

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Implementación de un Equipo de Campo para Análisis  
Cinético y Electroquímico en Hormigón Armado”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la Obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Wesley Badith Olaya Núñez

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2012

## **AGRADECIMIENTO**

A mi familia, amigos y compañeros que colaboraron de manera directa o indirecta en el desarrollo de este trabajo. A mis profesores, en especial al Ing. Julián Peña, por su guía y apoyo durante mis años de estudios.

## **DEDICATORIA**

A Dios, por sus bendiciones y amparo durante toda mi vida.

A mis padres y abuelos por ser fuente de mi inspiración y superación.

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



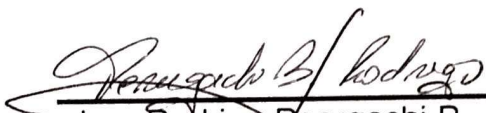
---

Ing. Gustavo Guerrero M.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE



---

Ing. Julián Peña E.  
DIRECTOR DE TESIS



---

Ing. Rodrigo Perugachi B.  
VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

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

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



---

WESLEY BADITH OLAYA NÚÑEZ

## RESUMEN

La importancia de analizar el estado, en términos de la corrosión, de las estructuras cercanas a su tiempo de vida útil o que presenten deterioros como el desprendimiento del concreto, por la expansión del óxido del metal en los casos de los hormigones armados, es de necesidad vital. La investigación presente tiene por objeto la implementación del Gecor 8, equipo portátil que mide la tasa de la corrosión, el potencial electroquímico y la resistividad del hormigón para conocer las fortalezas, con dicha tecnología, en la detección, en el sitio, de la velocidad de la corrosión del refuerzo metálico en el hormigón armado. La puesta en marcha consta de dos etapas: la primera incluye los preparativos para el uso del equipo y la segunda en la aplicación en campo del Gecor 8 para el estudio de la corrosión aplicada en las armaduras de las pilas de un puente.

En la primera etapa, se realizó una revisión de los principios de la corrosión del acero en el hormigón, y sus causas y efectos. Luego, se describen los equipos disponibles de monitoreo en el mercado, la tecnología implementada y las aplicaciones consecuentes; se elaboró un manual de procedimiento para los usuarios futuros de este equipo para los trabajos en

campo (inspección en los edificios, puentes y otros) después de haber probado y comprobado su calibración en el laboratorio.

La segunda etapa consiste en los procedimientos y ensayos *“in situ”* para evaluar, con el Gecor 8, el estado de conservación o deterioro estructural de las pilas del puente Portete de la ciudad de Guayaquil; se realizó: inspección visual, determinación de la profundidad de carbonatación, y mediciones de la resistividad del hormigón, potencial y corriente de la corrosión. Se compara, empleando un mapa equipotencial desarrollado en el software Matlab, los potenciales de corrosión con las resistividades eléctricas para descartar las zonas de las afectaciones posibles. Los resultados obtenidos indican un deterioro, en su mayoría, por defectos constructivos del puente corroborado, en las mediciones de la tasa de corrosión, con el equipo Gecor 8.

Finalmente, con la evaluación del estado del puente, se concluye el grado alto de confiabilidad y aportación del equipo, al incorporar las variables diversas de las mediciones, en los estudios de la corrosión; así mismo, se manifiestan las limitaciones al carecer de los planos estructurales para el análisis cinético.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN .....	I
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS .....	V
SIMBOLOGÍA .....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	X
ÍNDICE DE PLANOS .....	XII
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1	
1. CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS DE ACERO EN EL HORMIGÓN. ...	4
1.1. Principios Básicos .....	4
1.1.1. Corrosión del Acero en el Hormigón .....	5
1.1.2. Cinética de la Corrosión .....	10
1.2. Factores que Influyen en la Corrosión del Acero en el Hormigón .....	13
1.2.1. Características del Hormigón .....	13
1.2.2. Presencia de Cloruros.....	17
1.2.3. Carbonatación .....	20
1.2.4. Contenido en Humedad .....	22
1.3. Efectos de la Corrosión .....	24

## CAPÍTULO 2

2. TÉCNICAS EXPERIMENTALES DE MONITOREO EN CAMPO PARA MEDICIONES ELECTROQUÍMICAS.....	26
2.1. Equipos de Monitoreo.....	27
2.2. Técnicas Empleadas.....	30
2.3. Componentes y Aplicaciones del Equipo .....	33
2.4. Fortalezas del Equipo.....	35
2.5. Guía del Usuario .....	36

## CAPÍTULO 3

3. PROCEDIMIENTOS Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS .....	38
3.1. Inspección Visual .....	39
3.2. Profundidad de Carbonatación.....	62
3.3. Mapeo .....	67
3.3.1. Resistividad del Hormigón.....	71
3.3.2. Potencial de Corrosión .....	74
3.4. Corriente de Corrosión .....	79

## CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	85
---------------------------------	----

## CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	99
--	----

## APÉNDICES

## BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

A	Amperio
a/c	agua/cemento
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society Testing Materials
cm	Centímetro
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
Cl	Cloro
CSE	Copper sulfate electrode
Fe	Hierro
g	Gramo
kΩ.cm	Kilohmios por centímetro
LM	Lado Mercado
LP	Lado Policía Judicial
M	Mercado
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro cuadrado
mL	Mililitro
mm	Milímetro
mV	Milivoltios
pH	Potencial de hidrógeno
PJ	Policía Judicial
pulg	Pulgada
SHE	Standard hydrogen electrode
μA/cm <sup>2</sup>	Microamperio por centímetro cuadrado
V	Voltio

## SIMBOLOGÍA

%	Porcentaje
a	Peso atómico
$A_s$	Área superficial
B	Constante de Tafel
D	Diámetro
$\delta$	Densidad
E	Potencial eléctrico
F	Constante de Faraday
I	Corriente eléctrica
$i_{corr}$	Densidad de corriente de corrosión
k	Constante de carbonatación
N	Número equivalente
r	Tasa de corrosión
R	Resistencia
$R_p$	Resistencia a la polarización lineal
Ref.	Referencia
$\rho$	Resistividad
t	Tiempo
$V_{corr}$	Velocidad de corrosión
x	Profundidad carbonatada

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Diagrama de Pourbaix para el Fe a 25°C .....	8
Figura 1.2	Corrosión en las fisuras transversales y longitudinales .....	16
Figura 1.3	Coloración de la fenolftaleína en un hormigón con diferente pH debido a la carbonatación.....	21
Figura 1.4	Contenido de humedad de los poros de hormigón en función de la humedad .....	23
Figura 2.1	Gecor 8 .....	28
Figura 2.2	Galvapulse.....	29
Figura 2.3	Hormicor 400 .....	30
Figura 2.4	Circuito de media celda de cobre/sulfato de cobre .....	32
Figura 2.5	Medición de resistividad con el método de disco metálico.....	33
Figura 3.1	Pasos para la inspección en obra .....	39
Figura 3.2	Foto superior del puente .....	44
Figura 3.3	Vista frontal de la infraestructura del puente Portete .....	45
Figura 3.4	Vista superior de la pila del puente .....	46
Figura 3.5	Vista lateral izquierda de la pila del puente (LP) .....	46
Figura 3.6	Vista lateral derecha de la pila del puente (LM) .....	47
Figura 3.7	Foto de la pila 2 lado PJ con presencia de moluscos hasta una altura de 1.8 m.....	48
Figura 3.8	Rotura del hormigón (Foto P1-LP entre E2 y F2).....	50
Figura 3.9	Rotura del hormigón (Foto P1-LP-A2) .....	51

Figura 3.10 Rotura del hormigón (Foto P1-LM-G2) .....	52
Figura 3.11 Erosión del hormigón y corrosión en varillas (Foto P2-LP-G) ....	53
Figura 3.12 Desprendimiento del hormigón y corrosión en las varillas (Foto P2-LM entre C1 y D1) .....	55
Figura 3.13 Desprendimiento del hormigón y corrosión en las varillas (Foto P2-LM-G2) .....	56
Figura 3.14 Rotura del hormigón (Foto P3-LP entre B2 y C2) .....	57
Figura 3.15 Desprendimiento del hormigón y corrosión en las varillas (Foto P3-LM-A).....	58
Figura 3.16 Varilla corroída (Foto P4-LP-F1) .....	59
Figura 3.17 Presencia de corrosión (Foto P4-LP entre E1-F1) .....	60
Figura 3.18 Desprendimiento del hormigón (Foto P4-LM-A1).....	61
Figura 3.19 Rotura del hormigón (Foto P4-LM-E1) .....	62
Figura 3.20 Foto de la medición de profundidad de la carbonatación en P3- LP-B2 .....	65
Figura 3.21 Valores límites para nivel de riesgo en mapeo .....	67
Figura 3.22 Pantalla para datos de mapeo .....	69
Figura 3.23 Colocación del sensor B en el punto de medición .....	70
Figura 3.24 Pantalla de datos para mediciones en estructuras sumergidas o muy húmedas .....	81
Figura 3.25 Control del equipo Gecor 8 .....	82
Figura 4.1 Líneas de etapas de fundición en la pila 2 lado mercado .....	86

Figura 4.2	Cuatro columnas de la pila 4 lado PJ.....	88
Figura 4.3	Mapa equipotencial P1-LP.....	89
Figura 4.4	Mapa equipotencial P1-LM.....	90
Figura 4.5	Mapa equipotencial P2-LP.....	91
Figura 4.6	Mapa equipotencial P2-LM.....	92
Figura 4.7	Mapa equipotencial P3-LP.....	93
Figura 4.8	Mapa Equipotencial P3-LM.....	94
Figura 4.9	Mapa equipotencial P4-LP.....	95
Figura 4.10	Mapa equipotencial P4-LM.....	96

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Serie electroquímica (Potenciales de reducción) .....	6
Tabla 2	Productos de la reacción del hierro debido al proceso de la corrosión .....	10
Tabla 3	Velocidades comunes de la corrosión para las estructuras de acero en los climas templados.....	13
Tabla 4	Valores límites de la resistividad.....	24
Tabla 5	Resumen de métodos de medición.....	34
Tabla 6	Severidad y clase de exposición para la categoría C según la norma ACI-318.....	42
Tabla 7	Profundidad de carbonatación .....	66
Tabla 8	Resistividad del hormigón en la pila 1 lado PJ (k $\Omega$ ·cm) .....	71
Tabla 9	Resistividad del hormigón en la pila 1 lado M (k $\Omega$ ·cm) .....	71
Tabla 10	Resistividad del hormigón en la pila 2 lado PJ (k $\Omega$ ·cm) .....	72
Tabla 11	Resistividad del hormigón en la pila 2 lado M (k $\Omega$ ·cm) .....	72
Tabla 12	Resistividad del hormigón en la pila 3 lado PJ (k $\Omega$ ·cm) .....	72
Tabla 13	Resistividad del hormigón en la pila 3 lado M (k $\Omega$ ·cm) .....	73
Tabla 14	Resistividad del hormigón en la pila 4 lado PJ (k $\Omega$ ·cm) .....	73
Tabla 15	Resistividad del hormigón en la pila 4 lado M (k $\Omega$ ·cm) .....	73
Tabla 16	Potencial de corrosión en la pila 1 lado PJ (mV).....	74
Tabla 17	Potencial de corrosión en la pila 1 lado M (mV).....	74

Tabla 18	Potencial de corrosión en la pila 2 lado PJ (mV).....	75
Tabla 19	Potencial de corrosión en la pila 2 lado M (mV).....	76
Tabla 20	Potencial de corrosión en la pila 3 lado PJ (mV).....	76
Tabla 21	Potencial de corrosión en la pila 3 Lado M (mV).....	77
Tabla 22	Potencial de corrosión en la pila 4 lado PJ (mV).....	77
Tabla 23	Potencial de corrosión en la pila 4 lado M (mV).....	78
Tabla 24	Corriente de corrosión en las pilas del puente Portete .....	83
Tabla 25	Velocidad de corrosión en las pilas del puente Portete .....	84

## ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1	Cuadrícula de la pila 1 del puente Portete
Plano 2	Cuadrícula de la pila 2 del puente Portete
Plano 3	Cuadrícula de la pila 3 del puente Portete
Plano 4	Cuadrícula de la pila 4 del puente Portete

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existen edificaciones con hormigón armado construidas hace más de 30 años condición que genera la necesidad de realizar estudios de corrosión para evaluar el estado de conservación o deterioro de dichas estructuras con acero en el hormigón para corroborar sus durabilidades y prevenir cualquier daño futuro que se produzca.

El *Laboratorio de Ensayos Metrológicos y de Materiales* (LEMAT), de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, FIMCP, de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, consciente de que es necesario el empleo de equipos de última tecnología para la evaluación de las estructuras de acero, adquirió el equipo Gecor 8 que emplea un método moderno para la inspección de las estructuras en servicio.

El equipo referido permite realizar las mediciones *“in situ”* de la tasa de corrosión del acero, el potencial de la corrosión y la resistividad del hormigón; es un potencióstato portátil de manejo fácil que ayuda a diagnosticar, de una manera fácil y eficiente, los daños producidos por la corrosión en las armaduras.

Por tal razón, el aprendizaje del manejo de este equipo es un objetivo importante a cumplirlo en vista de que fue adquirido recientemente por el LEMAT. Adicionalmente, se aprovecha la utilización del equipo para diagnosticar el grado de corrosión de las armaduras de acero en las pilas del puente Portete mediante el uso de ensayos no destructivos con la finalidad de conocer las fortalezas del equipo al momento de realizar un monitoreo en campo.

En el primer capítulo, se describe los conceptos de corrosión que incluye la parte electroquímica para luego abordar la cinética. Luego, se describen las variables que afectan la corrosión, entre las cuales, constan las características del hormigón, la presencia de cloruros en el medio, el avance en la profundidad de carbonatación y la humedad en el hormigón.

En el segundo capítulo, se hace una revisión de los equipos de monitoreo actuales y su aportación a los estudios de corrosión. Entre las técnicas que implementan, se incluye la polarización lineal, el pulso potencioestático, el pulso galvanostático, la media celda y el disco para resistividad. A su vez, se describen las fortalezas y el desarrollo de una guía del equipo Gecor 8.

En el tercer capítulo, se describe la importancia de realizar una inspección integral de la estructura con la selección de los ensayos y procedimientos

necesarios para una correcta evaluación. Además, se incluye el método y los resultados obtenidos de la inspección visual, la determinación de la profundidad de carbonatación, y las mediciones de la resistividad del hormigón, el potencial y la corriente de la corrosión, del puente Portete.

En el cuarto capítulo, se integran las diversas variables y hallazgos obtenidos del capítulo anterior para el análisis del puente en términos de corrosión y así conocer la aportación del equipo Gecor 8 en estos tipos de estudio.

En el quinto capítulo, se presentan las conclusiones de la implementación del equipo y las recomendaciones para el desarrollo de las prácticas de laboratorio de los estudiantes y las investigaciones para las tesis futuras en la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

# CAPÍTULO 1

## 1. CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS DE ACERO EN EL HORMIGÓN.

### 1.1. Principios Básicos

La corrosión es el resultado destructivo de una reacción química entre un metal o aleación y su ambiente<sup>(1)</sup>.

Existen dos tipos de corrosión: seca o a altas temperaturas y húmeda o electroquímica. La corrosión más común es electroquímica, la cual ocurre en un medio acuoso a temperaturas por debajo del punto de rocío. Para el trabajo presente, es importante conocer la reacción electroquímica que ocurre en el acero detallada en el *Capítulo 1.1.1*.

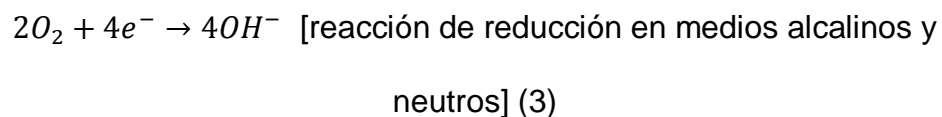
De manera general, en la corrosión electroquímica intervienen una reacción de oxidación y otra de reducción. Para que esto ocurra, debe haber una zona de disolución del metal (anódica) y una zona que queda inalterada (catódica) conectadas entre sí e inmersas en

el electrolito para producir un circuito cerrado en el cual los iones viajan por el electrolito.

La zona anódica, donde se produce la oxidación del metal, está regida por la siguiente reacción:



Los electrones producidos en la zona anódica viajan por el metal hasta la zona catódica donde reacciona con una sustancia del electrolito como se muestra a continuación:



### 1.1.1. Corrosión del Acero en el Hormigón

Los metales tienen tendencias diferentes a oxidarse, dependiendo de la estabilidad que tengan en el medio en que se encuentran. Por tanto, existe una serie

electroquímica que ordena la tendencia a oxidarse tomando como referencia la oxidación del hidrógeno que se muestra en la Tabla 1.

**TABLA 1**  
**SERIE ELECTROQUÍMICA (POTENCIALES DE REDUCCIÓN)**

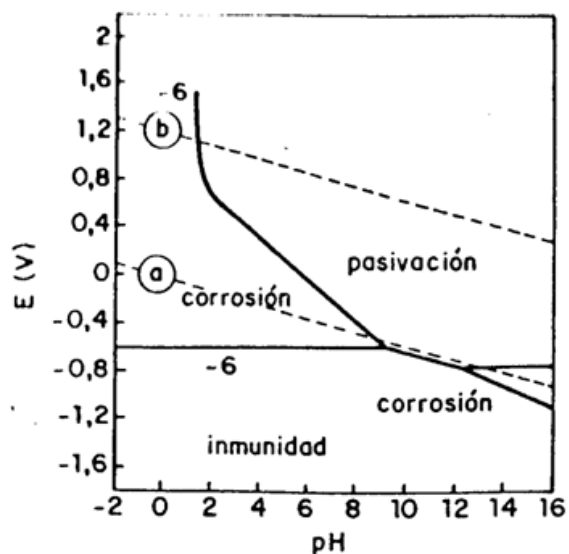
		Potencial Estándar* (V vs. SHE)
Noble	$Au^{3+} + 3e^{-} = Au$	+1.498
	$Ag^{+} + e^{-} = Ag$	+0.799
	$Cu^{2+} + 2e^{-} = Cu$	+0.377
	$2H^{2+} + 2e^{-} = H_2$	0.000
	$Pb^{2+} + 2e^{-} = Pb$	-0.126
	$Fe^{2+} + 2e^{-} = Fe$	-0.440
	$Zn^{2+} + 2e^{-} = Zn$	-0.763
Activo	$Al^{3+} + 3e^{-} = Al$	-1.662

\*Potenciales de Electrodo Estándar y Coeficiente de Temperatura a 25°C <sup>(1)</sup>

La corrosión del acero en el hormigón es un proceso electroquímico. Los potenciales electroquímicos que forman las pilas de corrosión se pueden generar de dos formas<sup>(2)</sup>:

- Las pilas de composición, se pueden formar cuando se colocan dos metales diferentes dentro del hormigón, como las armaduras de acero y los conductos de aluminio, o cuando existen variaciones significativas en las características superficiales del acero.
- Las pilas de concentración, se pueden formar debido a las diferencias en la concentración de los iones disueltos cerca del acero, como los álcalis, cloruros o el oxígeno.

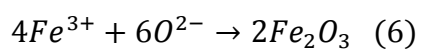
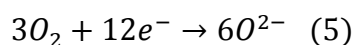
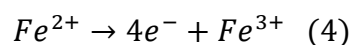
La reacción de corrosión ocurre en un medio acuoso, que dependerá de las reacciones con los iones del agua, por lo cual dependerá del pH que posea el medio en que se encuentra. El diagrama de Pourbaix presenta el equilibrio del potencial de la corrosión y el pH.



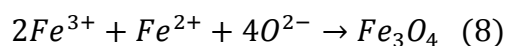
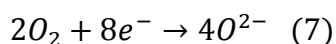
**FIGURA 1.1: DIAGRAMA DE POURBAIX PARA EL  
HIERRO A 25°C <sup>(3)</sup>**

En la *Figura 1.1*, se presenta el diagrama Pourbaix para el hierro a 25°C, en la cual se observan tres zonas diferentes: corrosión, pasividad e inmunidad. La zona de pasividad, se refiere a que el metal está recubierto por una capa estable de óxido que actúa de barrera impidiendo la oxidación posterior. En la zona de inmunidad, el metal no se corroe al no haber las condiciones termodinámicas necesarias. El diagrama no propicia predecir la velocidad de corrosión del metal, pero permite tener una idea del estado en que se encuentra el metal.

El acero en el hormigón se encuentra en la zona pasiva mientras se mantenga una alcalinidad alta del medio. La pasividad se mantendrá en el acero debido a que posee dos protecciones, una física por el espesor del recubrimiento y otra química por el valor del pH del hormigón (alrededor de 13). De esta manera, se produce una reacción que genera óxido ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que protegerá al acero que se muestra a continuación<sup>(4)</sup>:



Sin embargo, la capa pasiva consiste no sólo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , sino que es una mezcla de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  con hidratos del cemento. Pero, el  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  no es un óxido pasivo, ya que su porosidad es muy elevada comparada con la del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . La formación del  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , se representa así<sup>(4)</sup>:



Una vez que se ha producido la acción de los iones  $\text{Cl}^-$  y al disponer de suficiente oxígeno; se producen las reacciones que generan los productos que se muestran en la Tabla 2 con su coloración visual respectiva.

**TABLA 2**  
**PRODUCTOS DE LA REACCIÓN DEL HIERRO DEBIDO**  
**AL PROCESO DE LA CORROSIÓN**

#	Producto	Formula	Color
1	Hidróxido ferroso	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Verdoso
2	Óxido ferroso-férrico	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	Negro
3	Hidróxido ferroso	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	Rojizo

### 1.1.2. Cinética de la Corrosión

En la sección anterior, se mencionó la manera de saber si el acero se está corroyendo o si se encuentra en un estado de pasividad o inmunidad; sin embargo, para determinar la vida residual o durabilidad que posee el metal es necesario conocer cuánto se está corroyendo.

La corrosión del acero es una reacción electroquímica que produce o consume electrones; por ende, el flujo de los electrones es una medida de la velocidad de la reacción. El

flujo de electrones es medido como corriente,  $I$ . La proporcionalidad entre  $I$  y la masa que reacciona,  $m$ , en una reacción electroquímica, está establecida por la Ley de Faraday<sup>(1)</sup>:

$$m = \frac{Ita}{nF} \quad (9)$$

Donde

$F$  es la constante de Faraday (96500 Coulombs/equivalente),

$n$  es el número de equivalentes intercambiados,

$a$  es el peso atómico en g/mol

y  $t$  es el tiempo en segundos.

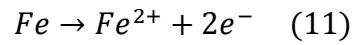
Dividiendo la ecuación 9 para el tiempo  $t$  y área superficial

$A_s$ , se obtiene la tasa de corrosión  $r$ <sup>(1)</sup>:

$$r = \frac{m}{tA_s} = \frac{ia}{nF} \left[ \frac{g}{m^2s} \right] \quad (10)$$

Donde  $i$  es la densidad de corriente ( $I/A_s$ ) en  $A/m^2$ .

La reacción anódica del acero, se obtiene de la Tabla 1:



De la ecuación 11, se obtiene que el número equivalente es  $n = 2$  y la masa molar del hierro es  $a = 55.8$  g/mol. Reemplazando estos valores en la ecuación 7 y al dividir la expresión para la densidad del acero  $\delta=7.87$  g/m<sup>3</sup>, se obtiene la velocidad de corrosión,  $V_{corr}$ , como se muestra a continuación:

$$V_{corr} = \frac{ia}{\delta nF} = \frac{55.8i}{7.87 \times 2 \times 96500} = 3.67 \times 10^{-5}i \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$$V_{corr} = 3.67 \times 10^{-5}i \left[ \frac{m}{s} \times \frac{3600s}{1h} \times \frac{24h}{1día} \times \frac{365.25día}{1año} \right]$$

$$V_{corr} = 1158i \left[ \frac{m}{año} \right] \quad (12)$$

Usualmente, la densidad de corriente  $i$  no suele estar expresada en A/m<sup>2</sup> sino en  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ; tomando en cuenta  $i_{corr}$  como densidad de corriente de la corrosión, se determina que la velocidad de la corrosión es:

$$V_{corr} = 0.0116i_{corr} \left[ \frac{mm}{año} \right] \quad (13)$$

Estas velocidades varían de acuerdo a la actividad de la corrosión presente en el acero; sin embargo, a continuación se muestran las velocidades típicas de corrosión presente en las armaduras de acero en ambientes marinos en el Reino Unido según la norma BS 6349-1:

**TABLA 3**  
**VELOCIDADES COMUNES DE LA CORROSIÓN PARA**  
**LAS ESTRUCTURAS DE ACERO EN LOS CLIMAS**  
**TEMPLADOS <sup>(5)</sup>**

Exposición	Velocidad de corrosión mm/lado/año	
	Promedio	Límite superior
Zona aérea	0.04	0.10
Zona de salpicadura	0.08	0.17
Zona de marea	0.04	0.10

## 1.2. Factores que Influyen en la Corrosión del Acero en el Hormigón

### 1.2.1. Características del Hormigón

El hormigón es uno de los factores principales que influencia la corrosión del acero porque éste supone una capa protectora del acero debido básicamente a dos causas: el

recubrimiento como una barrera física y la alcalinidad del hormigón genera una capa pasiva en el acero<sup>(3)</sup>.

