeable e inadecuado para proteger a la armadura a largo plazo, aunque este aumento en la porosidad se debe a la disminución en la dosificación del cemento, si bien es cierto este hormigón aireado ( $\epsilon - V$ ) es conveniente para un medio en donde la absorción capilar sea el primer factor para considerar en el diseño y por ende debería ser mejor que la mezcla  $\epsilon - I$ , es también importante considerar que el inductor de aire disminuye la absorción capilar pero no detiene el ingreso de los cloruros cuyo mecanismo de migración es básicamente por difusión.

### E. Prueba de Contenido de cloruros

Como se observa en la **tabla # 51** el contenido de cloruros a un 1 cm. De profundidad en la mezcla  $\varepsilon - I$  existe un 0.23% de cloruros por peso de concreto, un similar porcentaje de cloruros se obtuvo a 2m. de profundidad en la mezcla  $\varepsilon - V$ , esto indica que los cloruros viajaron más rápido en esta última mezcla evidencia una deficiente protección contra la corrosión.

En la mezcla  $\varepsilon - IV$  existe un 0.96% de cloruros por peso de concreto, que es la misma cantidad que se obtuvo en la mezcla  $\Omega-V$  que en teoría esta tiene más cemento que la mezcla  $\varepsilon-IV$  por lo tanto se evidencia nuevamente una mala dosificación en la cantidad de cemento.

El contenido de cloruros del hormigón sin contaminación fue de 0.06% esto indica que la cantidad de cloruros en la fabricación del hormigón no influye en la corrosión de las varillas.

### 3.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

En los numerales anteriores se observado el beneficio del usar los inhibidores A y B para detener la corrosión electroquímica e inclusive proteger el acero de refuerzo en presencia de cloruros, es importante realizar un análisis económico. A continuación se analizarán dos casos.

#### **Caso : Pilote de hormigón armado**

Como ejemplo se tomará un pilote de hormigón armado de 20 metros de largo de sección 0.30 x 0.30 m. , los costos directos de fabricación e hincas de un pilote son los siguientes:

1. Costos del pilote , materiales de instalación: hormigón  $f'c = 280$  kg/cm<sup>2</sup> , acero de refuerzo, encofrado, etc.....S/. 1'147.458
  2. Costos por Jornales: Capataz civil, hincas, albañil, herrero, ayudante, etc.....S/. 1'107.074
  3. Equipo Utilizados: Compresor, cortador/dobladora, Grúa 46 Ton, Martillo/guía, Barcaza y Remolque.....S/. 3'150.338
  4. Materiales de consumo, herramientas.....S/. 276.768
  5. Gastos varios: camas de pilotes viáticos, etc.....S/. 163.736
- Todos estos gastos dan un total de..... S/. 5'860.038

En el caso de que añadirse el inhibidor A en el hormigón  $f'c=280$  kg/cm<sup>2</sup> especificado en este diseño se incrementa el costo del costo total del pilote en un 5%.

Un pilote construido en 1976 costaba S/. 50.000, se asume que ha sido diseñado para 40 años de vida y no fallara ni necesitara reparaciones o mantenimiento en este tiempo, pero al cabo de 20 años necesitará una reparación. En 1996 la reparación de ese mismo pilote cuesta aproximadamente S/. 4'000.000,00 y reemplazarlo por un pilote nuevo S/. 6'000.000. Si en 1976 se hubiera usado el inhibidor A el costo del pilote hubiera sido S/. 53.000 y no se tendría que realizar reparaciones y mantenimientos en 1996. Haciendo un balance de costos el ahorro es impresionante.

### **Caso : Poste de hormigón armado**

Otro problema de corrosión muy común en nuestra ciudad es la corrosión de postes de hormigón armado, la empresa eléctrica gasta mucho dinero mensualmente reemplazando postes deteriorados debido al peligro que constituyen a la seguridad humana, a continuación se analizarán los costos que conlleva el

reemplazo de un poste de hormigón armado de 26 metros de altura de 350 kg.;

1. Costo del postes .....S/. 500.000
2. Personal de organización, camión, grúa, cadenas, tiempo de trabajo (día/noche).....S/. ?
3. Instalación nueva: remoción del pilote viejo, interrupción del tráfico, desvíos.....S/. ?
4. Eliminación del poste viejo ( dinero perdido ), localización de líneas.....S/. ?
5. Transferencias de poder, transformadores, etc.....S/. ?
6. Costos de financiación.....S/. ?
7. Interrupción: paralización del servicio (empresa eléctrica deja de percibir dinero) , molestia ciudadana.....S/. ?
8. Otros :alquiler de equipos, daños en colocación o transporte de los postes, lugar inaccesible, distancias lejanas, etc.....S/. ?