Entre los factores que intervienen durante la elaboración del hormigón que producirán, posteriormente, la corrosión del acero están:

- Contenido de cemento
- Tipo de cemento

Los factores que influyen después de la fabricación del hormigón son:

- Espesor de recubrimiento
- Fisuras en el hormigón

A continuación, se describen de manera breve los cuatro aspectos mencionados y sus influencias.

### **Contenido del cemento**

La relación agua/cemento ( $a/c$ ) influye en la permeabilidad, porque; para relaciones altas  $a/c$ , existe una mayor porosidad capilar que permite tener una permeabilidad mayor. Al aumentar la permeabilidad, los iones cloruros

pueden avanzar más rápidamente hacia la varilla. Este efecto se analiza posteriormente.

### **Tipo de cemento**

La alcalinidad del hormigón confiere una protección de pasividad al acero, siendo los productos alcalinos dependientes del tipo de cemento.

### **Espesor del recubrimiento**

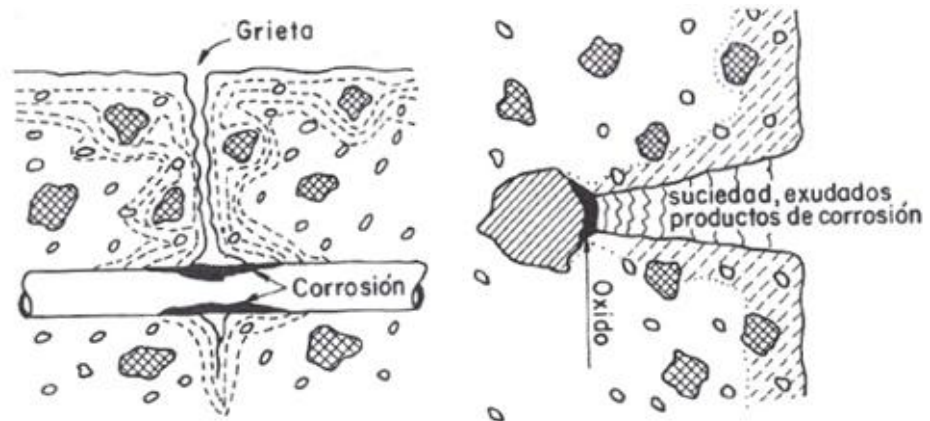
El espesor del recubrimiento es uno de los factores más importantes para prevenir la corrosión, siempre y cuando no haya fisuras de gran ancho.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción, actualizada en el 2011, establece en el *Capítulo 4.11.3.3 Colocación del Acero de Refuerzo* que el refuerzo debe ser colocado a una distancia mínima de la superficie del hormigón que se indica en el Capítulo 7 del ACI 318<sup>(6)</sup>. A su vez, el Capítulo 7 del ACI 318 establece el espesor mínimo de recubrimiento dependiendo del medio en que vaya a ser construida la estructura, considerando un valor mayor en el caso de una construcción en un medio altamente corrosivo como es el

caso del las pilas de un puente en el agua del mar, para tener un mejor aislamiento del refuerzo del acero con el ambiente externo.

### **Fisura en el hormigón**

Las fisuras que puedan presentarse en el hormigón representan un acceso rápido de los cloruros, la humedad y el oxígeno a la armadura. En la *Figura 1.2*, se observa que cuando estos componentes alcanzan el acero, éste se empieza a corroer en esa parte comportándose como una zona anódica; en los alrededores, se forma una zona catódica.



**FIGURA 1.2: CORROSIÓN EN LAS FISURAS  
TRANSVERSALES Y LONGITUDINALES <sup>(3)</sup>**

Existen diversos estudios y normas que recomiendan y especifican un ancho máximo de la fisura con la cual no afectaría de manera significativa la vida útil de la armadura. Un ancho de fisura de 4 mm o inferior ocasionaría la obturación de los productos propios de la corrosión y no suponen un riesgo mayor<sup>(3)</sup>.

### **1.2.2. Presencia de Cloruros**

Los iones cloruros tienen la capacidad de destruir puntualmente la capa pasiva del óxido y propicia la corrosión por picaduras, por lo cual, se considera una corrosión de tipo localizada. Estos defectos, se comportan como ánodos de la pila de corrosión y pueden avanzar, en profundidad, hasta lograr la rotura de la varilla.

Los cloruros pueden estar presentes en el hormigón debido a muchas causas, como por ejemplo<sup>(8)</sup>:

- Contaminación
  - Adición deliberada de aceleradores de cloruro de calcio
  - Uso deliberado del agua del mar en la mezcla

- Uso accidental de un agregado inapropiadamente lavado con el agua marina.
- Penetración
  - Sal para el deshielo
  - Agua salada
  - Cloruros de un proceso químico

Los mecanismos de transporte mediante el cual el ión cloruro penetra el hormigón son por absorción capilar, presión hidrostática y difusión<sup>(9)</sup>. El mecanismo más conocido es la difusión, el movimiento de los iones cloruros bajo un gradiente de concentración. Para que esto ocurra, el hormigón debe de tener una fase líquida continua y debe haber un gradiente de concentración del ión cloruro.

El método más común de transporte inicial del ión cloruro es la absorción. La superficie del hormigón se encuentra expuesta al ambiente, en el cual tendrá ciclos de humectación y secado. Cuando el agua con cloruros encuentra la superficie seca, será succionado, a través de los poros, debido a la capilaridad.

De los tres mecanismos de transporte mencionados que pueden transportar iones cloruro en el interior del hormigón hasta el nivel de la varilla, el principal método es la difusión<sup>(9)</sup>.

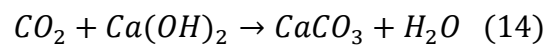
El modelo Tuutti sugiere que el tiempo que tardarán los cloruros en llegar a la armadura dependerá de<sup>(3)</sup>:

- La concentración de los cloruros en el medio exterior.
- La naturaleza del catión que acompaña al cloruro.
- La calidad del hormigón, el tipo de cemento, la relación a/c, etc.
- La temperatura.
- El ancho y la cuantía de las fisuras.

Lo mencionado lleva a la pregunta de cuál es, entonces, el contenido crítico de los cloruros que promoverá la corrosión activa del acero, el cual no se ha establecido un valor único debido a que depende de diversos factores tanto del hormigón como acero.

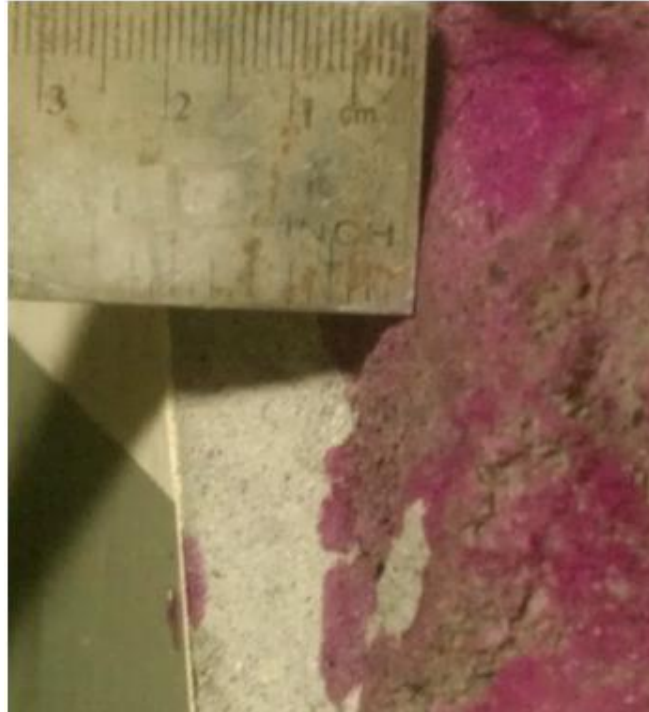
### 1.2.3. Carbonatación

Es el proceso de penetración del  $\text{CO}_2$  en el hormigón. La protección del acero, se pierde debido a la reducción de la alcalinidad del hormigón<sup>(8)</sup>. El proceso ocurre al reaccionar el  $\text{CO}_2$  del aire con el hormigón como se muestra a continuación:



Lo que ocasiona una reducción del pH al consumir el hidróxido de calcio y producir carbonato de calcio, que puede reducir el pH a valores inferiores que 9<sup>(10)</sup>, ocasionando que el acero salga de su zona de pasividad como se explicó en el diagrama de Pourbaix.

La carbonatación avanza creando un frente en que se diferencian dos zonas, una en la cual el pH es menor que 9 y otra el pH se mantiene por encima de 13. Este fenómeno se lo visualiza de mejor manera utilizando un indicador llamado fenolftaleína incolora en la zona carbonatada y rojo-púrpura cuando se encuentra alcalina como se aprecia en la *Figura 1.3*.



**FIGURA 1.3: COLORACIÓN DE LA FENOLFTALEÍNA EN UN HORMIGÓN CON DIFERENTE PH DEBIDO A LA CARBONATACIÓN**

La velocidad de avance de la carbonatación es un proceso lento que obedece la siguiente ley:

$$x = k\sqrt{t} \quad (15)$$

En donde:

- x: es la profundidad carbonatada.

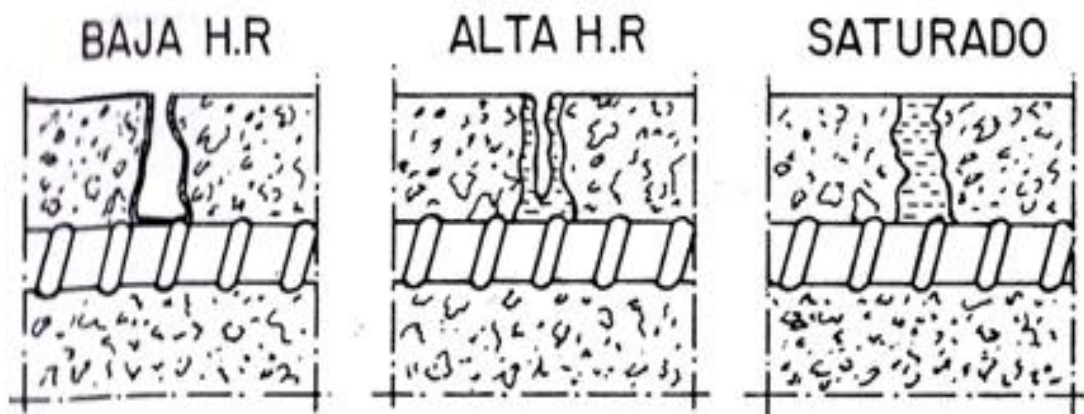
- k: es una constante de carbonatación que depende de muchos factores como la calidad del hormigón, resistencia mecánica del hormigón y humedad ambiental.<sup>(3)</sup>
- t: es el tiempo transcurrido desde la fabricación.

#### 1.2.4. Contenido en Humedad

El hormigón tiene la propiedad de ser un material que absorbe fácilmente la humedad; aunque, por el otro lado, se seca lentamente. En los casos, en los cuales, la humedad ambiental varía frecuentemente, el hormigón no alcanza a secarse por completo; esto es un aspecto fundamental al evaluar los potenciales de la corrosión<sup>(11)</sup> tal como lo indica la Norma ASTM C876.

El contenido en humedad es un aspecto importante para la velocidad de corrosión. Se observa en la *Figura 1.4*, cuando el hormigón se encuentra completamente saturado (resistividad baja), el acceso del oxígeno es limitado al tener que disolverse primero en el agua y, por ende, las velocidades de corrosión serán bajas o moderadas como son los casos de las zonas sumergidas en las estructuras.

En cambio, cuando existe poca humedad (resistividad alta) el proceso de corrosión es lento; por lo cual, las velocidades de corrosión serán mayores cuando la humedad es alta pero no lo suficiente para mantener los poros saturados.



**FIGURA 1.4: CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS POROS DE HORMIGÓN EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD <sup>(3)</sup>**

La resistividad es una medida de la humedad en el hormigón que describe la resistencia al flujo de la corriente; se evidencia en la presencia de los poros que permitirán almacenar la humedad ambiental y dependerá de la relación agua/cemento usada en la elaboración del concreto.

La relación resistividad del concreto y corrosión, se muestra en la Tabla 4.

**TABLA 4**  
**VALORES LÍMITES DE LA RESISTIVIDAD <sup>(12)</sup>**

Resistividad (k $\Omega$ .cm)	Tasa posible de corrosión
<b>&gt; 100 – 200</b>	No se puede distinguir entre el acero activo o pasivo – corrosión insignificante, hormigón muy seco.
<b>50 – 100</b>	Tasa baja de corrosión.
<b>10 – 50</b>	Corrosión moderada a alta donde el acero está activo.
<b>&lt; 10</b>	La resistividad no es el parámetro que controla la corrosión.

### 1.3. Efectos de la Corrosión

Los efectos que produce la corrosión en el acero incide en tres aspectos: disminución de la capacidad mecánica del mismo, presentación de fisuras en el hormigón y pérdida de la adherencia con el hormigón.

La pérdida de las propiedades mecánicas, se debe a la reducción de la sección transversal de la varilla, disminuyendo su resistencia mecánica y propiedad de elongación.

El proceso que ocurre en el acero, como se lo explicó en el *Capítulo 1.1.2*, genera la formación de productos que dependiendo de su composición química causarán daño en la estructura. Tal es el caso del óxido de hierro, que puede expandirse cuando hay oxígeno suficiente disponible, causando fisuras o desprendimientos del hormigón. Este fenómeno, se produce debido a la aparición de tensiones radiales ejercidas sobre el hormigón en forma de tracción.

Por otra parte, la generación de las fisuras no siempre es causada de los productos de la corrosión del acero, porque en las estructuras donde el hormigón posee una humedad alta, los óxidos pueden emigrar a través de la red de poros hasta la superficie y aparecer en forma de manchas que pueden o no coincidir con el lugar donde se produjo la corrosión.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. TÉCNICAS EXPERIMENTALES DE MONITOREO EN CAMPO PARA MEDICIONES ELECTROQUÍMICAS**

En una estructura de hormigón armado, inicialmente, el acero está protegido por la alcalinidad del hormigón; sin embargo, los diversos factores ambientales pueden provocar que con el tiempo, se altere esta pasividad y sea necesario conocer los estados, actual y futuro, de la estructura de acero. Existen técnicas diferentes de monitoreo en campo que permiten detectar esta situación

Existen equipos que permiten realizar la inspección de las varillas de acero en el hormigón sin la necesidad de realizar los procedimientos tradicionales de rotura exploratoria y aleatoria del hormigón. A continuación, se describirán los equipos diferentes que existen en el mercado para luego proceder con la descripción del equipo adquirido por el LEMAT.

## **2.1. Equipos de Monitoreo**

Las tecnologías actuales han permitido, a diferentes empresas, desarrollar equipos de monitoreo a base de sus estudios, investigaciones y experiencias adquiridas durante sus años en el mercado. Las técnicas pueden variar de acuerdo al fabricante así como sus componentes.

La versatilidad de estos equipos de monitoreo es que son potenciostatos portátiles. Un potenciostato es un equipo que permite determinar la corriente de corrosión al aplicar una corriente de polarización para controlar el potencial entre un electrodo de trabajo y un electrodo de referencia; sin embargo, es utilizado, en laboratorio, al procesar la información proveniente de varias mediciones para un mismo punto. Los equipos de monitoreo realizan automáticamente estas mediciones para reportar el resultado final de la corriente de corrosión; además, al ser compactos, pueden ser usados fácilmente para los trabajos en campo.

Entre los equipos disponibles de monitoreo en campo en el mercado se encuentran: Gecor, GalvaPulse, Hormicor 400, entre otros.

El Gecor 8 es desarrollado por la compañía GEOCISA con la colaboración del Instituto Eduardo Torroja y se muestran sus componentes en la *Figura 2.1*.



**FIGURA 2.1: GECOR 8**

El Galvapulse es desarrollado por FORCE Technology y permite determinar la velocidad de corrosión, el potencial de corrosión y la resistividad del hormigón.



**FIGURA 2.2: GALVAPULSE<sup>(13)</sup>**

El Hormicor 400 mide el potencial de corrosión, densidad de corriente de corrosión de las armaduras, resistividad eléctrica del hormigón, disponibilidad de oxígeno, contenido de cloruro y temperatura en el interior de la estructura.



**FIGURA 2.3: HORMICOR 400<sup>(14)</sup>**

El equipo utilizado en el trabajo presente es el Gecor 8 que será descrito en las siguientes secciones del Capítulo 2.

## **2.2. Técnicas Empleadas**

El funcionamiento del equipo se basa en principios electroquímicos entre los cuales constan los métodos siguientes: polarización lineal, pulso potencioestático, pulso galvanostático, media celda y disco para resistividad.

### **Método de polarización lineal (Pulso potencioestático y pulso galvanostático)**

La polarización lineal es un método electroquímico que permite obtener la tasa de corrosión. El procedimiento consiste en aplicar, a la muestra, una señal de voltaje muy cercano al potencial de

corrosión. A partir de la pendiente de una gráfica de corriente versus potencial, se obtiene la resistencia de polarización lineal ( $R_p$ ). Donde la corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) es inversamente proporcional al valor de la pendiente ( $R_p$ ) y B es la constante de Tafel<sup>(1)</sup>:

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} = \frac{B}{i_{corr}} \quad (13)$$

Existen dos maneras de llevar a cabo el ensayo, como:

- Galvanostato: se aplica una variación de corriente y mide la variación de potencial.
- Potenciostato: se aplica una variación de potencial y mide la variación de corriente.

### **Método de media celda**

El método de media celda implica la medición de un potencial de una varilla de acero, en el hormigón, con respecto a una media celda colocada por encima de la varilla, en la superficie del hormigón, con el propósito de determinar la actividad de la corrosión en el acero. La media celda es usualmente de cobre/sulfato de cobre o plata/cloruro de plata. El método, se limita

a un circuito eléctrico por lo cual un extremo debe estar conectado a una varilla descubierta como se muestra en la *Figura 2.4*.



**FIGURA 2.4: CIRCUITO DE MEDIA CELDA DE COBRE/SULFATO DE COBRE**

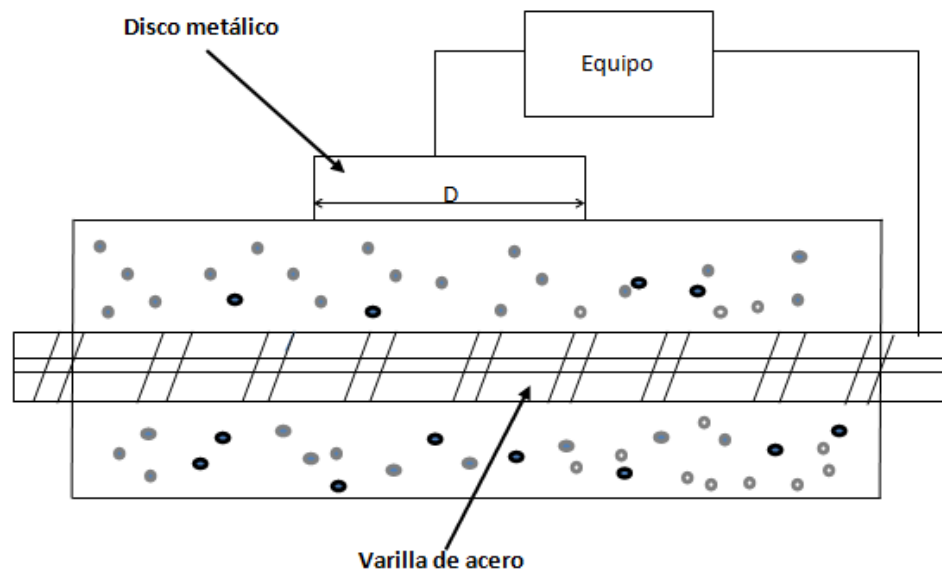
### **Método de disco para resistividad**

Esta técnica consiste en formar un circuito, en el cual, se coloca un disco metálico sobre la superficie del hormigón y por el otro extremo, se conecta a una varilla de acero. Luego, se aplica un pulso de corriente o un incremento de potencial para medir la

resistencia (R) que existe, dando como resultado la resistividad ( $\rho$ )<sup>(15)</sup>:

$$\rho = 2RD \quad (14)$$

Donde D es el diámetro del disco metálico.



**FIGURA 2.5: MEDICIÓN DE RESISTIVIDAD CON EL MÉTODO DE DISCO METÁLICO**

### 2.3. Componentes y Aplicaciones del Equipo

El Gecor 8, adquirido por el LEMAT, consta de un dispositivo medidor de la tasa de corrosión al cual se le puede incorporar tres

diferentes tipos de sensores (con electrodos de cobre/sulfato de cobre).

Los sensores tienen diferentes aplicaciones que se acoplan al tipo de trabajo que se quiere realizar y la aplicación de acuerdo a las condiciones de la estructura. La clasificación que dispone el equipo es mapeo, mediciones en estructuras aéreas (estructuras no sumergidas), mediciones en estructuras sumergidas o muy húmedas y mediciones en estructuras con protección catódica.

**TABLA 5**  
**RESUMEN DE MÉTODOS DE MEDICIÓN<sup>(16)</sup>**

Sensor	Aplicación	Técnica	Mediciones
A	Mediciones en estructuras aéreas.	Técnica de confinamiento modulado <b>(MCT)</b>	Tasa de corrosión Potencial de corrosión Resistencia eléctrica del hormigón
	Medición en estructura con protección catódica.	Técnica de verificación por pasividad. <b>(PVT)</b>	Potencial de corrosión Eficiencia de protección
		Técnica de apagado instantáneo <b>(IOT)</b>	Potencial instantáneo Potencial inicial Potencial final
B	Mapeo	Mapeo	Potencial de corrosión Resistividad Nivel de riesgo
C	Mediciones en estructuras sumergidas o muy húmedas	Técnica de atenuación del potencial <b>(APT)</b>	Tasa de corrosión Potencial de corrosión Resistencia eléctrica de concreto Resistividad

La aplicación primordial es el mapeo basado en el método de la media celda para el potencial de corrosión y el método de disco para la resistividad del hormigón. Con este tipo de medición, se puede realizar un análisis rápido de la estructura y detectar las zonas que requieren un mayor estudio.

Dependerá del sitio donde se desee determinar la velocidad de corrosión para proceder a usar el sensor indicado. Para el caso de la estructura aérea, la corriente de la corrosión, se determina con el método de pulso galvanostático; para el caso de la estructura sumergida, la corriente de la corrosión, se obtiene con el método de pulso potencioestático; para estructuras con protección catódica, se basa en el análisis de impedancia.

#### **2.4. Fortalezas del Equipo**

El equipo posee la ventaja de que se pueden programar las mediciones, reduciendo el tiempo de operación del equipo en campo. Esto es de ayuda en los casos para los cuales el horario de trabajo es limitado como en el estudio de las pilas de un puente, pues las horas disponibles son pocas debido a que se trabaja durante la marea baja para tener acceso a todas las zonas de la pila.

Posee un cable doble 8 m de extensión; un extremo se conecta a la varilla y el otro al sensor, lo que permite trabajar cómodamente en un radio de 14 m, distancia pertinente porque las estructuras pueden presentar una discontinuidad en las conexiones entre las varillas.

La batería interna tiene una duración de 8 horas que es tiempo suficiente para un día laborable; el equipo permanece prendido durante las mediciones y apagado durante el traslado de un lugar a otro.

El mantenimiento del equipo es sencillo, se debe tener la precaución de cargar los electrodos con sulfato de cobre antes de cada trabajo y descargarlos cuando sea usado por un periodo mayor a una semana.

## **2.5. Guía del Usuario**

En primer lugar, se realizó la puesta en marcha del equipo en el laboratorio donde se realizaron todos los pasos para la utilización del mismo, entre los cuales constan: preparación y llenado de los electrodos con sulfato de cobre, comprobación de la calibración del

equipo y mediciones realizadas en hormigón armado disponible en el laboratorio.

Además, se realizó la traducción del manual de instrucción provisto por el fabricante de manera que esté al acceso de cualquier persona sin importar su nivel de inglés. Este documento, anexo en el Apéndice A, contiene la descripción detallada de los componentes, la manera de proceder para iniciar una medición, los pasos a seguir en el equipo para cada aplicación, los detalles del mantenimiento, el control del equipo y las soluciones a los errores que pueden presentar, el equipo, al momento de tomar una medición.

Otro aporte que se realizó fue la creación de los procedimientos de ensayo y equipo para el LEMAT con el formato que indica su estándar de calidad.

Con la documentación previa, se aporta con los detalles y pasos suficientes para que cualquier usuario sea capaz de manejar el equipo; siempre que la inspección sea supervisada por un especialista en corrosión.

## CAPÍTULO 3

### 3. PROCEDIMIENTOS Y ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

En los capítulos anteriores se indicaron y analizaron los factores que influyen a la corrosión de la armadura del hormigón, así como los principios de los métodos de monitoreo. A continuación, se detallarán los procedimientos que hacen posible la detección de la corrosión. Para ello, una inspección integral, que tenga un grado alto de confianza y afectación mínima a la estructura, es de suma importancia; debido a que la evaluación obtenida de la inspección de la estructura, servirá para plantear una solución al problema que presente.

Las etapas para una inspección en campo son mostradas en la *Figura 3.1*.

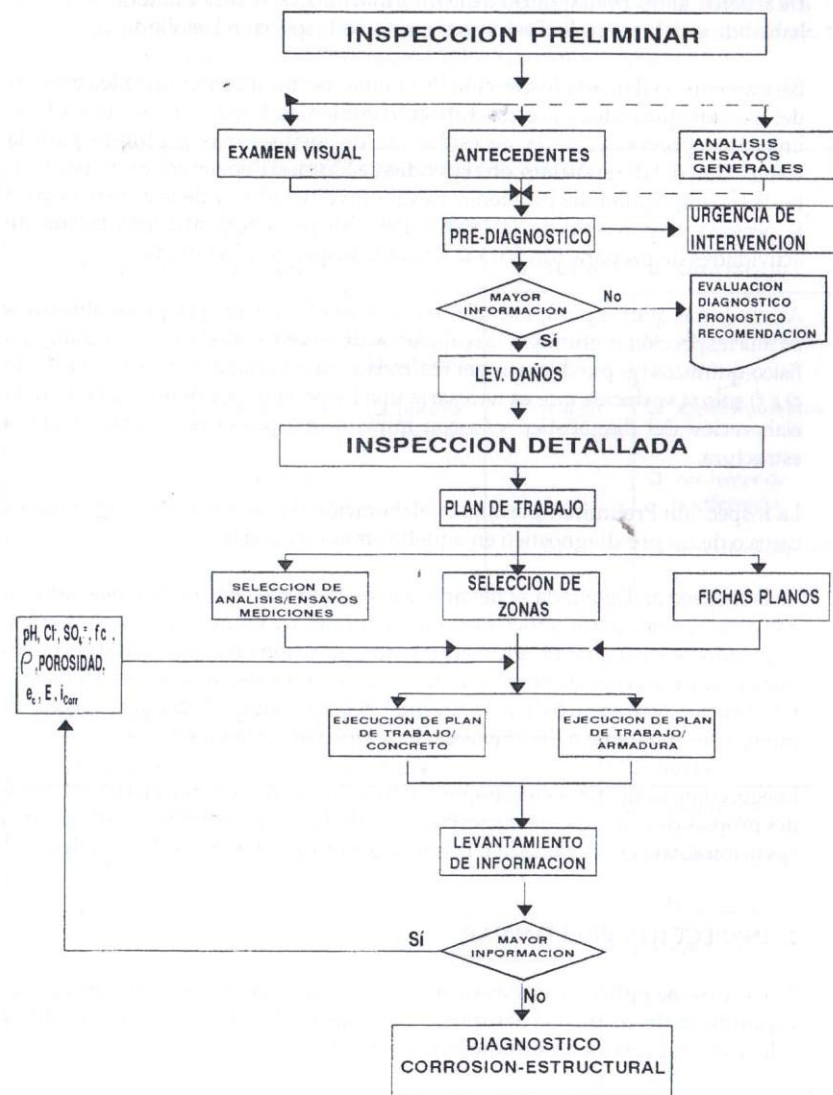


FIGURA 3.1: PASOS PARA LA INSPECCIÓN EN OBRA <sup>(17)</sup>

### 3.1. Inspección Visual

Para diagnosticar las causas o los factores que afectan una estructura es necesario, en primer lugar, realizar una evaluación visual acompañada de una serie de ensayos sobre las secciones de la misma.

Esta evaluación visual, previa a los ensayos, consistirá en describir todos los síntomas que indiquen un deterioro de la estructura y, que a su vez, faciliten el desarrollo de un plan minucioso para proceder con los ensayos y realizar una evaluación total de la estructura.

La inspección visual debe permitir diagnosticar el origen y la causa del problema e incluir la información siguiente:

- Evaluación visual de toda la estructura identificando cada elemento con la finalidad de establecer si los síntomas del problema son de carácter particular o general, y una codificación que permita diferenciar los diferentes elementos.
- Identificación de la agresividad del medio (bajo, medio o agresivo).
- Identificación de las zonas, a las cuales, se encuentra expuesta la estructura o los elementos del mismo (en el caso de las estructuras sumergidas, se mencionarán las zonas expuestas al agua, estructuras aéreas si se encuentran al aire libre o en espacio cerrado).

- Anotación de todos los síntomas visuales, con sus fotos respectivas, donde se presenten casos de manchas de óxido, color del óxido, fisuras, agrietamientos, erosión, desprendimiento del hormigón y otros.
- Fotografías de la armadura, para analizar el estado en que se encuentra, en los sitios donde se realice el picado del hormigón para proceder a encontrar la varilla.

Para definir la agresividad del medio existen varias publicaciones que proponen diferentes parámetros; sin embargo, la norma ecuatoriana de construcción hace referencia, en muchas ocasiones, al código ACI 318; de acuerdo a esta norma, se clasifica en categorías acorde al tipo de exposición que se tenga. La categoría C aplica para hormigón armado expuesto a condiciones que requieren una protección adicional en contra de la corrosión del acero, donde se especifica la severidad definida por clases que incrementan numéricamente representando un incremento en la severidad, tal como se muestra en la Tabla 6.

**TABLA 6**  
**SEVERIDAD Y CLASE DE EXPOSICIÓN PARA LA CATEGORÍA C**  
**SEGÚN LA NORMA ACI-318**

Severidad	Clase	Condición
No aplicable	C0	Hormigón seco o protegido de la humedad.
Moderada	C1	Hormigón expuesto a humedad pero sin fuentes externas de cloruros
Severa	C2	Hormigón expuesto a humedad con una fuente externa de cloruros provenientes de químicos para el deshielo, sal, agua salada, o rocío de estas fuentes.

Las condiciones, a las cuales, se encuentran expuestas los elementos del estudio presente, el cual es una estructura parcialmente sumergida, serán las siguientes:

- Zona sumergida: se encuentra ubicada por debajo de la marea mínima. El hormigón, se encuentra saturado en todo momento. El avance de los cloruros es rápido debido a la permeabilidad; no obstante, al no haber oxígeno suficiente, los productos de la corrosión son mínimos.
- Zona de marea: se encuentra delimitada por las mareas mínima y máxima. El hormigón no logra secarse debido a la frecuencia a la que cambia la marea y permite que siempre se mantenga saturado. El avance de los cloruros es lento

pero pueden llegar a alcanzar a la armadura; no obstante, no hay oxígeno suficiente debido a la saturación y, además, las incrustaciones de moluscos sirven también de aislante.

- Zona de salpicadura: se encuentra inmediatamente por arriba de la marea alta; tiene su límite máximo que depende de las olas y la velocidad del viento que permite transportar las sales marinas hasta las zonas más elevadas. En esta zona los cloruros pueden penetrar al hormigón por capilaridad hasta cierta profundidad y, después, avanza por difusión; al haber una humedad alta en presencia del oxígeno, la corrosión será más significativa en esta zona.
- Zona aérea: se encuentra por arriba de la zona de salpicadura. En esta zona, el avance del cloruro es más lento debido a que dependerá de la niebla salina que se pueda producir. La corrosión ocurrirá cuando el cloruro penetre hasta la varilla que se encuentra en una zona de acceso constante al oxígeno y con una humedad considerable, aunque es de esperarse que primero ocurra en las otras zonas de mayor riesgo.

### **Codificación**

Para describir las ubicaciones de las mediciones, se plantean, como puntos de referencia, dos lugares: el extremo del puente ubicado hacia la Policía Judicial (PJ) y el otro extremo hacia el Mercado de Mariscos, tal como se aprecia en la *Figura 3.2*.

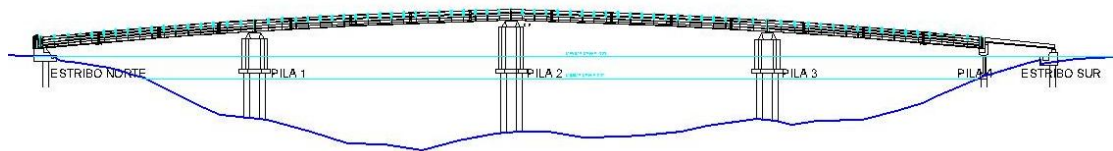


**FIGURA 3.2: FOTO SUPERIOR DEL PUENTE**

El plano actual del puente, elaborado en el año 2011, no detalla la ubicación ni las dimensiones de las varillas de acero en el interior de las pilas del puente; sin embargo, servirá realizar el plan previo

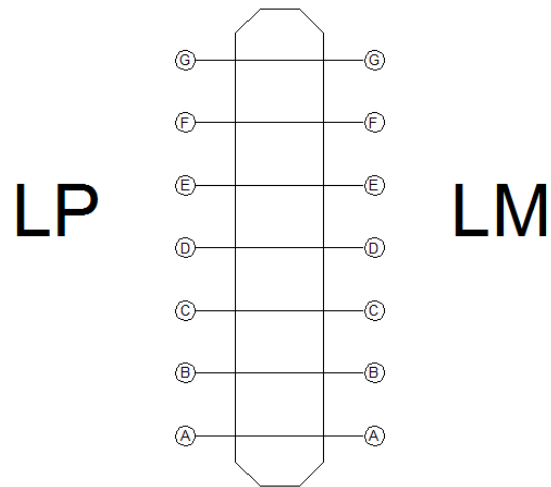
de la inspección y establecer una codificación de las zonas de estudio.

El puente tiene cuatro pilas y dos estribos (norte y sur). Los pilares son enumerados, para hacer una distinción de cada uno, empezando con la pila 1 cercana a la PJ y la pila 4 cercana al mercado como se muestra en la *Figura 3.3*.



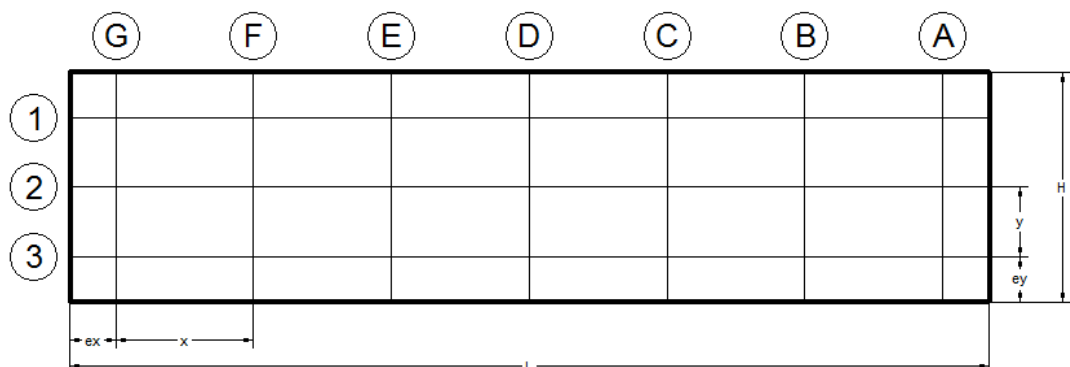
**FIGURA 3.3: VISTA FRONTAL DE LA INFRAESTRUCTURA DEL PUENTE  
PORTETE**

En la *Figura 3.4*, se observa una vista superior de la pila del puente; la cara izquierda, LP (refiriéndose al lado de la PJ) y la cara derecha, LM (refiriéndose al lado del mercado).



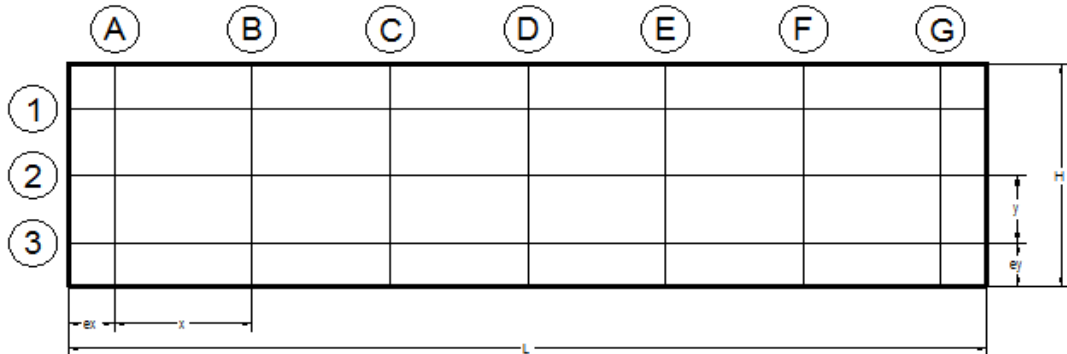
**FIGURA 3.4: VISTA SUPERIOR DE LA PILA DEL PUENTE**

Además, se divide, en cuadrículas, las paredes de la pila por lo cual es necesario establecer la codificación pertinente de manera alfabética para las divisiones verticales (se muestra también en la *Figura 3.4*) y numérica para las divisiones horizontales como se ilustra en las *Figura 3.5* y *Figura 3.6*.



**FIGURA 3.5: VISTA LATERAL IZQUIERDA DE LA PILA DEL PUENTE**

**(LP)**



**FIGURA 3.6: VISTA LATERAL DERECHA DE LA PILA DEL PUENTE (LM)**

En la *Figura 3.5* y *Figura 3.6*, se muestran las dimensiones acotadas en forma de variables; éstas dependerán de la pila analizada; en el Apéndice B, se indica claramente las dimensiones con las separaciones que se tuvieron en cuenta para realizar los ensayos.

Para los dibujos en el Apéndice B y gráficas y datos posteriores, la parte inferior de la pila será denotada como 0 de referencia y todas las alturas serán referidas a partir de este punto. Por tanto, las pilas 1, 2 y 3 tienen el cero de referencia en la cota 1.58 m y la pila 4 en la cota 0.86 m.

### **Hallazgos**

Un aspecto a resaltar es el nivel de marea, pues esto determinará las zonas a las que se encuentra expuesta la pila. De acuerdo a la información proporcionada, el nivel mínimo de marea, se encuentra en la cota 0.47 m que implicaría que las pilas se encuentran en su totalidad por encima de este nivel.

La marea máxima alcanza la cota 4.24 m. Para las pilas 1, 2 y 3 la marea máxima ocurre a una altura de 2.20 m; sin embargo se observa que las incrustaciones de los moluscos y musgos en las pilas alcanzan una altura máxima de 1.80 m. (véase *Figura 3.7*).



**FIGURA 3.7: FOTO DE LA PILA 2 LADO PJ CON PRESENCIA DE MOLUSCOS HASTA UNA ALTURA DE 1.8 M**

Para la pila 4, la marea máxima ocurre a una altura de 2.92 m y las incrustaciones de los moluscos y musgos en las pilas alcanzan una altura máxima de 2.60 m con respecto a la zapata.

Las olas, se deben básicamente a los botes o las lanchas que pasan de manera poco frecuente; pueden alcanzar los 15 cm de altura.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción hace referencia al Capítulo 7 del ACI 318, en que, se indica que para ambientes corrosivos, el espesor de la capa de revestimiento no debe ser menor a 2 pulg. Este valor, se lo toma como referencia para tener una comprensión más cercana de lo que los estudios recientes consideran como un valor adecuado para la capa de revestimiento de este tipo de condiciones no aplicable para la estructura actual al haber sido construida hace mucho tiempo.

La inspección visual se la realizó en las cuatro pilas del puente tomando las fotos que evidencian los daños provocados por la corrosión. A continuación, se incluyen las inspecciones a cada pila.

**Pila 1**

En la *Figura 3.8*, lado PJ entre las coordenadas E2 y F2 se observa una rotura del hormigón en el que se encuentra expuesta la varilla de acero; además, se observa el color rojizo que indica la formación de hidróxido férrico producto de la corrosión.



**FIGURA 3.8 – ROTURA DEL HORMIGÓN (FOTO P1-LP ENTRE E2 Y F2)**

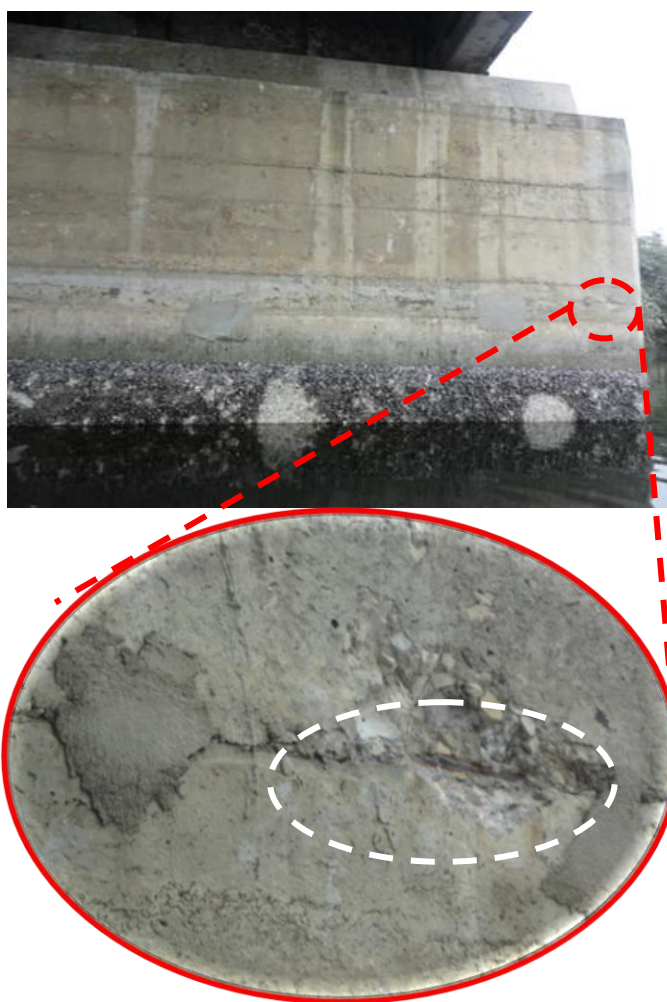
Además, en la *Figura 3.8*, se observa, a la izquierda de la rotura, una sección circular de la varilla expuesta de refuerzo; situación que se repite en toda la pila a la misma altura.

En la *Figura 3.9*, lado PJ, en las coordenadas A2 a la izquierda se observa una rotura aproximada del hormigón de 20 cm x 20 cm con cuatro varillas corroídas en la parte inferior, se observa una fisura longitudinal que coincide con la varilla.



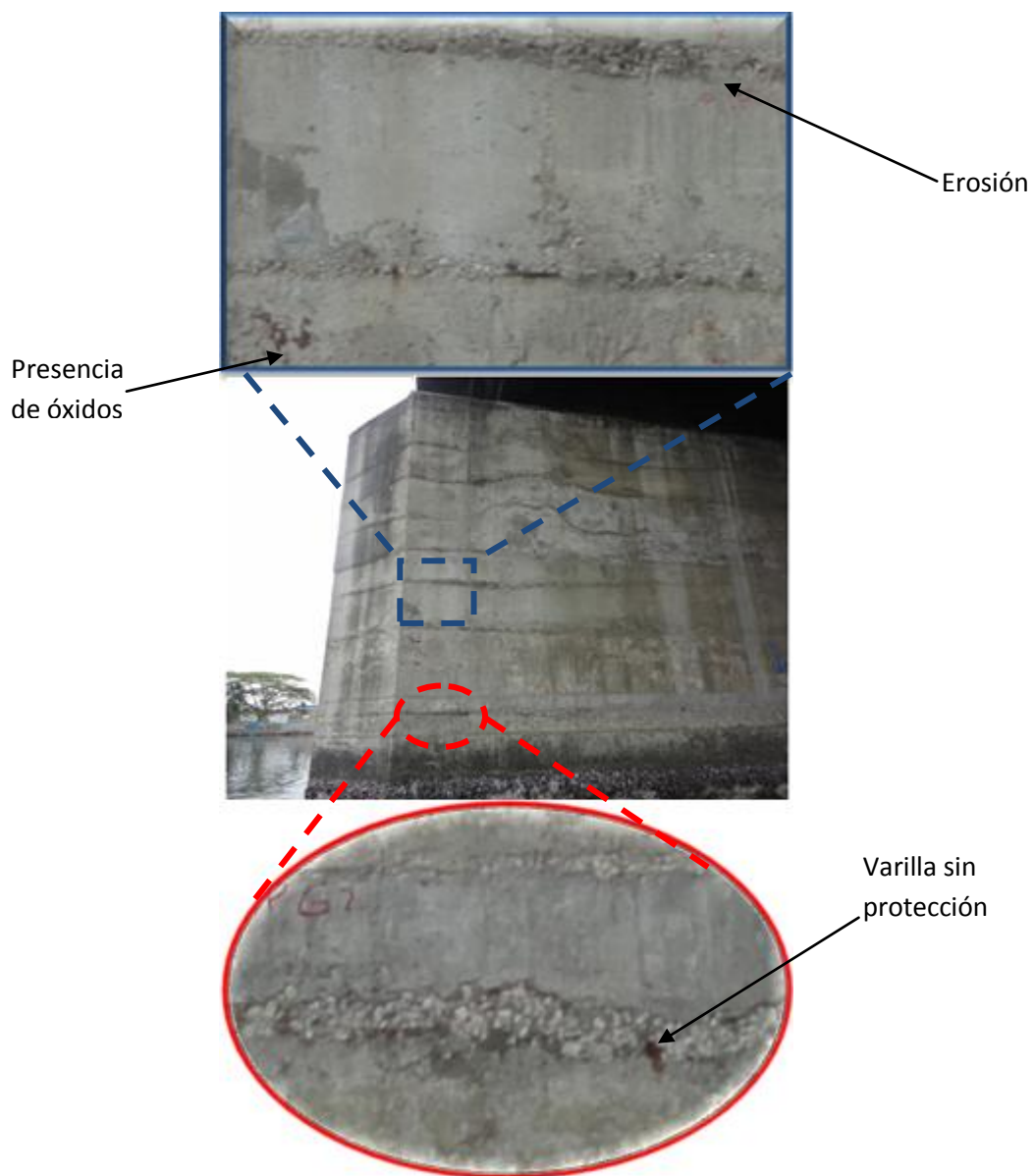
**FIGURA 3.9: ROTURA DEL HORMIGÓN (FOTO P1-LP-A2)**

En la *Figura 3.10* del Lado Mercado en las coordenadas G2 se encuentra una rotura longitudinal a 1 m a la derecha de la coordenada mencionada en la cual la varilla expuesta se encuentra corroída y con una disminución considerable de su diámetro nominal.



**FIGURA 3.10: ROTURA DEL HORMIGÓN (FOTO P1-LM-G2)**

**Pila 2**



**FIGURA 3.11 – EROSIÓN DEL HORMIGÓN Y CORROSIÓN EN VARILLAS (FOTO P2-LP-G)**

En la *Figura 3.11*, lado PJ, coordenadas G1 (foto superior), se observa la presencia del óxido producto de la corrosión de la varilla al interior; en las coordenadas G2 (foto inferior), se vuelve a evidenciar una sección circular de la varilla al descubierto que se repite a lo largo de la pila a la misma altura. En ambos casos, se observan la erosión que existe en el hormigón.

En la *Figura 3.12*, lado mercado, entre las coordenadas C1 y D1, en la parte más alta de la pila, se observa el desprendimiento de la capa de revestimiento del hormigón y la exposición de dos varillas altamente corroídas. Además, se observa un agrietamiento longitudinal, horizontal, que se ha propagado debido al desprendimiento ocasionado por la expansión de los productos de la corrosión.



**FIGURA 3.12: DESPRENDIMIENTO DEL HORMIGÓN Y CORROSIÓN EN LAS VARILLAS (FOTO P2-LM ENTRE C1 Y D1)**

En la *Figura 3.13*, lado mercado, en las coordenadas G2, se evidencia una sección circular de la varilla al descubierto que se repite a lo largo de la pila a la misma altura. También, existe erosión del hormigón que se encuentra causando un desprendimiento del mismo. Existe, además, una rotura en la sección de la pila donde la varilla, se encuentra al descubierto con un grado alto de corrosión.



**FIGURA 3.13: DESPRENDIMIENTO DEL HORMIGÓN Y CORROSIÓN EN LAS VARILLAS (FOTO P2-LM-G2)**

### **Pila 3**

En la *Figura 3.14*, lado PJ, entre las coordenadas B2 y C2, se observa una rotura longitudinal, vertical, del hormigón, en la cual, se aprecia a la varilla corroída.



**FIGURA 3.14: ROTURA DEL HORMIGÓN (FOTO P3-LP ENTRE B2 Y C2)**

En la *Figura 3.15*, lado mercado, coordenada A1, hacia la parte más alta de la pila, se observa el desprendimiento de la capa de revestimiento del hormigón y la exposición de varias varillas corroídas. También, por debajo de la coordenada A2, se evidencia una sección circular de la varilla al descubierto que se repite a lo largo de la pila, a la misma altura, con productos de la corrosión.



**FIGURA 3.15: DESPRENDIMIENTO DEL HORMIGÓN Y CORROSIÓN EN LAS VARILLAS (FOTO P3-LM-A)**

#### **Pila 4**

La pila 4, a diferencia de las anteriores, es una pila tipo muro.