Los costos indicados los numerales indicados anteriormente se aproximarían a S/. 3'000.000

Los costos de reparación suponiendo un 20% de la superficie del hormigón desprendida por corrosión utilizando el inhibidor A en el mortero de reparación y el inhibidor B para tratar la superficie

alrededor de todos el poste y otros costos como personal ,  
alimentación, traslados por poste etc.....S/. 900.000

Este implica un ahorro de S/. 2'100.000 por poste, un 70% dinero  
que bien podría ser invertido en otros proyectos, con el beneficio  
de extender el servicio de vida del poste.

Si se colocado el inhibidor A en la fabricación del poste el costo  
se incrementaría a S/. 800.000 , pero no se necesitaría  
reparaciones ni mantenimientos en los siguientes 34 años, con los  
que se ahorraría los costos de reemplazo y/o reparaciones  
mencionadas anteriormente.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El inductor de aire aditivado a un hormigón disminuye la absorción a los líquidos, por lo tanto disminuye el contenido de humedad en un hormigón.
2. A los 195 y 260 días las mezclas con inductores de aire presentan velocidades de corrosión un 17 y 25% menores con respecto a las mezclas de control.
3. El inductor de aire disminuye la resistencia a la compresión en altas proporciones, el contenido de aire de un hormigón no debe ser mayor al 5% para que no se altere los valores de la resistencia a la compresión.
4. La resistencia a la compresión está relacionado con el volumen de poros del hormigón, mientras que el mecanismo de transporte de contaminantes está relacionado con la estructura o conectividad de los poros.
5. A los 195 días y 260 de iniciado el estudio, las vigas tratadas con el inhibidor A y el inhibidor B presentan velocidades de corrosión con valores inferiores a  $2.32 \mu \text{ m/año}$  correspondiendo estos valores a

un estado del acero sin corrosión y con ningún posible daño previsto.

6. El inhibidor A resulto más eficiente inhibiendo la corrosión que el inhibidor B
7. El inhibidor A aumenta ligeramente el contenido de aire, mejora la trabajabilidad y fluidez del hormigón fresco, observándose un ahorro del 10% del agua y un aumento en la resistencia a la compresión en un 7 a 10%.
8. Los inhibidores A y B protegen el acero contra la corrosión en presencia de cloruros.
9. Las vigas con el inhibidor A reducen un 70 a 100% la corrosión total en comparación con las vigas de las mezclas de control.
10. Las vigas con el inhibidor A y el inclusor de aire reducen un 100% la corrosión total en comparación con las vigas de las mezclas de control
11. Las vigas tratadas con el inhibidor B disminuyen un 83 a 92% la corrosión total en comparación con las vigas de las mezclas de control.
12. Las vigas con el inhibidor A y el inclusor de aire reducen un 100% la corrosión total en comparación con las vigas de las mezclas de control.

13. Un diseño de hormigón  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  utilizado actualmente en la industria de la construcción presenta velocidades de corrosión con valores cercanos a  $7 \text{ } \mu\text{m/año}$  correspondiendo este valor a un estado de corrosión moderada a alta con un daño en el hormigón de 10 a 15 años.
14. Un diseño de hormigón  $f'c=280 \text{ o } 350 \text{ kg/cm}^2$  de la mezcla de control presentan velocidades de corrosión entre  $2.31 \text{ y } 5.8 \text{ } \mu\text{m/año}$  propias de un estado de corrosión baja a moderada ocurriendo un daño posible de 10 a 15 años.
15. El tipo de mezcla  $\epsilon - V$  presenta velocidades de corrosión con valores diferentes con respecto a todas las mezclas con inhibidores de corrosión, los errores se deben:
  - a) Error en la dosificación del cemento, se obtuvieron resistencias a la compresión un 40 a 60% menos que los datos de las mezclas de control.
  - b) Los porcentajes de porosidad de esta mezcla corresponden a un hormigón muy permeable e inadecuado para proteger a la armadura a largo plazo.
16. La cantidad de cloruros en el hormigón resultó independiente de la cantidad de cemento o del tipo de mezcla, para asegurar esto se debieron realizar más pruebas.