En la *Figura 3.16*, lado PJ, arriba de la coordenada F1, se observa una varilla sin protección, severamente corroída.



**FIGURA 3.16: VARILLA CORROÍDA (FOTO P4-LP-F1)**

En la *Figura 3.17*, lado PJ, se observa la presencia de óxido producto de la corrosión de la varilla al interior del hormigón; también, se ven agrietamientos de gran extensión por encima de los 3 m con respecto a la zapata. Además, se evidencia una sección circular de la varilla, al descubierto,

que se repite a lo largo de la pila a la misma altura con productos de la corrosión.



**FIGURA 3.17: PRESENCIA DE CORROSIÓN (FOTO P4-LP ENTRE E1-F1)**

En la *Figura 3.18*, lado mercado, la coordenada A1, hacia la parte más alta de la pila, se observan el desprendimiento de la capa de revestimiento del hormigón y la exposición de varias varillas corroídas; una situación similar ocurre en el otro extremo en la coordenada G1.



**FIGURA 3.18: DESPRENDIMIENTO DEL HORMIGÓN (FOTO P4-LM-A1)**

En la *Figura 3.19*, lado mercado, coordenada E1, hacia la parte más alta de la pila, se observan las roturas del hormigón y la exposición de la varilla corroída en cada sección; una situación similar ocurre en el otro extremo, encima de la coordenada B1.



**FIGURA 3.19: ROTURA DEL HORMIGÓN (FOTO P4-LM-E1)**

### **3.2. Profundidad de Carbonatación**

#### **Preparación**

Para realizar el ensayo es necesario tener listos los materiales requeridos. Al ser un ensayo no destructivo, ningún testigo del hormigón debe ser extraído de la pila del puente; por lo tanto, las mediciones, se realizarán “in situ”.

Para determinar la profundidad de la carbonatación, se utiliza un indicador que cambia de color conforme la reducción del pH ocurre. El indicador es una solución de fenolftaleína al 1%. Esta solución

es incolora para pH inferiores a 8 y se torna color rojo púrpura para pH superiores a 10.

La solución se la prepara con 1 g de fenolftaleína disuelta en 50 mL de alcohol y diluida hasta los 100 mL con agua desionizada<sup>(17)</sup>. Cabe recalcar el uso de agua desionizada, debido a que el agua potable contiene minerales que pueden afectar la alcalinidad durante el ensayo.

Para el ensayo, adicionalmente, se necesitará un cincel, un martillo, un calibrador de Vernier, una cámara fotográfica y un rociador para la solución de fenolftaleína.

### **Método**

El método descrito, a continuación, es aplicado en los ensayos no destructivos. Se seleccionan los puntos para el ensayo. Se debe realizar el ensayo cuando se busca la varilla para realizar las pruebas con el equipo Gecor 8. Además, se seleccionan puntos donde se encuentre una mayor actividad reflejada por los valores electronegativos altos del potencial de la corrosión.

Se realiza un orificio pequeño, perpendicular a la superficie, golpeando la pared con el cincel y martillo cumpliendo con las medidas de seguridad del caso (uso de guantes y gafas protectoras). Se remueve el polvo, que queda en la superficie, usando un cepillo o soplándolo con aire. Inmediatamente, se procede a rociar la solución de fenolftaleína sobre la superficie. Este procedimiento, se repite hasta observar el color rojo púrpura en el hormigón; con el medidor de profundidad del calibrador Vernier, se registra con una precisión, mm, la profundidad de la capa incolora.

En la *Figura 3.20*, se muestra el orificio hecho en la pila 3, lado PJ, coordenada B2, después de haber sido aplicada la solución de fenolftaleína; se observa la coloración púrpura cercana a la superficie.



**FIGURA 3.20: FOTO DE LA MEDICIÓN DE PROFUNDIDAD DE LA CARBONATACIÓN EN P3-LP-B2**

En caso de que no se vea el color rojo púrpura sino más bien rosado, se indica este acontecimiento en el reporte de las mediciones del ensayo. La incorporación de una fotografía sirve de soporte para reportar esta condición.

Las mediciones de la profundidad de la carbonatación se las realiza al nivel de la coordenada 2 para las pilas 1, 2 y 3 y en la coordenada 3 para la pila 4. La elección de estos puntos es debido a que son las zonas más propensas a la corrosión al encontrarse más próximas a la zona de marea (zona de salpicadura).

### Resultados obtenidos

Para reportar los resultados es necesario indicar la fecha cuando se realiza el ensayo, la identificación del lugar donde se lo realiza y la profundidad máxima de carbonatación. Los resultados obtenidos del ensayo de profundidad de carbonatación para las cuatro pilas del puente Portete se muestran en la Tabla 7.

**TABLA 7**  
**PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN**

Fecha	Pila	Lado	Coordenada	Profundidad (mm)
02/12/2011	P1	LP	B2	2.0
			F2	3.0
		LM	B2	2.0
			F2	2.0
01/12/2011	P2	LP	B2	2.0
			F2	2.0
		LM	B2	3.0
			F2	3.0
30/11/2011	P3	LP	B2	2.0
			F2	2.0
		LM	B2	2.0
			F2	2.0
29/11/2011	P4	LP	B1	1.0
			F1	2.0
		LM	B1	2.0
			F1	2.0

### 3.3. Mapeo

El método de mapeo consiste en utilizar el equipo del Gecor 8 con el sensor B para obtener resultados de resistividad del hormigón y potencial de corrosión. Además, dentro de los resultados que reporta el equipo, se incluye el nivel de riesgo basado en estos dos parámetros que tienen valores límites por defecto que se muestran en la *Figura 3.21*.



**FIGURA 3.21: VALORES LÍMITES PARA NIVEL DE RIESGO EN MAPEO**

Sin embargo, este nivel de riesgo no se lo considera al momento de presentar los resultados debido a que se realiza un análisis más integrado que incluirá todas las variables analizadas, en este trabajo, para determinar el riesgo de corrosión en la estructura.

### **Método**

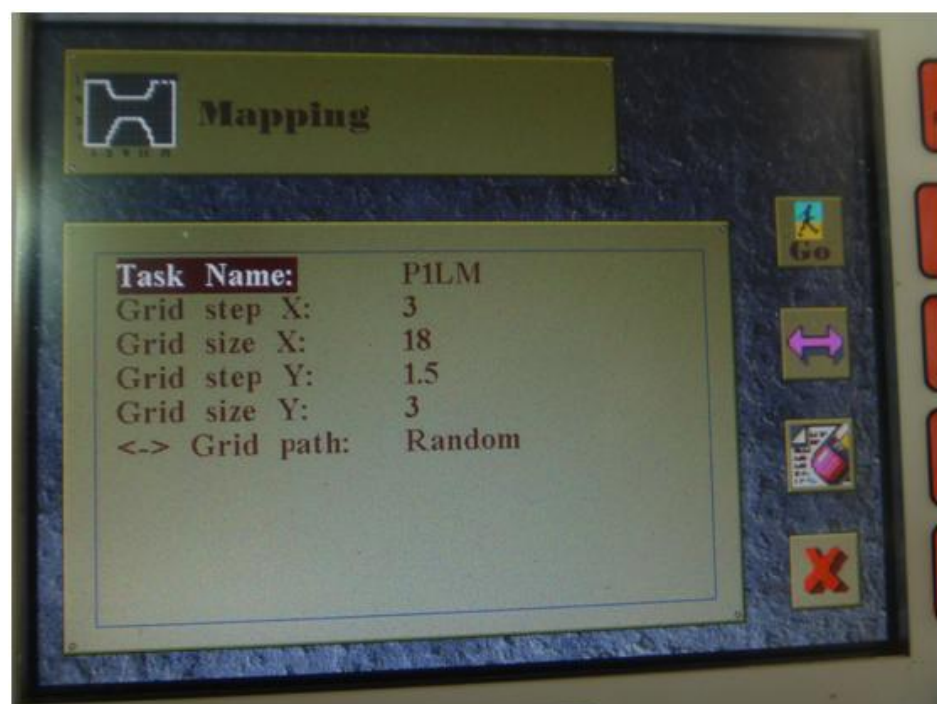
Para realizar el ensayo se deben seguir los pasos previos detallados en el *Capítulo 3.1. Procedimiento de instalación* del Manual de Instrucción del Gecor 8 que se presenta en el *Apéndice A*.

Se debe buscar la varilla, a la cual, se conectará el equipo en un punto central de donde se harán las mediciones de la pila (cercana a la coordenada D2) usando un cincel y martillo; se debe usar para la seguridad guantes y gafas protectoras. Se recomienda hacerlo aproximándose en un bote con la marea alta debido al menor riesgo, a diferencia de trabajar en altura, sin olvidar el uso de cascos y chalecos salvavidas.

Encontrada la varilla y removida cualquier impureza como el óxido sobre la misma, se conecta un extremo del cable (que posee la pinza) a la varilla y el otro se conecta al sensor B.

Una vez realizado los pasos previos a la medición, se continúa con el uso del equipo indicado en el *Capítulo 3.2.5. Mapeo* del manual de instrucción del Gecor 8 que se presenta en el *Apéndice A*. En la *Figura 3.22*, se muestra la pantalla que aparece después de

seleccionar el método de mapeo. Los datos ingresados son: el nombre de la tarea usando la identificación de la pila y el lado en que se realiza la medición, el paso en X igual a 3, el tamaño en X igual a 18, el paso en Y igual a 1.5, el tamaño en E igual a 3 y el camino de la red seleccionando “Random”.



**FIGURA 3.22: PANTALLA PARA DATOS DE MAPEO**

Habiendo introducido los valores anteriores en la pantalla de “Mapping data”, se procede a colocar el sensor B como se observa en la *Figura 3.23* en el punto de medición que corresponde de

acuerdo a lo que indica la pantalla “Mapping measurement” habiendo realizado la previa humectación de la esponja y la pared.



**FIGURA 3.23: COLOCACIÓN DEL SENSOR B EN EL PUNTO DE MEDICIÓN**

Como se observa en la figura anterior, se deben remover todas las incrustaciones de los moluscos adheridos en la zona donde se realizará la medición a fin de evitar lecturas erróneas.

Después de terminar las mediciones y habiendo guardado los resultados, se procede a copiar la información en una computadora

extrayendo la tarjeta PCMCIA del equipo y colocándola en el puerto PCMCIA de la computadora.

### 3.3.1. Resistividad del Hormigón

Los resultados obtenidos usando el sensor B conectado al equipo Gecor 8 de la resistividad del hormigón, se muestran de la Tabla 8 a la Tabla 15.

**TABLA 8**  
**RESISTIVIDAD DEL HORMIGÓN EN LA PILA 1 LADO PJ**  
**(KΩ·CM)**

Ref.	G	F	E	D	C	B	A
1	278.38	258.84	164.35	220.31	259.73	296.86	304.93
2	174.10	162.07	265.12	183.04	179.38	252.57	218.32
3	49.76	24.21	31.11	21.94	27.57	25.10	25.72

**TABLA 9**  
**RESISTIVIDAD DEL HORMIGÓN EN LA PILA 1 LADO M**  
**(KΩ·CM)**

Ref.	A	B	C	D	E	F	G
1	367.46	178.95	196.61	275.94	297.04	306.76	363.98
2	298.08	117.83	138.29	141.50	202.45	139.30	173.03
3	28.10	22.72	32.90	28.21	23.83	25.29	22.90

**TABLA 10**  
**RESISTIVIDAD DEL HORMIGÓN EN LA PILA 2 LADO PJ**  
**(KΩ·CM)**

Ref.	G	F	E	D	C	B	A
1	249.53	310.73	343.19	446.25	388.40	369.30	434.72
2	86.12	93.16	164.50	218.72	128.36	162.28	81.52
3	24.30	22.78	26.64	23.44	28.60	22.14	16.38

**TABLA 11**  
**RESISTIVIDAD DEL HORMIGÓN EN LA PILA 2 LADO M**  
**(KΩ·CM)**

Ref.	A	B	C	D	E	F	G
1	309.28	400.97	302.31	418.73	252.91	178.32	210.22
2	225.45	97.33	128.41	268.68	104.48	113.23	149.58
3	23.10	20.43	22.42	25.23	24.59	21.31	22.74

**TABLA 12**  
**RESISTIVIDAD DEL HORMIGÓN EN LA PILA 3 LADO PJ**  
**(KΩ·CM)**

Ref.	G	F	E	D	C	B	A
1	302.37	401.19	362.49	193.66	264.53	291.59	350.73
2	99.76	94.23	104.27	124.03	97.10	141.70	183.67
3	29.26	31.49	29.94	32.24	34.21	21.11	24.41

**TABLA 13**  
**RESISTIVIDAD DEL HORMIGÓN EN LA PILA 3 LADO M**  
**(KΩ·CM)**

Ref.	A	B	C	D	E	F	G
1	462.90	380.68	391.18	301.18	226.65	334.10	370.32
2	109.48	97.61	77.47	71.47	105.68	126.05	103.04
3	21.02	19.01	20.22	19.08	21.51	22.14	21.72

**TABLA 14**  
**RESISTIVIDAD DEL HORMIGÓN EN LA PILA 4 LADO PJ**  
**(KΩ·CM)**

Ref.	G	F	E	D	C	B	A
1	22.92	25.67	11.13	11.15	11.29	15.18	11.59
2	8.21	10.50	10.56	7.48	5.88	3.10	3.28
3	3.04	4.58	5.40	3.69	5.99	2.36	2.12

**TABLA 15**  
**RESISTIVIDAD DEL HORMIGÓN EN LA PILA 4 LADO M**  
**(KΩ·CM)**

Ref.	A	B	C	D	E	F	G
1	14.49	30.85	27.32	26.48	14.38	28.62	25.47
2	14.82	16.45	10.15	9.88	14.31	9.77	13.71
3	5.16	16.07	9.15	9.27	8.21	4.81	9.26

### 3.3.2. Potencial de Corrosión

Los resultados obtenidos del potencial de corrosión usando el sensor B, se muestran de la Tabla 16 a la Tabla 23.

**TABLA 16**  
**POTENCIAL DE CORROSIÓN EN LA PILA 1 LADO PJ**  
**(mV)**

Ref.	G	F	E	D	C	B	A
1	-279.4	-299.9	-306.0	-284.1	-311.2	-302.6	-288.3
2	-317.4	-368.1	-338.7	-330.2	-329.2	-342.7	-355.8
3	-445.6	-395.7	-455.0	-496.5	-447.1	-448.9	-475.4

De la Tabla 16 para la pila 1 lado PJ, se determina que el 42% de todos los potenciales de la media celda son más negativos que -350 mV, mientras que ningún valor es menos negativo que -200 mV.

**TABLA 17**  
**POTENCIAL DE CORROSIÓN EN LA PILA 1 LADO M**  
**(mV)**

Ref.	A	B	C	D	E	F	G
1	-310.9	-317.0	-294.6	-283.9	333.5	-319.4	-324.6
2	-328.5	-340.7	-308.2	-304.5	-344.27	-342.4	-356.8
3	-478.98	-468.8	-441.9	-438.1	-462.15	-441.1	-400.2

De la Tabla 17 para la pila 1 lado M, se determina que el 38% de todos los potenciales de la media celda son más negativos que -350 mV, mientras que ningún valor es menos negativo que -200 mV.

**TABLA 18**  
**POTENCIAL DE CORROSIÓN EN LA PILA 2 LADO PJ**  
**(mV)**

Ref.	G	F	E	D	C	B	A
1	-324.1	-349.1	-348.8	-335.8	-294.5	-296.0	-242.4
2	-314.8	-331.6	-310.6	-288.3	-274.0	-263.4	-283.4
3	-373.7	-464.2	-414.4	-431.6	-423.3	-423.8	-344.8

De la Tabla 18 para la pila 2 lado PJ, se determina que el 71% de todos los potenciales de la media celda son más negativos que -350 mV, mientras que el 5% de todos los potenciales de la media celda son menos negativos que -200 mV.

**TABLA 19**  
**POTENCIAL DE CORROSIÓN EN LA PILA 2 LADO M**  
**(mV)**

Ref.	A	B	C	D	E	F	G
1	-293.9	-316.6	-357.0	-349.6	-329.6	-347.7	-323.3
2	-348.4	-336.9	-295.4	-337.1	-343.2	-316.3	-360.6
3	-467.7	-472.1	-462.6	-463.6	-458.8	-465.8	-449.1

De la Tabla 19 para la pila 2 lado M, se determina que el 42% de todos los potenciales de la media celda son más negativos que -350 mV, mientras que ningún valor es menos negativo que -200 mV.

**TABLA 20**  
**POTENCIAL DE CORROSIÓN EN LA PILA 3 LADO PJ**  
**(mV)**

Ref.	G	F	E	D	C	B	A
1	-301.0	-274.4	-286.0	-351.0	-346.8	-299.4	-325.3
2	-348.4	-341.1	-348.0	-339.7	-374.1	-366.2	-341.6
3	-368.5	-370.4	-375.8	-383.9	-396.4	-435.0	-384.4

De la Tabla 20 para la pila 3 lado PJ, se determina que el 42% de todos los potenciales de la media celda son más

negativos que -350 mV, mientras que ningún valor es menos negativo que -200 mV.

**TABLA 21**  
**POTENCIAL DE CORROSIÓN EN LA PILA 3 LADO M**  
**(mV)**

Ref.	A	B	C	D	E	F	G
1	-344.1	-294.9	-260.7	-307.0	-378.8	-229.8	-223.7
2	-474.5	-505.7	-465.4	-439.1	-462.1	-442.2	-496.2
3	-518.7	-585.2	-595.1	-584.1	-647.2	-590.7	-564.8

De la Tabla 21 para la pila 3 lado M, se determina que el 71% de todos los potenciales de la media celda son más negativos que -350 mV, mientras que el 10% de todos los potenciales de la media celda son menos negativos que -200 mV.

**TABLA 22**  
**POTENCIAL DE CORROSIÓN EN LA PILA 4 LADO PJ**  
**(mV)**

Ref.	G	F	E	D	C	B	A
1	-342.1	-260.6	-323.7	-374.4	-380.5	-279.9	-405.8
2	-690.2	-675.3	-688.5	-692.5	-679.1	-676.2	-671.2
3	-700.9	-702.9	-699.3	-706.0	-696.3	-701.7	-696.0

De la Tabla 22 para la pila 4 lado PJ, se determina que el 71% de todos los potenciales de la media celda son más negativos que -350 mV, mientras que ningún valor es menos negativo que -200 mV.

**TABLA 23**  
**POTENCIAL DE CORROSIÓN EN LA PILA 4 LADO M**  
**(mV)**

Ref.	A	B	C	D	E	F	G
1	-345.1	-285.4	-291.6	-365.2	-306.4	-286.9	-290.9
2	-580.1	-540.0	-653.3	-654.0	-641.4	-649.3	-630.2
3	-711.3	-684.6	-698.9	-701.5	-703.7	-693.8	-712.2

De la Tabla 23 para la pila 4 lado M, se determina que el 81% de todos los potenciales de la media celda son más negativos que -350 mV, mientras que ningún valor es menos negativo que -200 mV.

### **Mapa equipotencial**

Adicionalmente, la norma ASTM C876 exige que se reporten gráficos con las líneas equipotenciales basadas en los datos registrados durante la medición con la media celda.

Para reportar estos gráficos es necesario desarrollar un programa que permita realizar la interpolación lineal necesaria para obtener la continuidad en las líneas equipotenciales. Por lo tanto, se utiliza el programa MATLAB para escribir el código fuente de un programa pequeño en el cual se introduce los datos de los potenciales y las ubicaciones físicas de los puntos de medición. En el Apéndice C, se muestra, a manera de ejemplo, el programa desarrollado para la pila 1 lado mercado.

### **3.4. Corriente de Corrosión**

Como se mencionó en el *Capítulo 2*, existen varios métodos que permiten determinar la corriente de corrosión utilizando el Gecor 8. Para ello, es necesario conocer la aplicación de cada método y las circunstancias bajo las cuales, se encuentra sometida la estructura de interés.

Para el caso presente de estudio, el puente cuyas pilas, se encuentran parcialmente sumergidas y considerando los resultados de la resistividad del hormigón para la zona donde se van a realizar

los ensayos, se considera el ensayo para estructuras sumergidas especificada en el Manual de Instrucción del Gecor 8, *Apéndice A*.

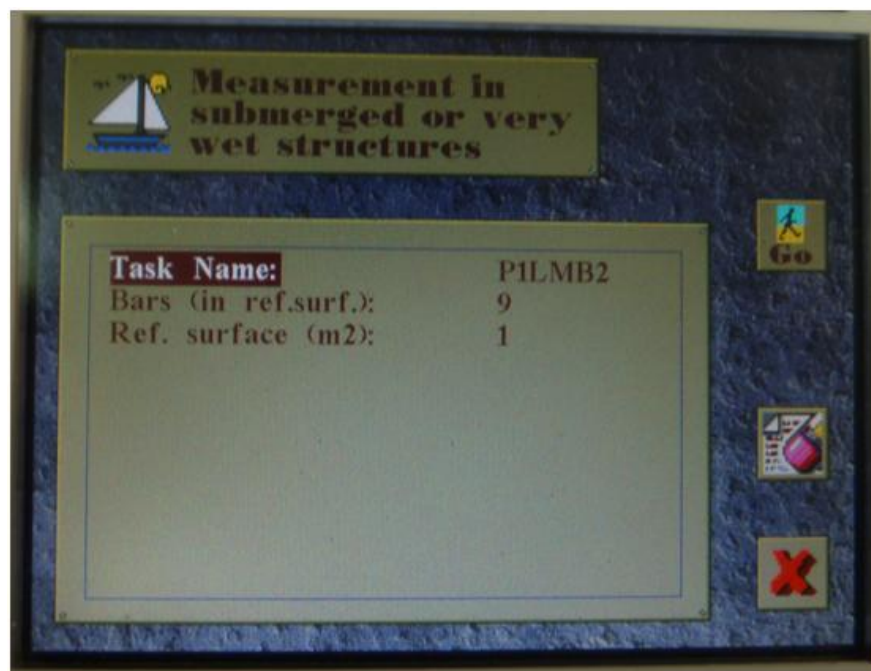
Debido a que el ensayo requiere de un tiempo mayor y como se puede trabajar durante cierto nivel de marea, se propuso la toma de la medición en la zona crítica revelada por la corriente de corrosión e inspección visual, cercana a la coordenada 2. Otro motivo por el cual no se realiza el estudio en más zonas, es que para el método presente, se necesita conocer la distribución de las varillas en un área preferencial de 1 m<sup>2</sup> por debajo del sensor y, sólo, se tiene esa información para esa zona.

### **Método**

El ensayo se lo debe efectuar preferentemente después de realizar el mapeo para aprovechar el equipo conectado en un extremo a la varilla de acero y el otro extremo al sensor C.

A continuación, se procede con el uso del equipo como se indica en el *Capítulo 3.2.7. Medición en Estructuras Sumergidas o Muy Húmedas* del manual de instrucción del Gecor 8, *Apéndice A*. En la *Figura 3.24*, se muestra la pantalla que aparece después de seleccionar el método de estructura sumergida. Los datos

ingresados son: el nombre de la tarea usando la identificación de la pila y el lado donde se realiza la medición, las varillas igual a 9 y la superficie de referencia igual a 1 m<sup>2</sup>. Luego, se solicita indicar para cada varilla su longitud y diámetro, el cual para las primeras ocho varillas, se introduce una longitud de 1000 mm y diámetro de 10 mm; para la novena varilla, se introduce una longitud de 1000 mm y diámetro de 16 mm.



**FIGURA 3.24: PANTALLA DE DATOS PARA MEDICIONES EN ESTRUCTURAS SUMERGIDAS O MUY HÚMEDAS**

Con la información ingresada y antes de continuar a la ventana siguiente del programa, se procede a colocar el sensor C en el

punto de medición deseado (el cual es 20 cm por debajo de la coordenada indicada) habiendo realizado la previa humectación de la esponja y la pared. A continuación, se debe estar pendiente de la estabilización de los valores de medición, observando la pantalla del equipo.



**FIGURA 3.25: CONTROL DEL EQUIPO GECOR 8**

Después de terminar las mediciones y habiendo guardado los resultados, se procede a copiar la información en una computadora extrayendo la tarjeta PCMCIA del equipo y colocándola en el puerto PCMCIA de la computadora.

### **Resultados obtenidos**

Para reportar los valores de la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) es necesario indicar, adicionalmente, la fecha en que se realizó el ensayo e identificación del lugar donde se lo realizó. Los resultados obtenidos del ensayo mostrados en la Tabla 24 son para las pilas 1, 2 y 3 del puente Portete exceptuando la pila 4 debido a que se desconoce la distribución de varillas en este caso.

**TABLA 24**  
**CORRIENTE DE CORROSIÓN EN LAS PILAS DEL PUENTE**  
**PORTETE**

Fecha	Pila	Lado	Coordenada	$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
02/12/2011	P1	LP	B2	7.502
			F2	8.512
LM		B2	5.311	
		F2	6.258	
02/12/2011	P2	LP	B2	4.936
			F2	5.597
LM		B2	6.211	
		F2	5.384	
01/12/2011	P3	LP	C2	8.251
			F2	6.753
LM		B2	8.021	
		F2	7.184	

### **Velocidad de corrosión**

Para calcular la velocidad de corrosión, se utiliza la ecuación 13 deducida en el *Capítulo 1.1.3* como se muestra, a continuación,

para el caso de la corriente de corrosión en la coordenada P1-LP-B2:

$$V_{corr} = 0.0116 \times i_{corr} \quad (13)$$

$$V_{corr} = 0.0116 \times 7.502$$

$$V_{corr} = 0.09 \text{ mm/año}$$

De esta manera, se obtiene la Tabla 25 con los valores de velocidad de corrosión ( $V_{corr}$ ) para cada valor de la corriente de la Tabla 24.

**TABLA 25**  
**VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN LAS PILAS DEL PUENTE**  
**PORTETE**

Fecha	Pila	Lado	Coordenada	$V_{corr}$ (mm/año)
02/12/2011	P1	LP	B2	0.09
			F2	0.10
02/12/2011		LM	B2	0.06
			F2	0.07
02/12/2011	P2	LP	B2	0.06
			F2	0.06
01/12/2011		LM	B2	0.07
			F2	0.06
01/12/2011	P3	LP	C2	0.10
			F2	0.08
30/11/2011		LM	B2	0.09
			F2	0.08

# CAPÍTULO 4

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis del puente Portete, se deben integrar las diferentes variables que afectan la tasa de corrosión de las armaduras de acero. Estos factores son los previamente reportados en el capítulo anterior; y consisten en las características del hormigón, la ubicación de los componentes estructurales, los hallazgos visuales, la profundidad de la capa de carbonatación, la resistividad del hormigón, el potencial de corrosión y la tasa de corrosión.

Como se mencionó, la inspección visual revela en gran medida la situación de la estructura cuando se pueden obtener registros de las fallas por la corrosión. Además, en este procedimiento, se incluyó la información que pudo ser recopilada o investigada, previo a la visita al sitio de estudio. La falta de información referente a la construcción del puente dificulta el seguimiento de la evolución de la corrosión durante su periodo de trabajo.

En la inspección visual, se observa que la expansión de los productos de la corrosión ha ocasionado el desprendimiento de la capa de revestimiento. La causa de este defecto, se debe a que el espesor de recubrimiento se encuentra por debajo del límite recomendado para este tipo de estructuras, el cual, acorde a las normas actuales debe ser mínimo de 5 cm. Este límite aplica para las construcciones actuales y se justifica en la medida que este espesor proporciona un aislamiento del exterior a la varilla de acero.



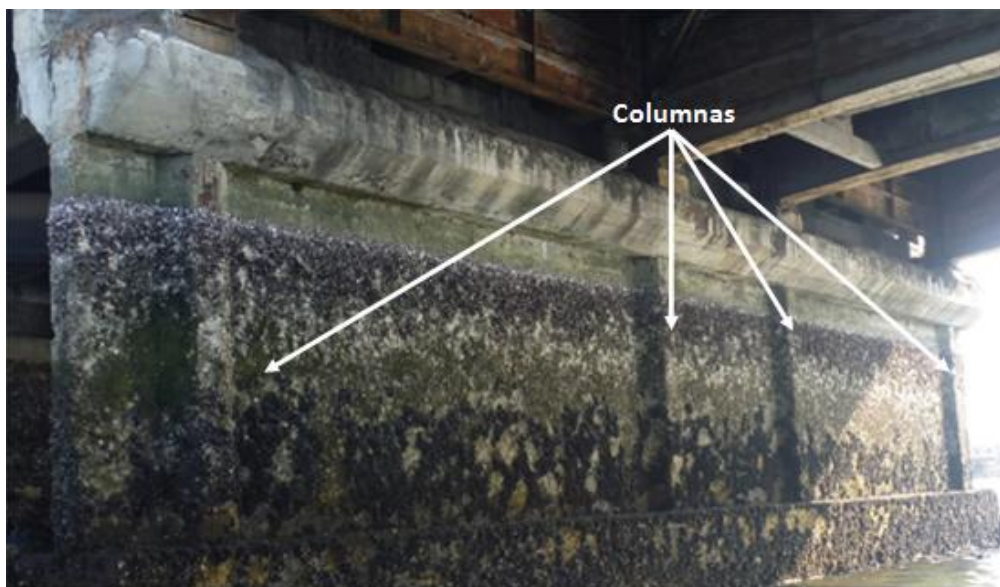
**FIGURA 4.1: LÍNEAS DE ETAPAS DE FUNDICIÓN EN LA PILA 2 LADO  
MERCADO**

En la mayoría de los casos encontrados de corrosión, se evidencia que el desprendimiento del hormigón se presenta en las líneas formadas en las etapas de fundición durante la construcción, *Figura 4.1*. En estas interfaces, la carbonatación y difusión de los cloruros avanza de manera más rápida, creando una zona activa de corrosión.

De la información proporcionada y corroborada, en el sitio, se concluye que la variación de la marea incide en el nivel de humedad de las pilas del puente al quedar parcialmente sumergidas en la marea alta. También, se considera que para marea baja, las pilas del puente no se encuentran sumergidas permitiendo tener ciclos de humectación y secado dos veces al día. Esta situación afecta en mayor medida a la pila 4 por ser de altura menor.

También, es necesario examinar la carbonatación; de acuerdo a los resultados, se observa una profundidad máxima de 3 mm en las pilas del puente, considerando como un análisis de manera global. Por ende, todas las mediciones de profundidad de carbonatación se encuentran por debajo de 3 mm, con lo cual, se observa que el  $\text{CO}_2$ , causante de que el pH disminuya en el hormigón, no lo ha penetrado en su totalidad para llegar a las varillas de acero, permitiendo que mantenga su alcalinidad y no exista corrosión generalizada debido a este factor.

A partir de esto, se analiza haciendo la distinción de la forma de la estructura porque las pilas 1, 2 y 3 presentan un mismo diseño a diferencia de la pila 4. Las pilas 1, 2 y 3 han sido diseñadas para soportar una mayor carga y poseen una mayor base con respecto a la pila 4 cuyas armaduras, se encuentran en las cuatro columnas que posee como se observa en la *Figura 4.2*.

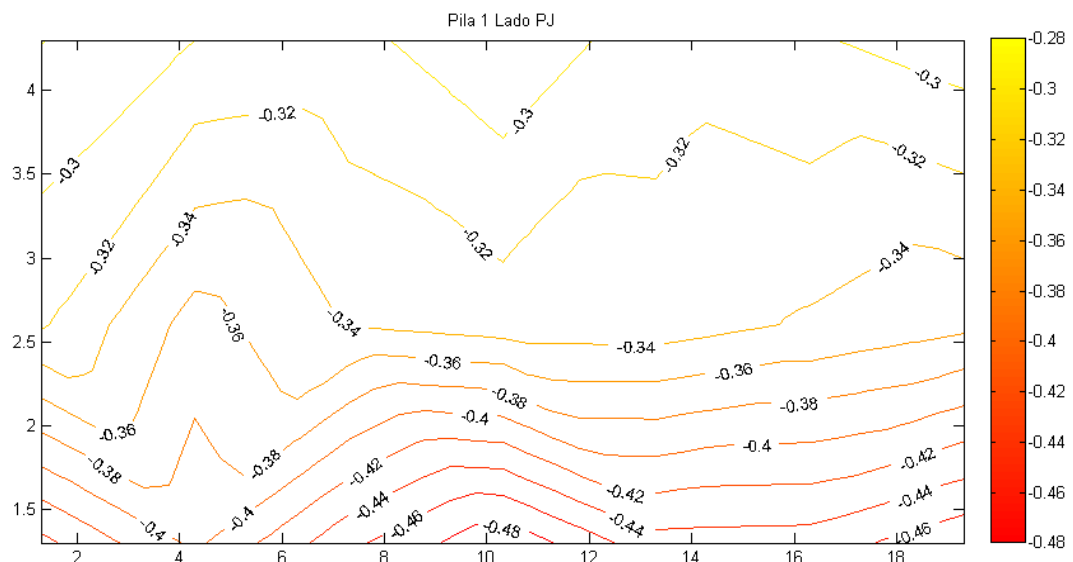


**FIGURA 4.2: CUATRO COLUMNAS DE LA PILA 4 LADO PJ**

Cabe señalar que para el análisis del potencial de corrosión, la norma ASTM C876 establece que para valores más negativos que  $-0.35$  V CSE hay una probabilidad del 90% de que la corrosión en las varillas de acero esté ocurriendo en el momento de la medición. Si los potenciales van de

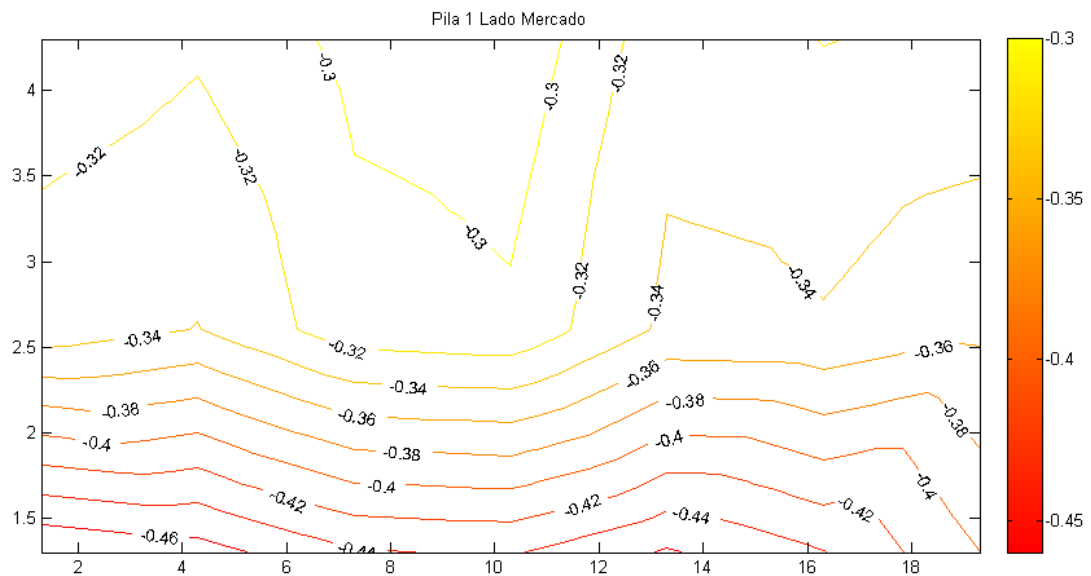
-0.20 a -0.35 V CSE, la actividad de corrosión es incierta (un 50% de probabilidad de que esté ocurriendo).

Para la pila 1 lado PJ, se observa, en el mapa equipotencial que los potenciales en toda la zona de marea y salpicadura (hasta los 2.5 m aproximadamente) son más negativos que -0.35 V CSE. En la coordenada F2 existe un potencial electronegativo mayor siendo una zona donde ya se ha producido un desprendimiento de hormigón a 1 m de la medición. El mismo fenómeno, aunque con un poco menos de intensidad, se observa cerca de la zona de la coordenada A2. En el resto de la zona aérea, el potencial, se mantiene en el rango de -0.20 a -0.35 V CSE.



**FIGURA 4.3: MAPA EQUIPOTENCIAL P1-LP**

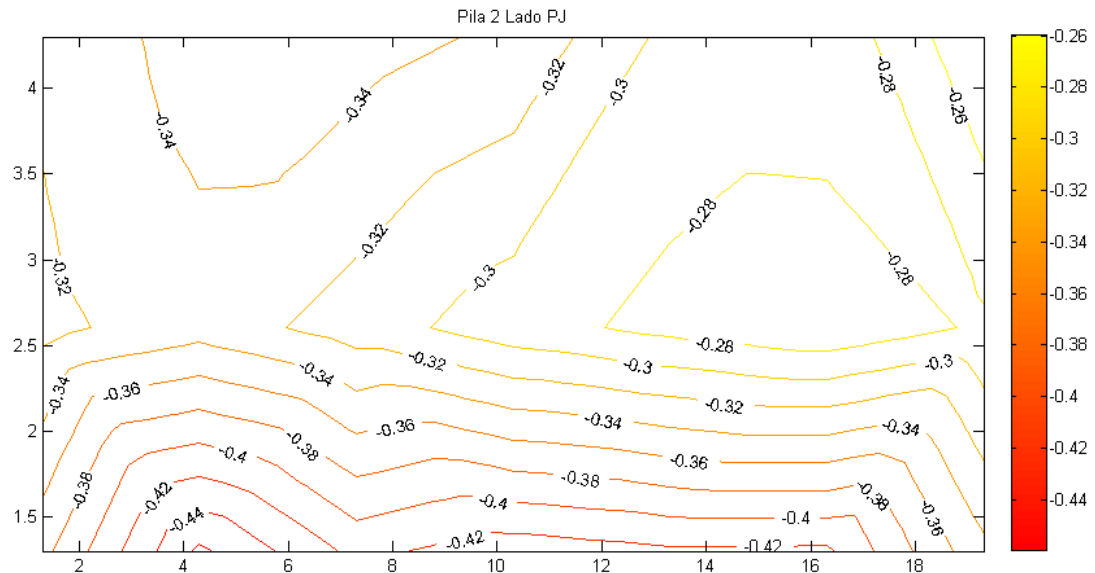
Para la pila 1 lado M, se observa, en el mapa equipotencial, que los potenciales en toda la zona de marea y salpicadura, a excepción del tramo C2 al D2, (hasta los 2.4 m aproximadamente) son más negativos que  $-0.35$  V CSE con una actividad mayor en el tramo E2-G2. En el resto de la zona aérea, el potencial, se mantiene en el rango de  $-0.20$  a  $-0.35$  V CSE.



**FIGURA 4.4: MAPA EQUIPOTENCIAL P1-LM**

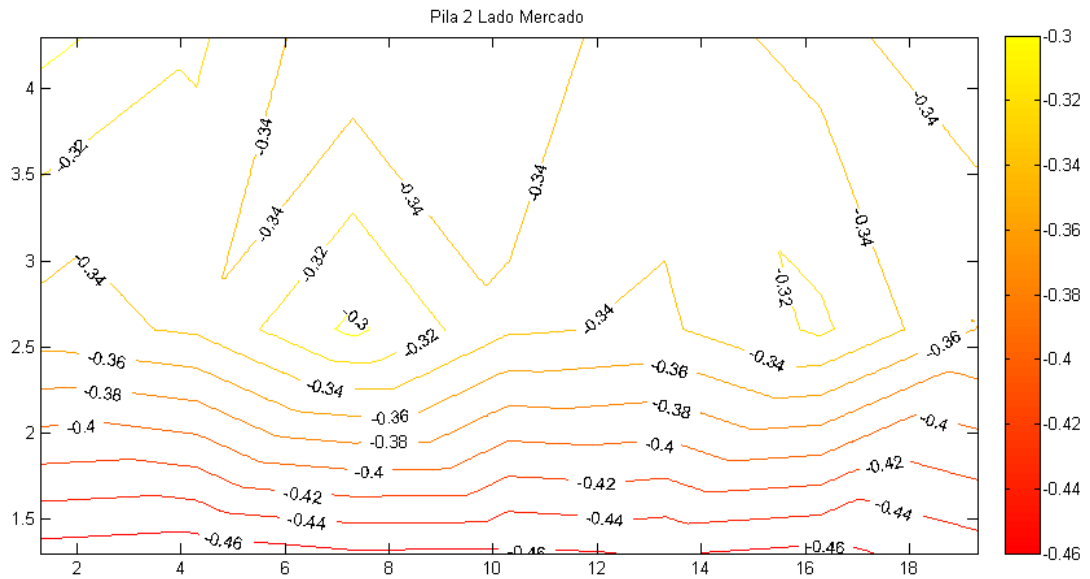
Para la pila 2 lado PJ, se observa, en el mapa equipotencial, que los potenciales en toda la zona de marea y en la coordenada G2 (hasta los 2.4 m aproximadamente) son más negativos que  $-0.35$  V CSE. En cambio, se observa que en el tramo E1-F1 existe un potencial cercano a

-0.35 V CSE. En el resto de la zona aérea, el potencial, se mantiene en el rango de -0.20 a -0.35 V CSE.



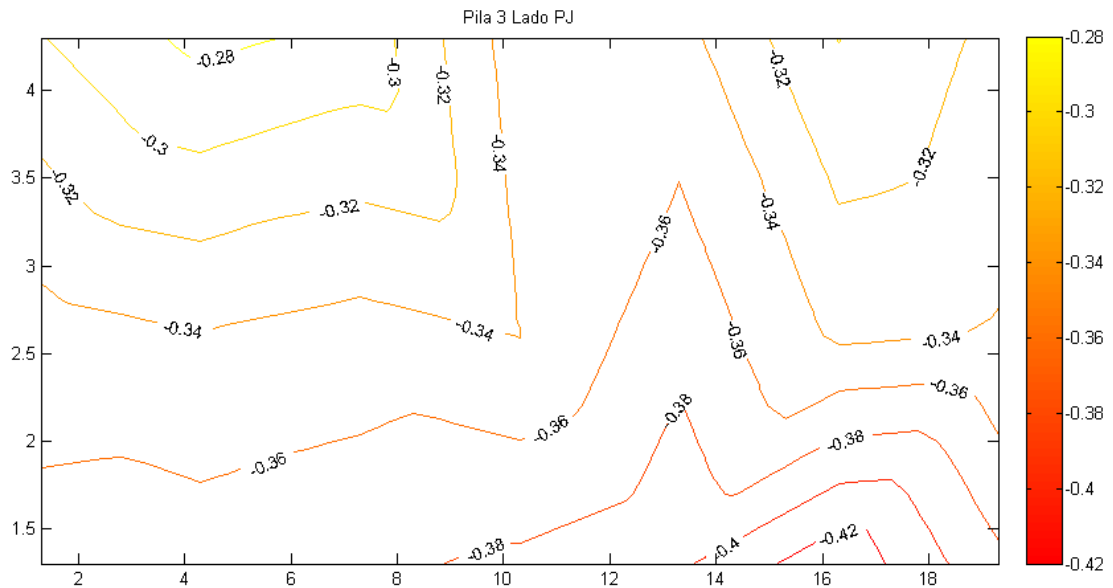
**FIGURA 4.5: MAPA EQUIPOTENCIAL P2-LP**

Para la pila 2 lado M, se observa, en el mapa equipotencial que los potenciales en toda la zona de marea y en la coordenada G2 (hasta los 2.4 m aproximadamente) son más negativos que -0.35 V CSE. En cambio se observa que en el tramo B1-D1 y F1 existe un potencial cercano a -0.35 V CSE. En el resto de la zona aérea, el potencial, se mantiene en el rango de -0.20 a -0.35 V CSE.



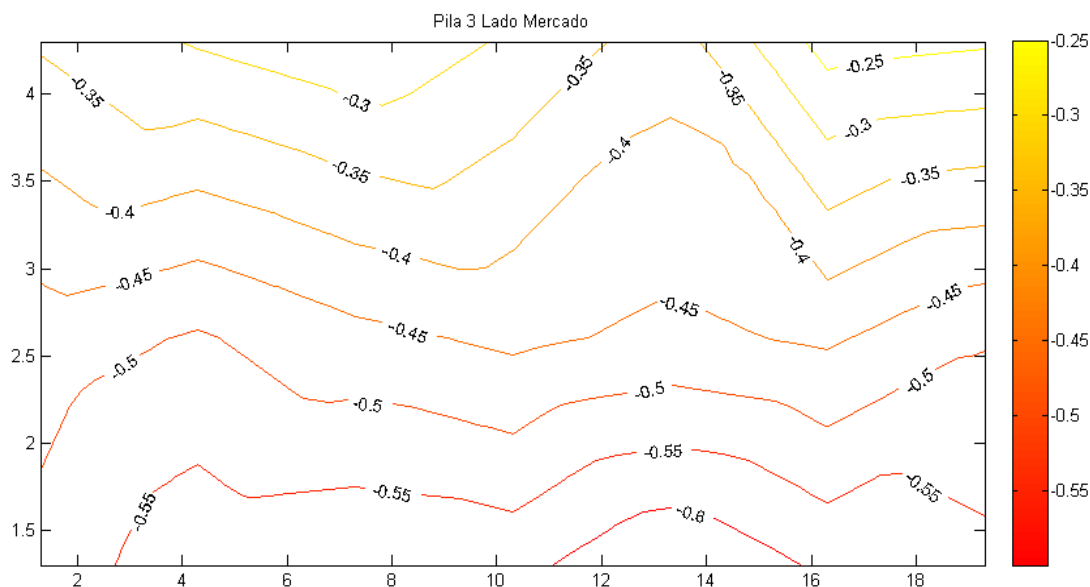
**FIGURA 4.6: MAPA EQUIPOTENCIAL P2-LM**

Para la pila 3 lado PJ, se observa, en el mapa equipotencial que los potenciales en toda la zona de marea y salpicadura (hasta los 2.4 m aproximadamente) para las coordenadas G2, E2, D2-A2 son más negativos que  $-0.35\text{V CSE}$ . En la coordenada C2 existe un potencial mayor. En el resto de la zona aérea, el potencial, se mantiene en el rango de  $-0.20$  a  $-0.35\text{ V CSE}$ .



**FIGURA 4.7: MAPA EQUIPOTENCIAL P3-LP**

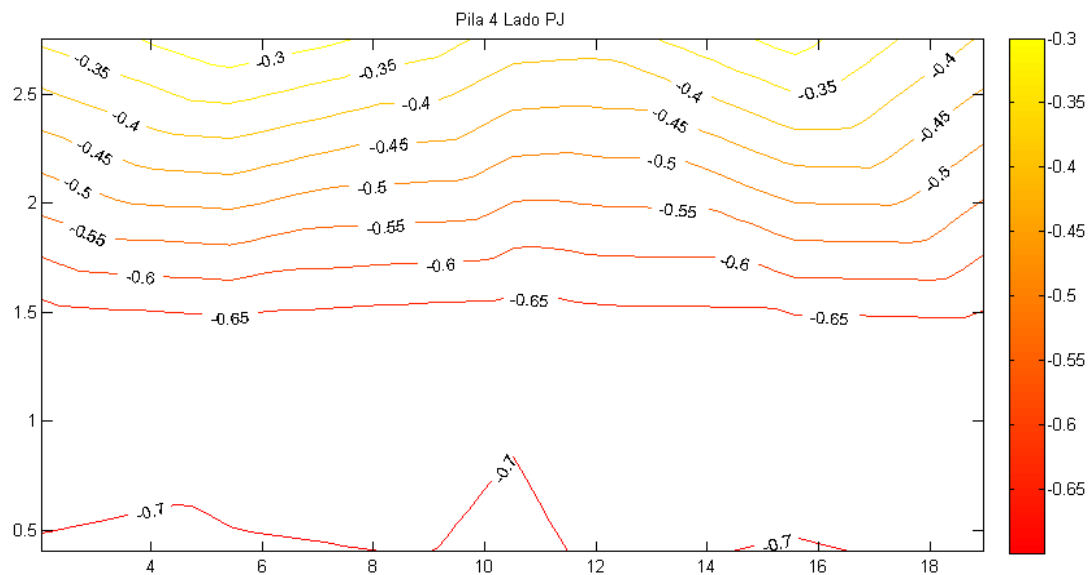
Para la pila 3 lado M, se observa, en el mapa equipotencial que los potenciales en toda la zona de marea, zona de salpicadura y zona aérea hasta los 3.5 m, a excepción de la coordenada B2, son más negativos que -0.35 V CSE con una intensidad mayor en el tramo D2-B2. También, se observa que en la coordenada A1 existe un potencial alrededor de -0.35 V CSE. En el resto de la zona aérea, el potencial, se mantiene en el rango de -0.20 a -0.35 V CSE.



**FIGURA 4.8: MAPA EQUIPOTENCIAL P3-LM**

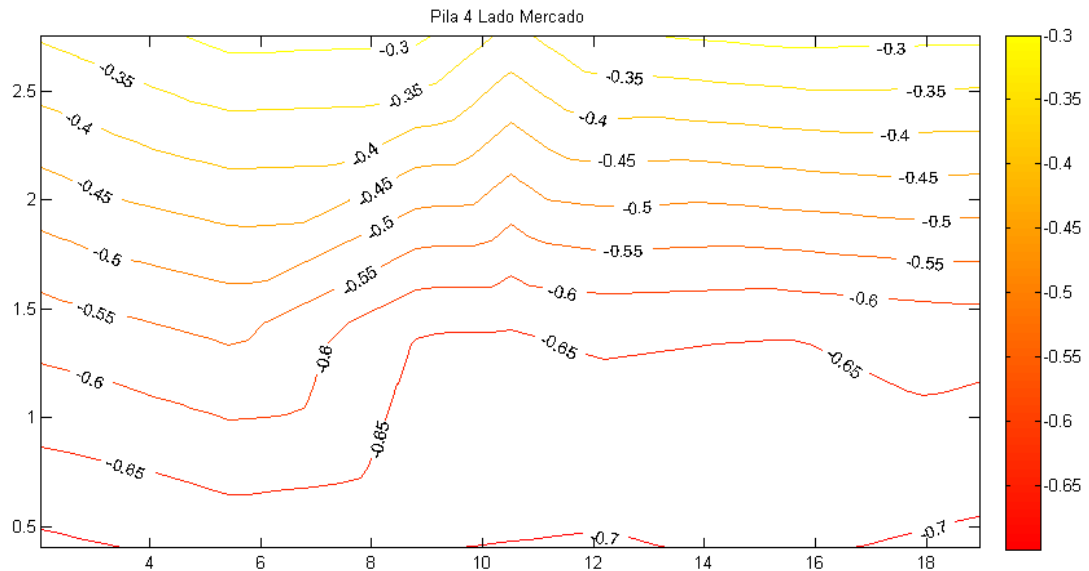
En las pilas 1, 2 y 3, se observan, en la zona de marea, que la resistividad del hormigón, se encuentra en el rango de 20 a 50  $k\Omega.cm$  que representa que el hormigón posee una humedad alta; sin embargo, esto representa un riesgo medio de corrosión, a pesar de encontrar valores de potenciales electronegativamente mayores que  $-0.35$  V CSE, debido a que los poros del hormigón se encuentran con una saturación tal, que el acceso del oxígeno es limitado en los periodos en los cuales, la marea se encuentra baja. Para alturas más elevadas que la coordenada 2, se evidencia una resistividad alta que indicaría un riesgo menor de corrosión.