**Se recomienda lo siguiente:**

1. En hormigoneras se deben de realizar pruebas para determinar el contenido de cloruros o porosidad en el hormigón nuevo y no solamente realizar la prueba de resistencia a la compresión, sobre todo cuando una estructura este en un medio marino.
2. Estructuras semisumergidas o con riesgos de procesos electroquímicos de corrosión y con presencia de cloruros en el medio exterior es imprescindible tomar precauciones en el diseño del hormigón para prevenir la corrosión.
3. Un diseño de hormigón resistente a la corrosión se debe basar en el medio a que va a estar expuesto, en el cual se deben de considerar los mecanismo de migración de un ión o un fluido a través del hormigón y no exclusivamente por la relación a/c.
4. Se deben tomar muchas precauciones en la calidad del hormigón:
  - a) Apropiaada relación a/mc ( material cemento se dice cuando se incluye aditivos minerales al diseño )
  - b) Relaciones  $a/mc = 0.4$
  - c) Contenido de cemento  $> 390 \text{ kg/m}^3$
  - d) Utilizar inclusores de aire cuando el hormigón este en contacto con soluciones agresivas o contaminados con baja presión y para reducir la velocidad de corrosión

- e) Utilizar plastificantes o superplastificantes cuando el hormigón este en contacto con líquidos o gases a elevadas presiones o ácidos líquidos a elevadas presiones o para prevenir la carbonatación del hormigón.
  - f) Utilizar aditivos minerales, como la Microsilica (22) o fly ash para disminuir la difusión de iones o gases cuando el hormigón este en contacto con soluciones ácidas o con sulfatos, para prevenir la carbonatación o retrasar el ingreso de cloruros.
  - g) Utilizar inhibidores de corrosión para reducir la velocidad del corrosión y proteger una estructura de hormigón armado del ataque de cloruros y/o con ciclos de humectación (corrosión electroquímica) o estructuras sometidas a tensiones en medios corrosivos
  - h) Apropriada compactación hormigón.
  - i) Métodos de curado efectivos y previsión de fracturas.
  - j) Dosificación adecuada de aditivos.
  - k) Espesor de recubrimiento adecuado.
5. Adicionar el inhibidor A en reparaciones estructurales para eliminar la celda de corrosión en las zonas adyacentes a la reparación.

6. Se debe aplicar el inhibidor B para tratar las superficies de estructuras existentes que estén contaminadas por cloruros para detener la corrosión.

TABLA # 54

## ESTADOS DE CORROSIÓN EN LAS MEZCLAS A 195 DIAS DE INICIADO EL ESTUDIO

Corriente de corrosión ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Velocidad de corrosión ( $\mu\text{m}/\text{año}$ )	Estado de corrosión del acero (Gecorr)	TIPO DE MEZCLAS ESTUDIO	Posible daño (según Clear )
< 0.1-0.2	< 1.16-2.32	No hay corrosión	$\Omega$ -II $\Omega$ -III $\Omega$ -V $\epsilon$ -II $\epsilon$ -III $\alpha$ -II $\alpha$ -III $\alpha$ -V	Ninguno
0.2 a 0.5	2.31 a 5.8	Corrosión baja a moderada	$\Omega$ -IV $\epsilon$ -I $\alpha$ -I $\alpha$ -IV	10 a
0.5 a 1.0	5.8 a 11.6	Corrosión moderada a alta	$\Omega$ -I	15 años
1.0 a 10	11.6 a 116	Corrosión		2 a 10 años
> 10	> 116	alta		Menos de 2 años

TABLA # 55

ESTADOS DE CORROSIÓN EN LAS MEZCLAS A 260 DIAS DE INICIADO EL ESTUDIO

Corriente de corrosión ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Velocidad de corrosión ( $\mu\text{m}/\text{año}$ )	Estado de corrosión del acero (Gecorr)	TIPO DE MEZCLAS ESTUDIO	Posible daño ( según Clear )
< 0.1-0.2	< 1.16-2.32	No hay corrosión	$\Omega$ -II $\Omega$ -III $\Omega$ -V $\varepsilon$ -II $\varepsilon$ -III $\alpha$ -II $\alpha$ -III $\alpha$ -V	Ninguno
0.2 a 0.5	2.31 a 5.8	Corrosión baja a moderada	$\varepsilon$ -I $\alpha$ -I $\alpha$ -IV	10 a
0.5 a 1.0	5.8 a 11.6	Corrosión moderada a alta	$\Omega$ -I $\Omega$ -IV	15 años
1.0 a 10	11.6 a 116	Corrosión alta		2 a 10 años
> 10	> 116			Menos de 2 años