Para la pila 4 lado PJ, se observa, en el mapa equipotencial, que los potenciales en la zona de marea (hasta los 2.5 m aproximadamente) son más negativos que  $-0.35\text{V CSE}$ . Se observa una mayor actividad en G1, D1-C1 y A1. En el resto de la zona aérea, el potencial, se mantiene en el rango de  $-0.20$  a  $-0.35\text{ V CSE}$ .



**FIGURA 4.9: MAPA EQUIPOTENCIAL P4-LP**

Para la pila 4 lado M, se observa, en el mapa equipotencial, que los potenciales en la zona de marea (hasta los 2.5 m aproximadamente) son más negativos que  $-0.35\text{V CSE}$ . Se observa una mayor actividad en G1 y D1. En el resto de la zona aérea, el potencial, se mantiene en el rango de  $-0.20$  a  $-0.35\text{ V CSE}$ .



**FIGURA 4.10: MAPA EQUIPOTENCIAL P4-LM**

En la pila 4, se observa, que en la coordenada 3, las resistividades son inferiores a  $20 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ , por lo cual, se creería que el riesgo es más elevado aunque se lo considera con un nivel de riesgo medio debido, a que, en estas zonas el acceso del oxígeno, se encuentra más limitado por ser la parte más baja de la pila. Sin embargo, en la coordenada 1, se observan resistividades en el rango de  $20$  a  $30 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$  y al ser esta zona de salpicadura, a unos cuantos centímetros por encima del nivel de marea, se encuentra en contacto constante con el oxígeno de la atmósfera, considerándose una zona de riesgo alto de la corrosión.

En cuanto a las mediciones de la velocidad de corrosión, la decisión de tomar las mediciones 20 cm por debajo del punto indicado resulta apropiada ya que se presentaba en una zona más próxima al nivel de marea alta (zona de salpicadura) y, además, que para el método mediante el cual el equipo calcula la corriente de corrosión es necesario conocer la distribución que existe de las varillas.

La velocidad presente de corrosión, se encuentra dentro de los rangos comúnmente hallados para estos puntos, en los cuales, se han tomado las mediciones. Esto, se debe básicamente a varias causas, entre las cuales, es la cercanía a la zona de marea (es decir, en la zona de salpicadura) y la exposición de una sección circular de las varillas que soportan la carga de flexión.

La velocidad de corrosión tiene una media de 0.08 mm/año, con un máximo de 0.10 mm/año. Estas velocidades de corrosión se encuentran dentro de los rangos esperados para las zonas de exposición a las cuales se encuentra sometida la estructura.

Finalmente, se considera que el estado del puente en términos de corrosión y durabilidad se encuentra en condiciones aceptables. Se evidencia que el hormigón posee una buena alcalinidad debido a que el

proceso de carbonatación no ha logrado penetrar en gran proporción a la pila, sin que haya alcanzado a la varilla de la armadura. No obstante, es necesario realizar una protección adicional a las zonas donde existe una actividad alta de corrosión.

# CAPÍTULO 5

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se concluye lo siguiente:

1. El equipo Gecor presenta un fácil manejo al mostrar una interfaz gráfica amigable al usuario aunque requiere de experiencia en el área de inspección de la corrosión debido a que se necesita evaluar las condiciones actuales del caso de estudio para determinar las mediciones que se realizarán y evaluar de una manera integral los resultados que se obtienen con el equipo.
2. El uso de ensayos no destructivos "*in situ*", realizados por el equipo, reducen los costos de operación al no necesitar la extracción de testigos y el uso de equipos de laboratorio. Además de que evalúa lo que sucede en tiempo real y reduce el riesgo de obtener mediciones que no revelarían la condición actual de la estructura.

3. La resistividad que se obtiene en estos ensayos permite detectar, con mayor facilidad, la humedad causante de una corrosión activa y determinar el tipo de zona al cual se encuentra sometido el hormigón.
4. El potencial de corrosión, el cual revela la posibilidad de corrosión en las varillas de acero, se complementa con las mediciones de resistividad del hormigón al permitir establecer con mayor acierto las zonas activas de corrosión y así tomar la decisión del lugar a realizar los ensayos de tasa de corrosión.
5. Para determinar la corriente de la corrosión, se requiere de la información estructural (ubicación y dimensiones de las varillas) para realizar el análisis cinético de la corrosión. El inconveniente con obtener los datos para este procedimiento es que, en la actualidad, se busca inspeccionar edificaciones antiguas, de las cuales se suele carecer de información de los planos con los detalles estructurales requeridos. Sin embargo, una vez obtenido los resultados, se conoce el deterioro de los refuerzos de acero.
6. En el caso de las pilas del puente Portete, con el resultado de la velocidad de corrosión, calculada a partir de la corriente de corrosión, se determinó que en la coordenada 2, se encuentra una corrosión activa que se corrobora con el hecho de que se halla

próximo a los defectos evidenciados en las líneas formadas durante las etapas de fundición al momento de la construcción.

7. El estado de deterioro del puente fue definido con la ayuda del equipo, permitiendo recomendar una restauración inmediata en las zonas de exposición de las varillas y en las líneas formadas en las etapas de fundición del hormigón durante la construcción.
8. Finalmente, el equipo Gecor 8 tiene una aplicación tecnológica y demanda elevada debido a que existen muchas estructuras de hormigón armado en el Ecuador, como puentes y edificios, cercanas a las terminaciones de sus vidas útiles que requieren diagnósticos de la situación actual de los refuerzos del acero en el hormigón.

Se recomienda lo siguiente:

1. Adquirir un equipo detector de varillas que no sólo permite conocer la ubicación de las varillas sino que también indica la profundidad y dimensión de la misma.
2. Incorporar el equipo Gecor 8 para futuras prácticas de la materia de corrosión, en la cual, se desarrolle una guía cuyo objetivo sea la comparación con el método tradicional de un potencióstato.

3. Utilizar el equipo para las investigaciones, la industria y las obras civiles con el objeto de evaluar la efectividad de aditivos empleados en el hormigón con el fin de proteger las varillas de la corrosión.
4. Después de cada uso de los sensores del equipo, se debe vaciar la solución del electrodo, para evitar la filtración y posterior cristalización del sulfato de cobre, que puede causar inestabilidad al momento de tomar lecturas.

# APÉNDICE

APÉNDICE A: EXTRACTO DEL MANUAL DE INSTRUCCIÓN DEL EQUIPO  
MEDIDOR DE TASA DE CORROSIÓN GECOR 8

APÉNDICE B: PLANOS

APÉNDICE C: PROGRAMA EN MATLAB PARA EL DESARROLLO DEL  
MAPA EQUIPOTENCIAL

## **APÉNDICE A**

### **EXTRACTO DEL MANUAL DE INSTRUCCIÓN DEL EQUIPO MEDIDOR DE TASA DE CORROSIÓN GECOR 8**

# Medidor de Velocidad de Corrosión GECOR 8 Manual de Instrucción



**CONTENIDO**

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....</b>	<b>12</b>
2.1. MEDIDOR DE TASA DE CORROSIÓN.....	12
2.2. SENSOR A.....	13
2.3. SENSOR B.....	14
2.4. SENSOR C.....	15
2.5. ACCESORIOS .....	16
<b>3. INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN.....</b>	<b>19</b>
3.1. PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN.....	19
3.1.1. SELECCIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN.....	19
3.1.2. CONDICIONES AMBIENTALES.....	21
3.1.3. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE .....	21
3.1.4. CONEXIONES ENTRE LOS EQUIPOS Y LA ESTRUCTURA .....	22
3.2. TOMANDO UNA MEDICIÓN .....	25
3.2.1. NOMENCLATURA.....	25
3.2.2. PANTALLA PRINCIPAL .....	27
3.2.3. SET-UP .....	27
3.2.4. TRABAJO Y SELECCIÓN DE MÉTODO.....	29
3.2.5. MAPEO.....	33
3.2.5.1. Comentarios previos.....	33
3.2.5.2. Iniciando una medición.....	33
3.2.5.3. Mapeo de la red .....	36
3.2.5.4. Movimiento a través de la red .....	37
3.2.5.5. Almacenamiento de datos .....	37
3.2.5.6. Medición de Icorr .....	38
3.2.6. MEDICIÓN EN ESTRUCTURAS AÉREAS ( <i>estructuras no sumergidas</i> ).....	39
3.2.6.1. Comentarios previos.....	39
3.2.6.2. Inicio de una medición.....	39
3.2.6.3. Resultados .....	42
3.2.6.4. Almacenamiento de datos .....	44
3.2.6.5. Medición de la resistividad .....	45
3.2.7. MEDICIÓN EN ESTRUCTURAS SUMERGIDAS O MUY HÚMEDAS.....	46
3.2.7.1. Comentarios previos.....	46
3.2.7.2. Iniciando una medición.....	46
3.2.7.3. Resultados .....	50
3.2.7.4. Almacenamiento de datos .....	51
3.2.8. MEDICIÓN EN LAS ESTRUCTURAS CON PROTECCIÓN CATÓDICA .....	53
3.2.8.1. Comentarios previos.....	53
3.2.8.2. Iniciando una medición.....	53
3.2.8.3. Resultados .....	57
3.2.8.4. Almacenamiento de datos .....	58
3.2.8.5. Medición de apagado instantáneo .....	58
<b>4. TRANSMISIÓN DE DATOS A UNA COMPUTADORA CENTRAL .....</b>	<b>62</b>
<b>5. MANTENIMIENTO DEL EQUIPO.....</b>	<b>65</b>
5.1. BATERÍA.....	65

5.2.	SENSORES.....	65
5.2.1.	GENERAL.....	65
5.2.2.	LIMPIEZA DE LOS SENSORES $Cu/CuSO_4$ .....	66
5.2.3.	RECARGA DE RESERVORIOS DE LA SOLUCIÓN $CuSO_4$ .....	66
5.2.4.	ALMOHADILLA.....	67
5.2.5.	TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO.....	67
5.3.	ACTUALIZACIÓN DE SOFTWARE.....	67
6.	CONTROL DE SU EQUIPO .....	69
6.1.	BATERÍA.....	69
6.2.	EQUIPO .....	69
6.3.	SENSORES.....	71
7.	SOLUCIÓN DE PROBLEMAS.....	73

## Anexos

ANEXO 1	FORMATO DE LOS ARCHIVOS DE TRABAJO .....	75
ANEXO 2	FORMATO DE LOS ARCHIVOS DE RESULTADO .....	78

## Figuras

FIGURA 1.- GECOR8 MEDIDOR DE VELOCIDAD.....	13
FIGURA 2.- SENSOR A ( $Cu/CuSO_4$ ) .....	13
FIGURA 3.- SENSOR A ( $Ag/AgCl$ ).....	14
FIGURA 4.- SENSOR B .....	15
FIGURA 5.- SENSOR C ( $Cu/CuSO_4$ ).....	16
FIGURA 6.- PAQUETE DE BATERÍA .....	17
FIGURA 7.- CELDA FALSA .....	17
FIGURA 8.- CARGADOR DE BATERÍAS .....	18
FIGURA 9.- LAS CONEXIONES ENTRE EL EQUIPO Y LA ESTRUCTURA .....	22
FIGURA 10.- DISPOSITIVO GECOR8 CON SENSOR A .....	24
FIGURA 11 -. DISPOSITIVO GECOR8 CON SENSOR B .....	24
FIGURA 12.- LA PARTE DELANTERA DEL MEDIDOR DE VELOCIDAD GECOR8.....	25
FIGURA 13.- MENSAJE DE ADVERTENCIA QUE INDICA UN VALOR FUERA DE LOS LÍMITES.....	26
FIGURA 14.- PANTALLA "MAIN SCREEN" .....	27
FIGURA 15.- PANTALLA "SET-UP" .....	28
FIGURA 16.- PANTALLA "TASK SELECTION" .....	29
FIGURA 17.- PANTALLA "METHOD SELECTION" .....	30

FIGURA 18.- PANTALLA "SENSOR A" .....	31
FIGURA 19.- PANTALLA "SENSOR B" .....	31
FIGURA 20.- PANTALLA "SENSOR C" .....	32
FIGURA 21.- PANTALLA "FIELD DATA" .....	34
FIGURA 22.- PANTALLA "MAPPING DATA" .....	35
FIGURA 23.- PANTALLA "MAPPING MEASUREMENT" .....	36
FIGURA 24.- PANTALLA "SAVE DATA" .....	38
FIGURA 25.- PANTALLA "AERIAL DATA" .....	40
FIGURA 26.- PANTALLA "CHECKING SYSTEM" .....	41
FIGURA 27.- PANTALLA "ELECTRODES STABILITY" .....	41
FIGURA 28.- PANTALLA "AERIAL MEASUREMENT" .....	42
FIGURA 29.- PANTALLA "AERIAL RESULTS" .....	43
FIGURA 30.- PANTALLA "SAVE DATA" .....	44
FIGURA 31.- PANTALLA "RESISTIVITY MEASUREMENT" .....	45
FIGURA 32.- PANTALLA "SUBMERGED DATA" .....	47
FIGURA 33.- PANTALLA "BARS DIMENSIONS" .....	48
FIGURA 34.- PANTALLA "CHECKING SYSTEM" .....	48
FIGURA 35.- PANTALLA "ELECTRODES STABILITY" .....	49
FIGURA 36.- PANTALLA "SUBMERGED MEASUREMENT" .....	50
FIGURA 37.- PANTALLA "SUBMERGED RESULTS" .....	50
FIGURA 38.- PANTALLA "SAVE DATA" .....	51
FIGURA 39.- PANTALLA "CP DATA" .....	54
FIGURA 40.- PANTALLA "CHECKING SYSTEM " .....	54
FIGURA 41.- PANTALLA "ELECTRODES STABILITY" .....	55
FIGURA 42.- PANTALLA "TIME WARNING" .....	56
FIGURA 43.- PANTALLA "CP MEASUREMENT" .....	57
FIGURA 44.- PANTALLA "CP RESULTS" .....	57
FIGURA 45.- PANTALLA "SAVE DATA" .....	58
FIGURA 46.- PANTALLA "IO MEASUREMENT" .....	59
FIGURA 47.- PANTALLA "IO RESULTS" .....	60
FIGURA 48.- PANTALLA "SAVE DATA" .....	60
FIGURA 49.- PANTALLA "FILES MANAGEMENT" .....	63
FIGURA 50.- MENÚ PRINCIPAL DEL RX8 .....	63
FIGURA 51.- RECARGA DE RESERVORIOS DE LA SOLUCIÓN $\text{CuSO}_4$ DE LOS SENSORES A Y C.....	66
FIGURA 52.- PANTALLA "PCMCIA CONTENTS" .....	67

<b>FIGURA 53.- PANTALLA "UPDATING SOFTWARE" .....</b>	<b>68</b>
<b>FIGURA 54.- COMPROBACIÓN DEL POTENCIAL DE LOS ELECTRODOS DEL SENSOR A.....</b>	<b>71</b>
<b>FIGURA 55.- PARÁMETROS DE LOS ARCHIVOS DE TAREAS.....</b>	<b>75</b>
<b>FIGURA 56.- PERÍMETRO DEL MAPEO .....</b>	<b>76</b>

**Tablas**

<b>TABLA 1.- RESUMEN DE MÉTODOS DE MEDICIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>TABLA 2.- PARÁMETROS PARA EL CONTROL CON LA CELDA FALSA.....</b>	<b>69</b>
<b>TABLA 3.- CORRESPONDENCIA DE LAS HORQUILLAS EN LOS SENSORES Y EQUIPOS.....</b>	<b>72</b>
<b>TABLA 4.- LISTADO DE LAS ADVERTENCIAS .....</b>	<b>73</b>

### 3. INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN

#### 3.1. PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN

##### 3.1.1. SELECCIÓN DE PUNTOS DE MEDICIÓN

Antes de iniciar un estudio de la corrosión es importante para seleccionar el número y ubicación de los puntos donde la velocidad de corrosión se puede medir. El número de puntos dependerá del tiempo disponible, el acceso, el tamaño de la estructura y la información disponible ya sea anterior al estudio o recogida del estudio. En cualquier caso, el objetivo es siempre la determinación del estado de corrosión de la estructura, la identificación de áreas con riesgo de corrosión y cuantificar en cada caso el nivel de corrosión.

Cada lectura tiene diferentes tiempos, dependiendo del tipo de medición necesarios. Sin embargo, el operador tiene que considerar también el tiempo necesario para obtener acceso a cada lugar, otras medidas tomadas y otros elementos logísticos relacionados con el sitio de trabajo. Esto controla el número total de lecturas que se pueden tomar.

Es evidente que la experiencia es importante para poder recoger los datos más útiles para un determinado tiempo y esfuerzo. La concentración de cloruro, manchas, tamaño de la cubierta, la profundidad de carbonatación, etc... también se puede utilizar en su caso.

Antes de iniciar las mediciones de la velocidad de corrosión en estructuras aéreas con el sensor A, la información anterior se puede obtener con el sensor B (**mapeo**) con el fin de tener una comprensión de la condición global de la estructura. Estas medidas se pueden tomar en una red en la superficie del concreto para identificar las áreas con riesgo de corrosión. La distancia entre el sensor y las barras de refuerzo tiene que ser siempre más de 5 cm (dos veces el diámetro del electrodo contador). Resistividad y Potencial de Corrosión son medidas que toman sólo 2 a 5 segundos y una combinación de estos dos parámetros también se da por GECOR8.

**Las mediciones en las estructuras aéreas (estructuras no sumergidas)** con el sensor A toman de 2-3 minutos, dependiendo de las condiciones de corrosión real. Hay también un tiempo de configuración de 2-5 minutos así que el operador debe conceder de 4-8 minutos por cada ubicación.

El sensor C se requiere para realizar **mediciones en estructuras sumergidas o muy húmedas**. Cada medición toma alrededor de 2-3 minutos y el tiempo de preparación depende de la ubicación de la medición.

Para las **mediciones en las estructuras con protección catódica**, el sensor A se debe utilizar porque la PVT necesita del confinamiento modulado. Cada medición toma alrededor de 10-12 minutos y otros 2-3 minutos para la puesta en marcha y estabilización. Puntos de medición deben ser representativos como suele ser sugerido. Cerca de la ubicación de los ánodos, la PVT mide su eficiencia. Por lo tanto, se sugiere empezar por medir cerca de los ánodos y en diferentes distancias más lejanas cuando la verificación de las distancias crítica de la protección es de interés.

En general, la planificación de la medición se puede hacer siguiendo tres métodos diferentes

#### **A. - Red regular de puntos de medición**

Este modo de operación se recomienda para las estructuras o elementos que tienen que ser estudiados a fondo, ya sea porque podría sufrir daños localizados o por las consecuencias de una falla estructural.

En este caso, los lugares de medición tienen que ser regulares y geométricos, generalmente asistiendo a una red en la que los vértices son los puntos de medición. Las distancias entre los puntos dependerán del tamaño del elemento y el espaciamiento de los refuerzos. Normalmente, esto podría ser de 20 a 100 cm.

Ejemplo 1: La pared afectada de un sótano por la fuga de agua de mar es posible debido a un golpe en la capa impermeable externa. En este ejemplo, el elemento tiene grandes dimensiones y está expuesta a los agentes agresivos sólo en zonas muy localizadas. Dependiendo de las dimensiones de la pared será conveniente una red de medición de 1m x 1m de distancia.

Ejemplo 2: Un rayo en un puente ... en el tramo. La red debe seguir la geometría y la distancia recomendada puede ser de 20-30cm.

#### **B. - Distribución estadística**

Está indicado para estructuras de gran tamaño, con diferentes elementos estructurales y repetitivos.

En este caso, las mediciones deben estar ubicadas en un porcentaje de los elementos, aumentando el número de puntos de medición cuando se detectan situaciones activas.

Ejemplo 3: 3 km de largo de un puente con 80 tramos y losa compuesta por 8 vigas.

En este ejemplo, el número de puntos de medición del muestreo dependerá de los daños aparentes en donde se vean defectos mediante una inspección visual.

#### **C. - Puntos de medición dispuestas en las áreas pertinentes**

Las ubicaciones de los puntos son elegidos como una representación del estado de la estructura, incluso en las zonas afectadas y no afectadas por los daños a la corrosión. El muestreo debe realizarse en los puntos significativos debido al nivel de daño aparente (con o sin daños) y el nivel de exposición o riesgo de corrosión (áreas sumergidas o bordes)

Este muestreo se puede hacer en todos los tipos de estructuras, siendo especialmente indicado para ser utilizado con otras técnicas de inspección de hormigón como la inspección visual, análisis químico, la ecografía, el núcleo de perforación, etc...

Ejemplo 4: Puente con tres tramos, con una placa con 4 vigas y las columnas 3, parcialmente sumergido.

En función de los daños observados visualmente, 10 o 15 puntos pueden ser suficientes. Estos puntos deben estar cerca de las muestras de hormigón perforado para determinar el contenido agresivo y cercanías a las zonas dañadas. Algunos puntos deberían estar ubicados en los bordes de las vigas y zonas de desagüe. Cualquier medida debería hacerse en la zona húmeda de las columnas.

### **3.1.2. CONDICIONES AMBIENTALES**

El medidor de velocidad de corrosión, como cualquier dispositivo que disponga de componentes electrónicos, no va a funcionar en condiciones extremas de temperatura o humedad. El dispositivo no se debe operar a temperaturas inferiores a 0 ° C (32 F), o permitir que se sobrepasen los 50°C (122 F). La humedad relativa no debe superar el 90% dentro de la unidad.

Si el ambiente supera estos límites, el medidor puede ser operado desde el interior de un recinto con aire acondicionado o vehículo. Un cable de 30 m. adicionales (100 pies) se puede proporcionar con GECOR8 para este propósito.

Cabe señalar que por debajo de cero, el agua en la esponja de la almohadilla se puede congelar dando lecturas erróneas o inestables. Si es esencial para recopilar datos en estas condiciones, entonces una solución de alcohol (10-30% de alcohol por volumen) reducirá el punto de congelación. También debe tenerse en cuenta que el agua de los poros del concreto también se puede congelar y reducir la velocidad de corrosión a proporciones insignificantes dando engañosamente bajas mediciones de velocidad de corrosión a bajas temperaturas.

### **3.1.3. PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE**

No debe haber un metal (electrónico) de cortocircuito de la barra a la superficie causada por alambres de amarre, clavos, etc, ya que distorsiona la lectura. La superficie debe estar limpia y libre de cualquier material aislante eléctrico o impermeable. Si hay alguna capa de acabado en la superficie de concreto se recomienda retirarlo (sólo en el sensor). Las irregularidades locales o capas aislantes deben ser evitadas o eliminadas mediante lijado o elegir otro lugar o pueden ser "subsanas" por el uso de almohadillas adicionales esponja. En las estructuras muy húmedas o sumergidas, moluscos o musgo deben ser eliminados. Debe haber contacto eléctrico completo (iónica) entre los electrodos y los electrodos auxiliares en el sensor y la superficie del concreto.

La superficie puede estar húmeda (pero no saturado) antes de aplicar el sensor. Agua potable ordinaria sin adición posterior (que no sea alcohol en condiciones de congelación como se describe más arriba) se recomienda para evitar la contaminación de las media celdas. Agua desionizada o destilada no se recomienda.

Huecos grandes, delaminaciones o grietas en el hormigón deberían ser evitados. Esto hará que la señal se desvíe de la ruta deseada, dando lecturas erróneas.

### 3.1.4. CONEXIONES ENTRE LOS EQUIPOS Y LA ESTRUCTURA

#### A) Refuerzo de contacto

Con el fin de completar el circuito, una conexión eléctrica debe ser realizada en el refuerzo. Debe hacerse sin crear un daño excesivo, con varillas de refuerzo que no están cubiertas o retirar la cubierta ligera de hormigón a lo largo de un tramo de varilla (1 o 2 cm de varilla de refuerzo).