## BIBLIOGRAFÍA

1. HIME, W. y ERLIN, Some Chemical and Physical Aspects of Phenomena Associated with Chloride-Induced Corrosion, CORROSION, CONCRETE AND CHLORIDES, ACI , Detroit-USA, 1983
2. ANDRADE, C. Electrochemical Aspects of repair Methods, Institute Of Construction Sciences «Eduardo Torroja», , Seminario S5: Reparación de Estructuras de hormigón armado dañadas por corrosión, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja-Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, Abril-1995
3. NACE. Corrosion basics: an introduction, Houston, USA. 1984, pp. 353.
4. NMAI, K. Organic bases Corrosion admixture for reinforced concrete structures in warm climates, I Simposio sobre Estructuras de Concreto Armado Control de Corrosión y Rehabilitación, Centro de Estudios de Corrosión de la Universidad de Zulia - Asociación Venezolana de Corrosión - NACE - ACI Maracaibo, Venezuela, Octubre-1992

5. MIKSIC, B. Use of vapor phase inhibitors for corrosion protection of metal products, Corrosion/83, Paper No. 308, Houston , TX, USA. 1983
6. BAMFORTH, P. Especificaciones y ensayos para determinar la permeabilidad del hormigón, Taywood Engineering Limited, , Seminario S5: Reparación de Estructuras de hormigón armado dañadas por corrosión, Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja-Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, Abril-1995
7. CEAC. Técnica y práctica del hormigón armado, Barcelona, España, 1983, pp- 48-50
8. UKRAINCZYK y SIPOS. Diffusion of the MCI-2000 and MCI-2020 corrosion inhibitors into concrete, Zagreb, Croacia, Septiembre-1993.
9. EYDELNANT, OSTROVSKI y DEMIDOV. Analysis of diffusion rate of migrating corrosion inhibitor MCI-2000 in concrete using radioactive isotope tagging techniques, Cortec Corporation - Institute of Construction Materials, Moscow, Russia, Septiembre-1993
10. STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, SHRP-S-658. Concrete bridge protection and rehabilitation: chemical and physical techniques field validation, National Research Council, Washington D.C. , Sept.-1993

11. WISS, JANEY, ELSTNER ASSOCIATES INC. Cracked-beam corrosion tests for Cortec Corporation, WJE No. 922041, Northbrook, IL , USA, 1994
12. WISS, JANEY, ELSTNER ASSOCIATES INC. CORROSION PROTECTION TESTS ON 3M SCOTH KOTE 911 FOR 3M COMPANY, WJE No. 840058, Northbrook, IL, USA, 1986
13. PROWELL, WEYERS y AL-QADI. Evaluation of corrosion inhibitors for the rehabilitation of reinforced concrete structures, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1991, Blacksburg, VA, USA
14. STRATEGIC HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, SHRP-S-666. Concrete bridge protection and rehabilitation: chemical and physical techniques corrosion inhibitors and polymers, National Research Council, Washington D.C - USA , Julio-1993.
15. RODRÍGUEZ, ORTEGA y. GARCÍA. Medida de la velocidad de corrosión de las armaduras en estructuras de hormigón , mediante un equipo desarrollado dentro del proyecto eureka EU-401, Seminario S5: Reparación de Estructuras de hormigón armado dañadas por corrosión, Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja-Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, Abril-1995.

16. GONZÁLEZ, J. Efectos de la corrosión en las estructuras de hormigón armado y medida de la misma, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas ( CENIM ) , Seminario S5: Reparación de Estructuras de hormigón armado dañadas por corrosión, Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja-Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 1995.
17. ASTM G 109-92. Determining the effects of chemical admixtures on the corrosion of embedded Steel reinforcement in concrete exposed to chloride environments, normas ASTM, Detroit-USA, 1992.
18. ASTM C 876-91. Standard test method for half cell potentials of uncoated reinforced steel in concrete, normas ASTM , Detroit-USA, 1991.
19. JONES, D. Principles and prevention of corrosion, Capitulo no. 3: Electrochemical kinetics of corrosion, Editorial Mcmillan, New York 1993, pp. 75-76.
20. HETTIARACHCHI y GAYNOR, corrosion inhibitors for rebar corrosion control, Revista Material Performance-NACE, Marzo-1992, pp 62-66.
21. CBANDO, H. Corrosión en armaduras de hormigón para postes de alumbrado eléctrico de la ciudad de Guayaquil, Tesis Ingeniero Mecánico, Guayaquil-Ecuador, 1994, pp. 83-88, 93-103.

22. ANDRADE, C. Vida útil de estructuras de hormigón armado: obras casi nuevas y deterioradas, Institute Of Construction Sciences «Eduardo Torroja», Seminario S5: Reparación de Estructuras de hormigón armado dañadas por corrosión, Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja-Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, Abril-1995.