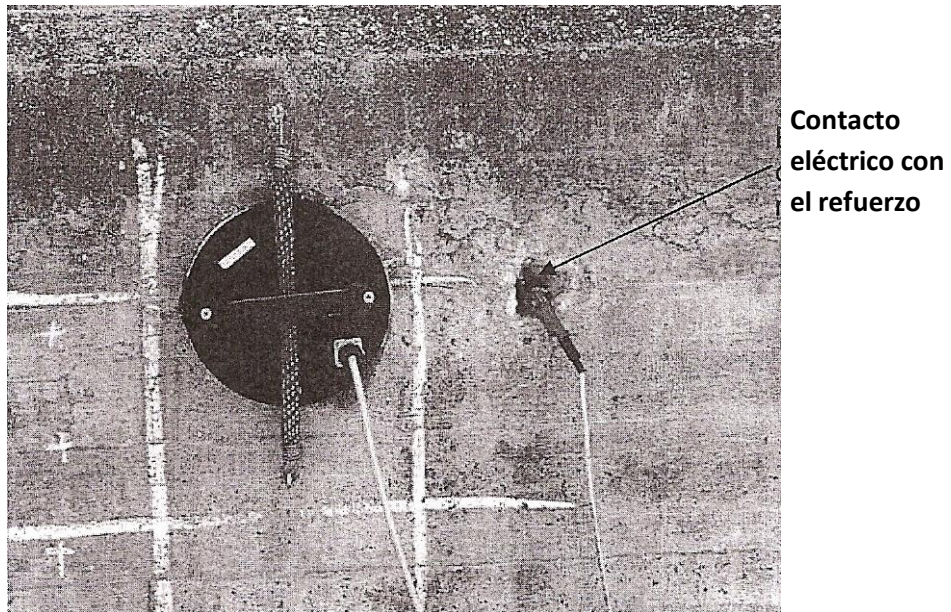


Figura 9.- Las conexiones entre el equipo y la estructura

En general, la armadura al interior de un elemento de concreto está conectado eléctricamente, y una conexión será suficiente para las diferentes medidas, incluso si los puntos están lejos del contacto. Cuando un elemento tiene puntos separados por una larga distancia (más de 30 m), se recomienda hacer más de un contacto con el acero de refuerzo. Además, la señal de medición tiene una intensidad muy baja para evitar alteraciones en la armadura. Por lo tanto, puede desaparecer a lo largo del hormigón debido a la alta resistencia del material.

Finalmente, el contacto tiene que ser hecho mediante el ajuste de la garra de cocodrilo (pinza) de la conexión del cable y la limpieza de la pinza y la superficie de las barras de refuerzo de cualquier óxido o de hormigón. La conexión debe comprobarse con un multímetro.

En el caso de las mediciones periódicas en los mismos puntos (evolución en el tiempo de la velocidad de corrosión) podría ser útil hacer contacto eléctrico permanente en la estructura, conectando un cable que pudiera ser controlado externamente y cerrando la superficie de concreto con un mortero.

En estructuras sumergidas o muy húmedas, contacto eléctrico debería estar en la zona aérea del refuerzo si es posible. Si no es así, un contacto aislado es necesario.

## **B) Ubicación del sensor**

Antes de colocar los sensores, es necesario conocer la ubicación de las varillas de refuerzo en el área de medición con un localizador de varillas de refuerzo.

La ubicación preferida para el sensor A y el sensor C es situarlo directamente sobre una varilla de refuerzo, ya sea una sola varilla o encima de un cruce. Con el método de confinamiento del sensor A, el diámetro de la varilla debe ser conocida. En el caso del sensor C, el refuerzo en un área de referencia (generalmente 1m<sup>2</sup>) debe ser conocido.

En las mediciones para mapeo con el sensor B, la distancia entre el sensor y el refuerzo debe ser superior a 50 mm (dos veces el diámetro del electrodo auxiliar). Por lo tanto, si el concreto cubre menos de 50 mm, es mejor colocar el sensor alejado del lugar de la varilla.

Los sensores tienen que mantenerse sobre la superficie de los electrodos y los electrodos auxiliares en pleno contacto con la superficie durante toda la medición. En el caso de los sensores de A o B, la esponja y la superficie del concreto deben ser humedecidas.

En las mediciones con los sensores A o C, se recomienda fijar el sensor con cualquier elemento externo (correas, accesorios...), ya que una pequeña oscilación puede causar fluctuaciones en las mediciones lo que la haría difícil. Sensor B debe ser colocado manualmente perpendicular a la superficie del hormigón.

Hay condiciones cuando el lado del contacto del sensor A o C no puede estar en pleno contacto con el hormigón, como se describe a continuación:

### – **Mediciones en las esquinas de armadura de acero**

Si la medición se realiza sobre estructuras aéreas (con el sensor A), gire el sensor de manera que los tres electrodos de referencia (media celdas) estén perpendiculares a los bordes. En ambos, el sensor A o C, todos los electrodos de referencia deben estar en contacto con el hormigón.

### – **Mediciones en elementos angostos (vigas)**

Asegúrese de que los electrodos de referencia estén en contacto con el hormigón, alineados sobre la varilla a la cual se va a realizar la medición.

### – **Superficies irregulares o curvas**

Esponjas húmedas adicionales se pueden aplicar con el sensor A para asegurar un buen contacto iónico entre el sensor y la superficie.

El sensor C debe trabajar con sus depósitos de solución Cu/CuSO<sub>4</sub> completos y se recomienda períodos sumergidos de no mucha duración. No hay experiencia en mediciones en lugares muy profundos.



Figura 10.- Dispositivo GECOR8 con sensor A

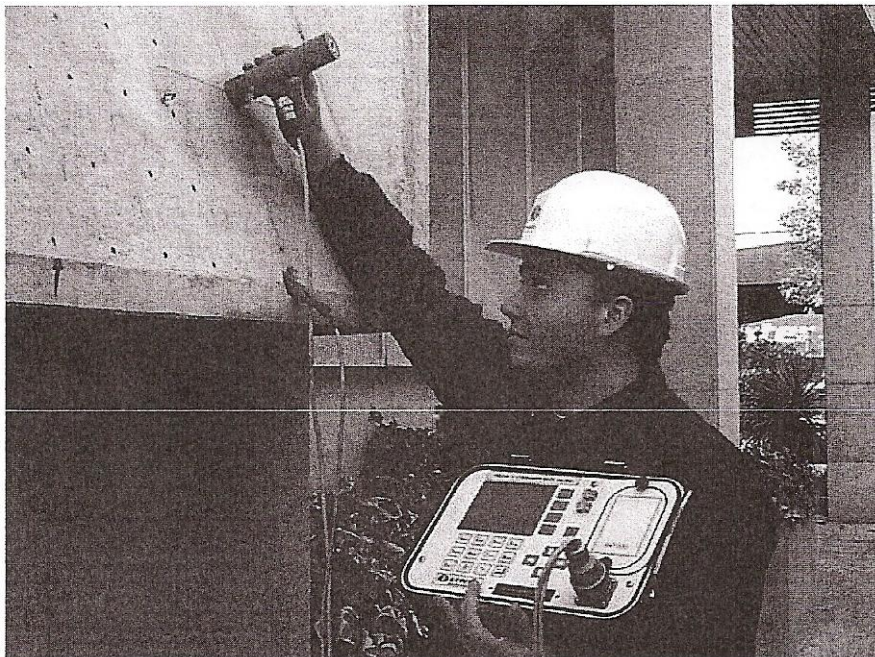


Figura 11 -. Dispositivo GECOR8 con sensor B

### 3.2.5. MAPEO

#### 3.2.5.1. Comentarios previos

Mapeo da valores numéricos de potencial de corrosión y resistividad del concreto y la identificación del nivel de riesgo de la corrosión (verde, naranja o rojo) en cada punto.

El nivel de riesgo de la corrosión se obtiene como una combinación de los dos parámetros medidos. Hay valores límites establecidos para  $E_{corr}$  y  $\rho$  que proporcionan los resultados de nivel de riesgo. Estos valores pueden ser cambiados por el operador en la pantalla "Set-up" (ver Figura 15), pero hay valores recomendados (véase el capítulo 3.2.3) y cambiarlos pueden dar resultados incoherentes de los resultados del nivel de riesgo. Hay diferentes valores límites recomendado de  $E_{corr}$  para  $Cu/CuSO_4$  y  $Ag/AgCl$ . Por lo tanto, antes de iniciar una medición, se recomienda asegurarse de que son los valores correctos para el sensor que está en uso.

Los parámetros que aparecen en la pantalla y que se guardan en el archivo de mapeo para cada punto de medición son las siguientes:

- Potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), mV.
- Resistividad ( $\rho$ ),  $K\Omega \cdot cm$ . Valor de la resistividad proporcionada por GECOR8 es el valor promedio de cuatro mediciones realizadas automáticamente por el equipo.
- Nivel de riesgo: es un código de colores de la combinación de los dos parámetros anteriores. Los tres niveles establecidos de riesgo de corrosión son:
  - Verde: de bajo riesgo
  - Naranja: riesgo medio.
  - Rojo: Alto riesgo.

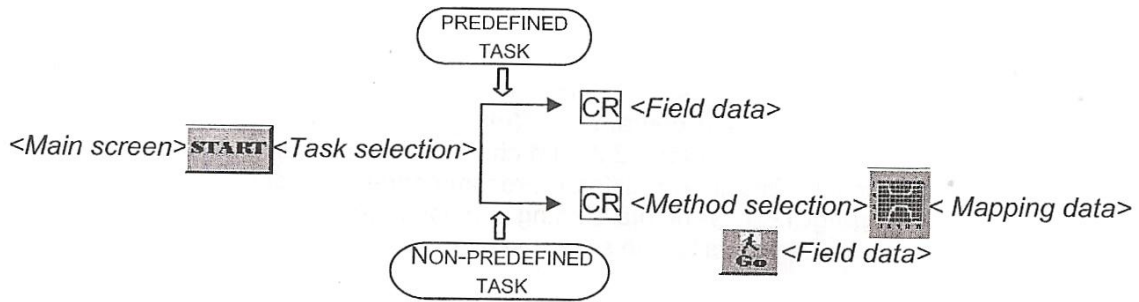
A veces puede ser útil para medir  $I_{corr}$  (con el sensor A) en un punto del mapeo. GECOR8 permite predefinir una tarea durante un mapeo en diferentes puntos. Para cada punto marcado, el equipo predefinirá una tarea. Después de haber terminado el mapeo se puede ir a la pantalla "Task selection" (Figura 16) y hacer la medición de la CORROSIÓN cambiando a el sensor A (Véase el capítulo 3.2.5.6). GECOR8 guardar automáticamente el resultado  $I_{corr}$  en el punto adecuado del archivo de mapeo. El usuario tiene la responsabilidad de hacer la medición en el punto del mapa seleccionado.

El parámetro que se visualiza en la pantalla de medición de la CORROSIÓN es el siguiente:

- La velocidad de corrosión ( $I_{corr}$ ).  $\mu A/cm^2$  (con el sensor A)

#### 3.2.5.2. Iniciando una medición

Para iniciar una medición, hay dos posibilidades para elegir en la pantalla <Task selection> (Figura 16) como se explica en el capítulo 3.2.4: tareas predefinidas o no predefinidas.



En el caso de tareas predefinidas (véase capítulo 3.2.4), la pantalla "Field data" (Figura 21) aparece justo después de seleccionar la tarea en la pantalla "Task selection" (Figura 16).

En la pantalla "Field data", el usuario puede introducir los datos de la inspección visual de la estructura y las condiciones ambientales para ayudar a la interpretación de los resultados obtenidos. Esta información no es necesaria para la medición.

Los parámetros que aparecen en la pantalla de "Field data " son los siguientes:

- Sensor de posición (alfanumérico): "Horizontal", "vertical" o "invertido".
- Condición visual del hormigón "concrete" (alfanumérico):
  - "Wet" (húmedo) o "Dry" (seco)
  - "Cracked" (fisurado) o "Cracked" (sin fisuras)
  - "Complete cover" (Cubierta completa) o "spalled cover" (cubierta desconchada)
  - "Clean" (Limpio) o "stain spots" (con manchas)
- El Tiempo "weather" (alfanumérico):
  - "Dry or sunny" (Seco o soleado) o "wet or raining" (húmedo o lluvioso)
  - "Hot" (caliente) (> 25 ° C), "fine" (bueno) o "cool" (frío) (<5 ° C)

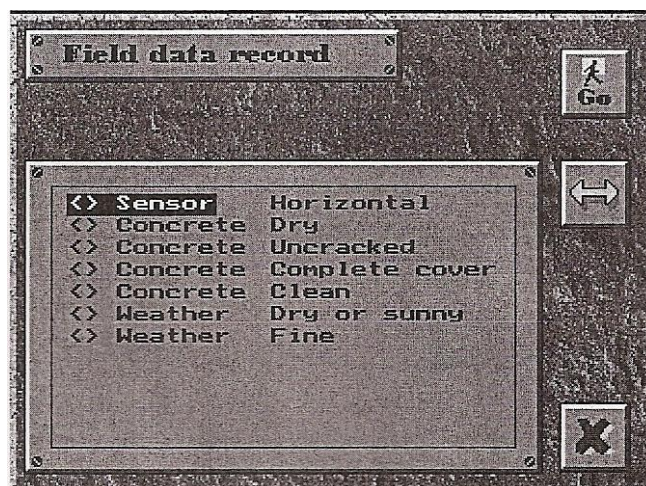


Figura 21.- Pantalla "Field data"

Para pasar de un parámetro a otro pulse las teclas o y para elegir en el menú entre los diferentes valores para cada parámetro active el ícono .

En caso de las tareas no predefinidas y después de seleccionar la opción de *Mapeo* en la pantalla "Method selection" (Figura 18), la pantalla " Mapping data" (Figura 22) aparece. Los parámetros que definen la medición de mapeo son los siguientes y pueden ser modificados como se explica en el capítulo 3.2.1.

- "Task name" Nombre de la tarea (alfanumérico): 8 caracteres.
- "Grid step X" Paso de la red en X (numérico): distancia entre puntos consecutivos a lo largo del eje X. Unidades de usuario.
- "Grid size X" Tamaño de la red en X (numérico): longitud total del eje X. unidades de usuario.
- "Grid step Y" Paso de la red en Y (numérica): distancia entre puntos consecutivos a lo largo del eje Y. Unidades de usuario.
- "Grid size Y" Tamaño de la red en Y (numérico): longitud total del eje Y. Unidades de usuario.
- "Grid path" Camino de la red (alfanuméricos): Random "aleatorio" (punto de medición es elegido por el operador moviendo el cursor a través de la red) o Regular (el cursor se coloca automáticamente por el equipo de abajo a arriba y de izquierda a derecha). Es posible trazar perímetros irregulares si se han introducido en una tarea predefinida (véase formato de los archivos en el Anexo 1).

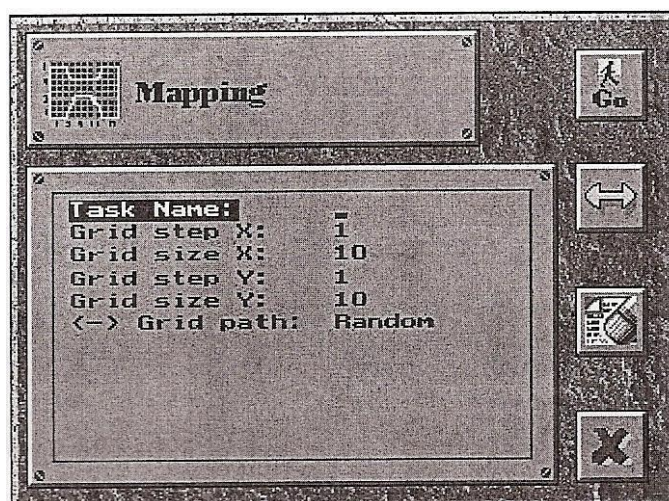



Figura 22.- Pantalla "Mapping data"

Después de la introducción de estos parámetros y activando el ícono  , la pantalla "Field data" aparece (Figura 21).

Para iniciar la medición, activar el ícono  en la pantalla "Field data" (Figura 21) y la pantalla "Mapping measurement" (Figura 23) aparece.

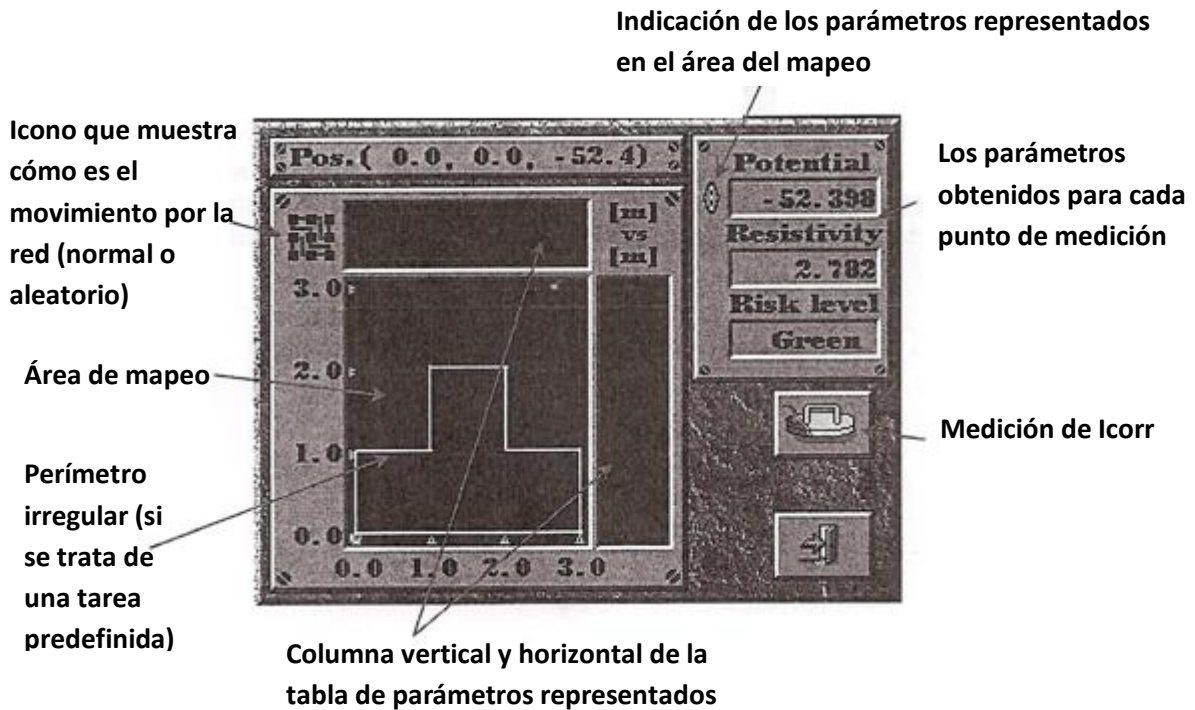


Figura 23.- Pantalla "Mapping measurement"

### 3.2.5.3. Mapeo de la red

En la representación de la red (Figura 23) hay tres zonas diferentes:

- Centro: vista del área de mapeo, con coordenadas (x, y) en unidades de usuario. Sobre esta área se mueve el cursor que indica el punto en el cual la medición se ha realizado. Para hacer un zoom de la zona representada, presione las teclas [5] y [6]. Si un perímetro irregular se ha asociado a una tarea predefinida (véase formatos de archivos en el Anexo 1), se muestra en el área de mapeo.
- Derecha: Muestra un gráfico de columnas del parámetro representado de los puntos en que la coordenada X tiene la misma posición que el cursor.
- Superior: muestra el gráfico de columnas del parámetro representado los puntos en que la coordenada Y tiene la misma posición que el cursor.

Texto en la esquina superior izquierda muestra tres valores (x, y, valor) donde x e y son las coordenadas de la posición del cursor y el valor es el resultado del valor obtenido durante el proceso de medición en este punto del parámetro representado.





En la esquina superior derecha de la pantalla, dos valores numéricos obtenidos en cada punto (potencial de corrosión y resistividad del concreto) y la identificación de los riesgos de corrosión (color verde, naranja o rojo) son mostrados.

El parámetro que se muestra en el gráfico de columnas se selecciona pulsando las teclas [1] o [2]. El parámetro representado está marcado con un símbolo (⊖) a la derecha del valor.

#### **3.2.5.4. Movimiento a través de la red**


Antes de colocar el sensor se emite un pitido regular. Las mediciones se inician automáticamente cuando se coloca el sensor sobre la superficie de hormigón. El equipo toma automáticamente la medición y se almacena para el punto de medición indicado por el cursor en la pantalla. Al finalizar la medición suena un pitido largo y, al mismo tiempo los resultados de este punto se muestran en la pantalla. Entonces usted tiene que quitar el sensor de la estructura, el cursor se desplaza a la siguiente posición y el pitido regular comienza de nuevo hasta que el sensor se coloca de nuevo en la superficie de concreto.

Es responsabilidad del operador colocar el sensor en la posición correcta sobre la estructura, con respecto a la posición del cursor en la red.


El cursor se desplaza automáticamente al siguiente punto de medición si la opción "regular" ha sido seleccionada en la pantalla "Mapping data" (Figura 22). Este movimiento del cursor a través de la red se realiza de abajo a arriba y de izquierda a derecha. Si la opción "random" (aleatorio) ha sido seleccionada, el cursor se tiene que mover con las teclas     a la posición adecuada.

El ícono en la esquina superior izquierda de la representación de la red muestra cómo es el movimiento por la red ("regular" normal o "random" aleatorio).

En el caso de tareas predefinidas con un perímetro definido, aparecerá en el área de mapeo (Figura 23) y no será posible mover el cursor fuera de los límites de este perímetro. Si un archivo del perímetro no existe, será posible mover el cursor dentro del rectángulo que define el área de mapeo.

Cuando la medición Icorr asociado a un punto de medición en el proceso de mapeo se requiere, entonces active el ícono  y una tarea para la medición de Icorr (sensor A) es predefinida para este punto (véase el capítulo 3.2.5.6).

#### **3.2.5.5. Almacenamiento de datos**

El proceso de mapeo termina cuando todos los puntos de medición se han ido o cuando el proceso se aborta con la activación del ícono . Y luego la pantalla de "Save data" (Figura 24) aparece.

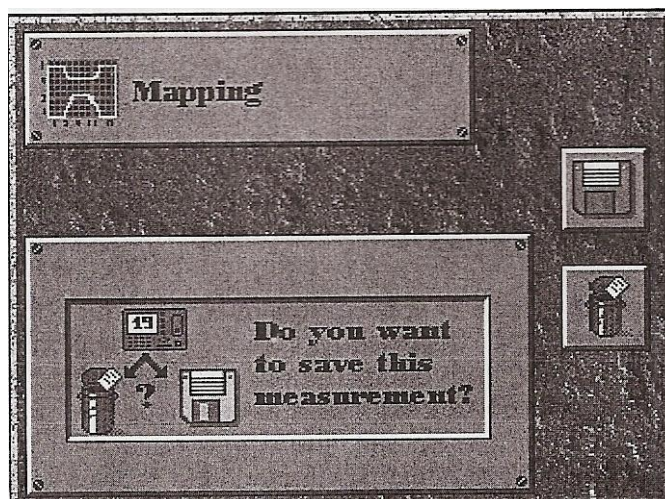




Figura 24.- Pantalla "Save data"


Activando el ícono  los datos se almacenan en la tarjeta PCMCIA y con el ícono  los datos son rechazados.

El archivo del mapeo con los resultados tiene el nombre de la tarea y la extensión. MAP. Formato de archivos de datos se muestra en el Anexo 2.

Cuando la tarea se termina, el archivo de tarea se actualiza con la fecha actual. Este parámetro es el que se muestra en la pantalla "Task selection" (Figura 16) si la tarea ha sido realizada.

Después de decidir si los datos se almacenan o no, el equipo vuelve a la pantalla "Main screen" (Figura 14).

### 3.2.5.6. Medición de Icorr

Después de haber terminado el mapeo y si el ícono  ha sido activado en la pantalla "Mapping measurement" (Figura 23), usted puede ir a la pantalla "Task selection" (Figura 16) y hacer la medición de la CORROSIÓN, cambiando al sensor A.

La tarea definida por el equipo tiene el nombre de la tarea de mapeo precedido por un guión. GECOR8 guarda automáticamente el resultado Icorr en el punto adecuado del archivo del mapeo. El usuario tiene la responsabilidad de hacer la medición en el punto del mapa seleccionado.

### 3.2.7. MEDICIÓN EN ESTRUCTURAS SUMERGIDAS O MUY HÚMEDAS

#### 3.2.7.1. Comentarios previos

El tiempo de polarización tiene un valor predeterminado que aparece en la pantalla "Set-up" (Figura 15) y el usuario puede cambiar como se explica en el capítulo 3.2.3. Este es el tiempo utilizado para la parte final de la medición de la resistencia de polarización. Su valor por defecto es de 80s.

La proporción de superficie entre las varillas de acero y el hormigón en una superficie de referencia de hormigón es necesaria para la medición. Varillas de acero en la primera capa cerca de la superficie del hormigón y dentro de la superficie de referencia deben ser sólo consideradas.

Los datos introducidos por el usuario son la superficie de referencia en la pantalla "Submerged data" (Figura 32) y el diámetro y la longitud de cada varilla de acero contenida en esta superficie de referencia en la pantalla "Bars dimensions" (Figura 33).


El valor recomendado para la superficie de referencia es de 1 m<sup>2</sup>. Si una de las dimensiones es inferior a 1 m (vigas...), el otro será considerado una longitud de 1m para el cálculo de la superficie de referencia.

Para los elementos pequeños (menos de 1 x 1 m), este método no se recomienda debido a que se pueden obtener resultados no válidos.

Relación superficial entre las barras de acero y el hormigón se calcula por el equipo y se muestra con los resultados en la pantalla "Submerged results" (Figura 37). A modo de ejemplo, la relación superficial (Sup.Rel) para una superficie de referencia de 1 m<sup>2</sup> que incluye 5 barras de acero de diámetro D mm es la siguiente:

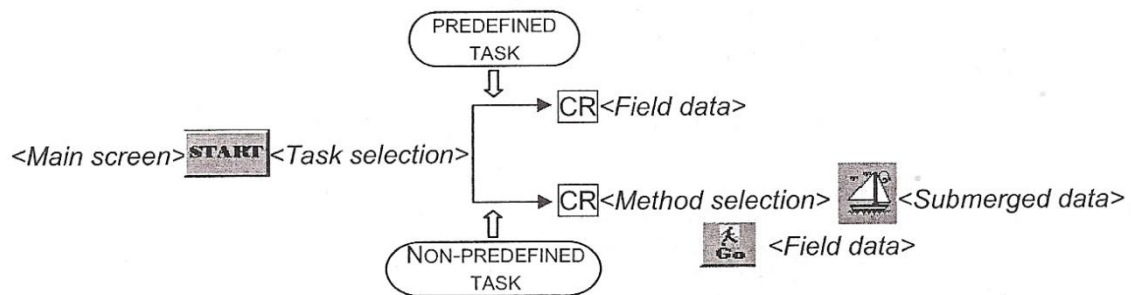
$$Sup. Rel. = \frac{(3.142 \times D \times 1) \times 5}{1m^2}$$

GECOR8 siempre tiene en cuenta que hay barras de acero en dos direcciones sobre la estructura y como en la mayoría de los casos hay un contacto eléctrico entre todos ellos, por lo cual este es un modelo bidimensional. En los casos particulares de barras de acero sin contacto eléctrico, el valor de la velocidad de corrosión se debe recalcular mediante la activación del

ícono  con la tecla **F2** (modelo unidimensional) en la pantalla "Submerged results" (Figura 37). En estos casos, sólo una barra ha de ser considerada y a pesar de que es necesario pasar por el cálculo bidimensional, en el archivo de resultados sólo el resultado de la corrosión unidimensional aparece. La aparición del mensaje 'non-isolated rebar' (varilla de refuerzo no aislada) se debe a que este botón no está siendo presionado en el momento adecuado.

#### 3.2.7.2. Iniciando una medición

Para iniciar una medición, hay dos posibilidades para elegir en la pantalla <Task selection> (Figura 16) como se explica en el capítulo 3.2.4: tareas predefinidas o no predefinidas.



En el caso de tareas predefinidas (véase capítulo 3.2.4), la pantalla "Field data" (Figura 21) aparece justo después de seleccionar la tarea en la pantalla "Task selection" (Figura 16).

En caso de tareas no predefinidas y después de seleccionar la opción *Measurement in submerged or very wet structures* en la pantalla "Method selection" (Figura 17), la pantalla "Submerged data" (Figura 32) aparece. Los parámetros que definen la medición sumergida son los siguientes y pueden ser modificados como se explica en el capítulo 3.2.1.

- "Task name" Nombre de la tarea (alfanumérico): 8 caracteres
- "Bars" Varillas (numérico): número de barras de acero debajo del sensor.
- "Ref. surface" Superficie de referencia (numérico): superficie de referencia de hormigón. Valor recomendado: 1. Unidades: m2. (Véase el capítulo 3.2.7.1)

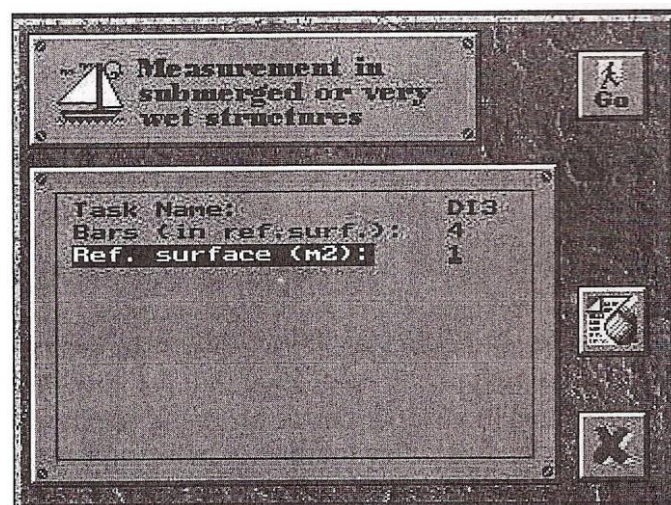



Figura 32.- Pantalla "Submerged data"

Después de la introducción de estos parámetros y activando el ícono , aparece la pantalla "Bars dimension".

- "Diameter" diámetro (numérico): diámetro de la barra de acero. Unidades: mm
- "Length" Longitud (numérico): longitud de la barra de acero limitado por la superficie de referencia. Unidades: mm

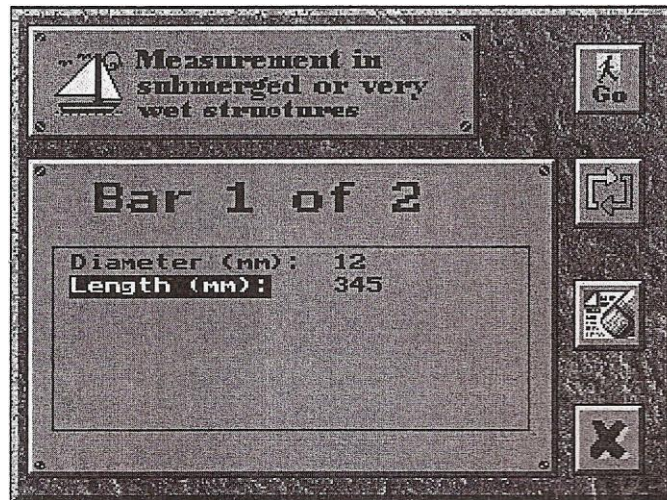





Figura 33.- Pantalla "Bars dimensions"

Para ir de una barra a otra, activar el ícono . Es necesario pasar por todas las barras.

Después de la introducción de estos parámetros y activando el ícono , aparece la pantalla "Field data" (Figura 21).

Los parámetros que aparecen en la pantalla "Field data" se describen en el capítulo 3.2.5.

Para iniciar la medición activar el ícono  en la pantalla "Field data" (Figura 21) y la pantalla "Checking system" aparecerá (Figura 34). La secuencia es:

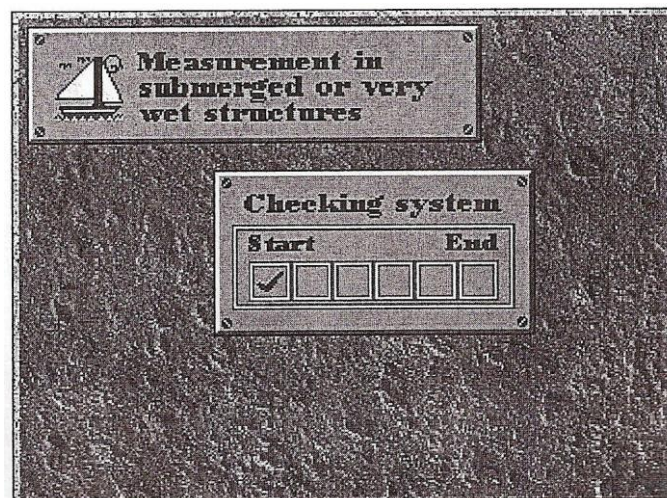
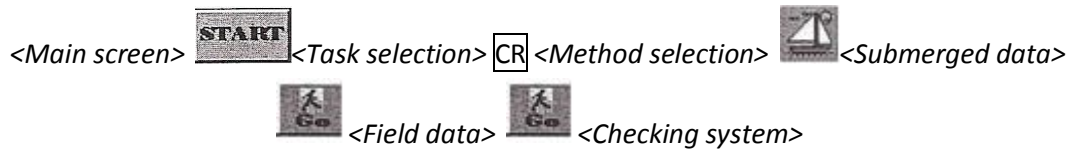


Figura 34.- Pantalla "Checking system"

El estado de la verificación interna se muestra en la pantalla "Checking system" (Figura 34). En esta pantalla no es necesaria cualquier acción por parte del usuario. Si el equipo detecta cualquier error en la comprobación, un número de aviso y su descripción aparecerá en un mensaje en la pantalla. Dependiendo de la advertencia la medición puede continuar, pero posibles resultados no válidos se pueden obtener. El capítulo 7 se muestra el resumen de advertencias que pueden aparecer en el equipo.

Cuando la verificación interna del sistema ha terminado, la pantalla "Electrodes stability" (Figura 35) aparece automáticamente.

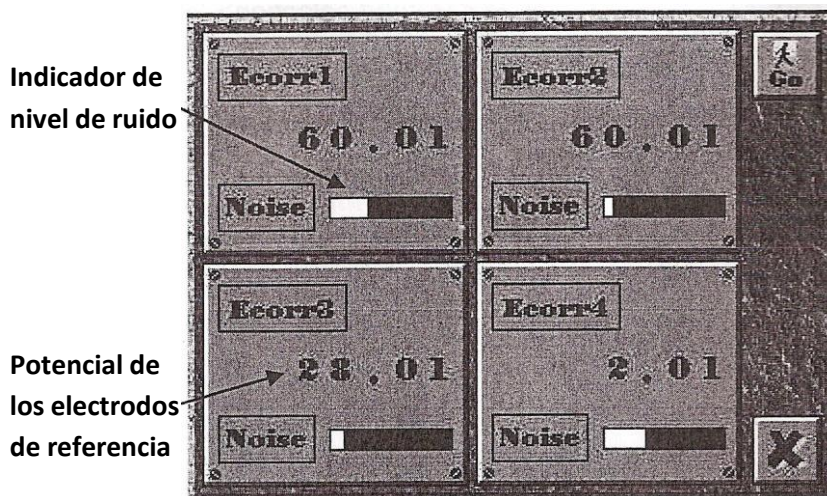
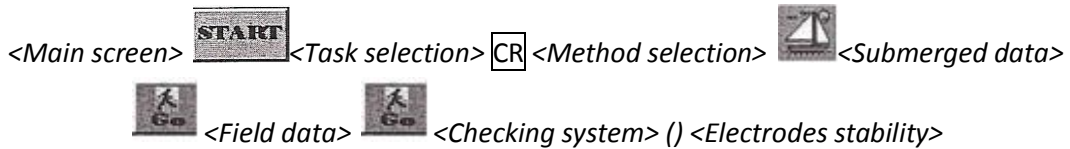




Figura 35.- Pantalla "Electrodes stability"

Para obtener buenas mediciones, lecturas estables de los electrodos de referencia son necesarias. Errores en la estabilidad de los electrodos de referencia podrían ser producidas por un mal contacto entre el sensor y la esponja, la esponja muy seca, mal contacto entre las varillas y alambre, etc.

Esta pantalla no sólo muestra información sobre el valor potencial, sino que también ofrece una indicación del cambio de potencial en las mediciones consecutivas (ruido) por medio de una barra que cambia con el nivel de ruido (más ruido = más barra).

Cuando se considera que la medición es estable, el usuario puede continuar la medición con la activación del ícono  y la pantalla "Submerged measurement" (Figura 36) aparece o cancelar la medición con el ícono .

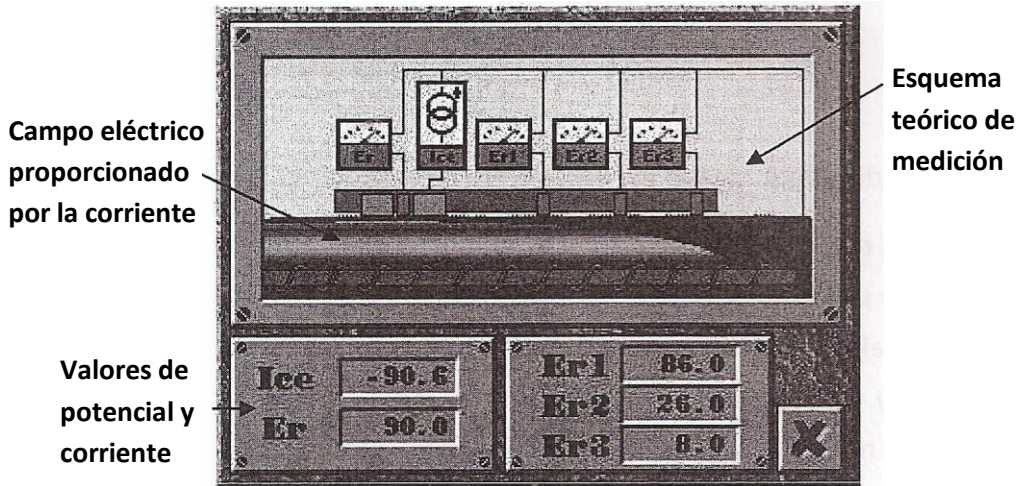
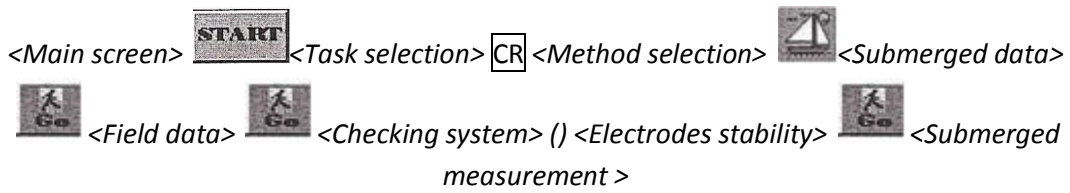


Figura 36.- Pantalla "Submerged measurement"

La pantalla "Submerged measurement" sólo necesita de la intervención del operador, si la medición quiere ser cancelada.

**3.2.7.3. Resultados**

Cuando la medición está terminada, los resultados aparecen en la pantalla "Submerged results" (Figura 37).

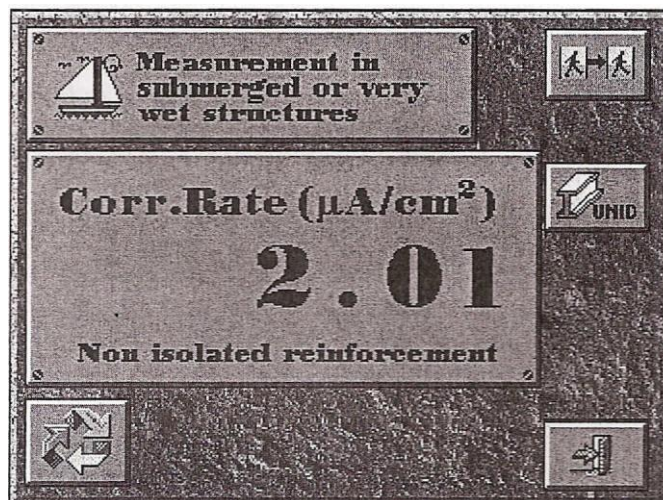
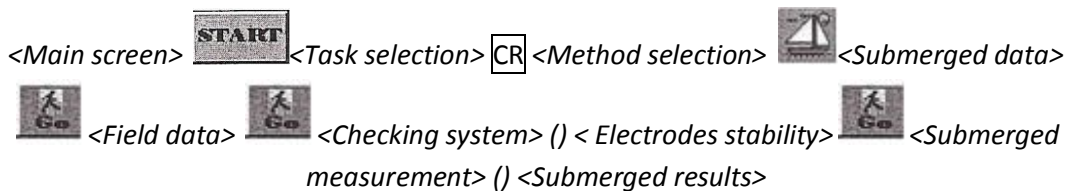






Figura 37.- Pantalla "Submerged results"

Los parámetros que aparecen en la pantalla son los siguientes:


- **“Corrosion rate”** La velocidad de corrosión ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).
- **“Corrosion potential”** Potencial de corrosión (mV).
- **“Concrete electrical resistance”** La resistencia eléctrica del hormigón ( $\text{K}\Omega$ ).
- **“Resistivity”** Resistividad ( $\text{K}\Omega \times \text{cm}$ ).
- Relación superficial entre las barras de acero y concreto (véase el capítulo 3.2.7.1).

Valores diferentes están disponibles activando el ícono  con la tecla **1**.

Para repetir la medición activar el ícono  con la tecla **F1** y el equipo vuelve a la pantalla "Electrodes stability" (Figura 34). Para terminar, activar el ícono  con la tecla **F4**.

Activando  con la tecla **F2** el valor de la velocidad de corrosión se puede recalcular como un modelo unidimensional (véase el capítulo 3.2.7.1).

#### 3.2.7.4. Almacenamiento de datos

Activando el ícono  de la pantalla "Submerged results" (Figura 37), aparece la pantalla "Save data" (Figura 38).

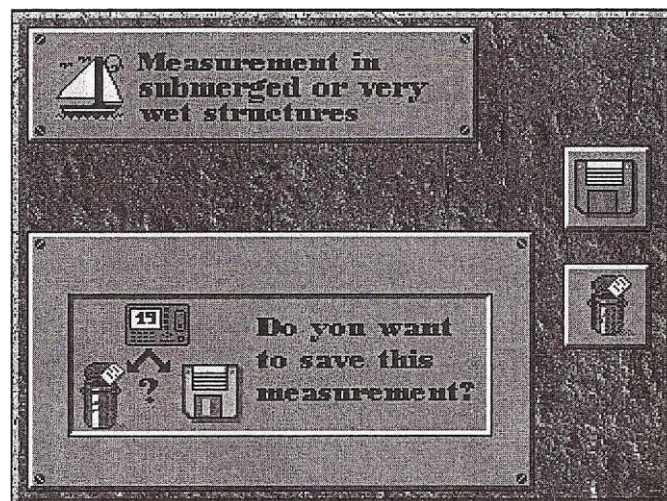




Figura 38.- Pantalla "Save data"

Activando el ícono  los datos se almacenan en la tarjeta PCMCIA y con el ícono  los datos son rechazados.

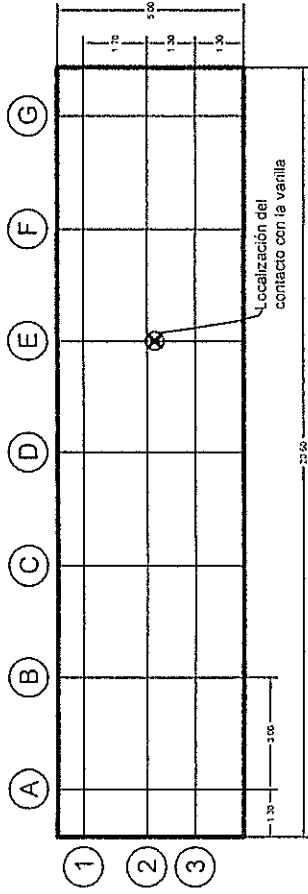
El archivo sumergido con los resultados tiene el nombre de la tarea y la extensión. E05. Formato de archivos de datos se muestra en el Anexo 2.

Después de decidir si los datos se almacenan o no, el equipo vuelve a la pantalla "Main screen" (Figura 14).

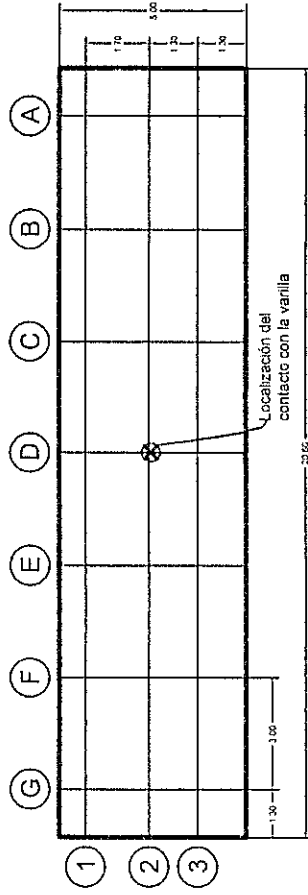
# **APÉNDICE B**

## **PLANOS**

# Pila 1 Lado M



# Pila 1 Lado PJ

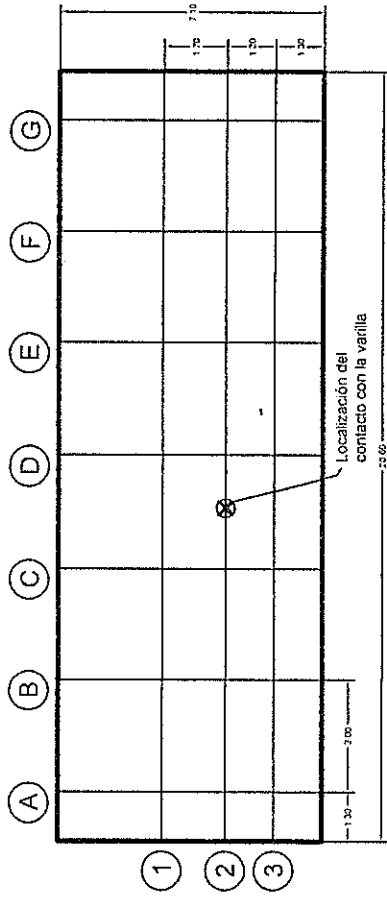


Unidades en metros

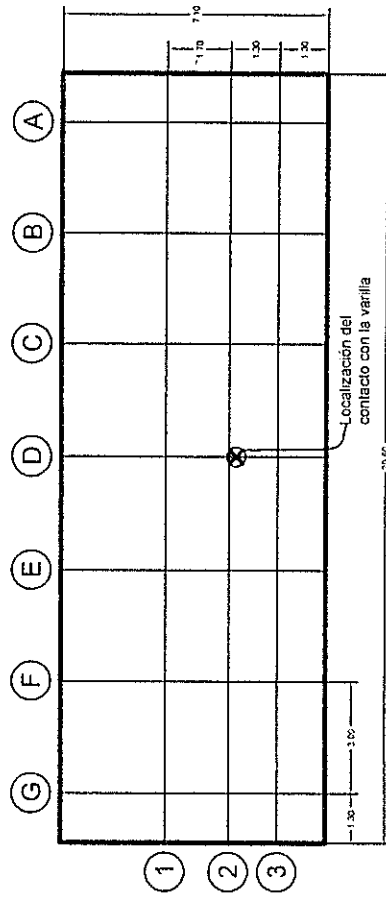


<b>ESPOL</b>		Facultad:	FIMCP
		Carrera:	INGENIERÍA MECÁNICA
Fecha:	10/12/2011	Tema:	Implementación de un Equipo para Análisis Cinético y Electroquímico en Campo del Hormigón Armado
Nombre:	Wesley Olaya	Título:	Cuadrícula de la pila 1 del puente Portete
Dibujado por:	Aprobado por:	Escala:	Lámina: 1/4

# Pila 2 Lado M



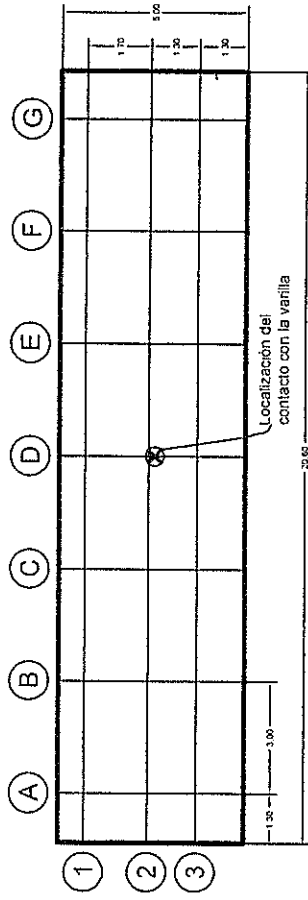
# Pila 2 Lado PJ



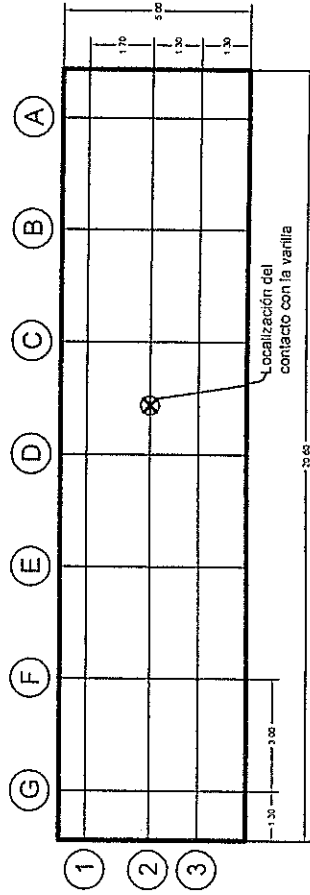
Unidades en metros

<h1>ESPOL</h1>		Facultad:	F I M C P
		Carrera:	INGENIERÍA MECÁNICA
Fecha:	10/12/2011	Tema:	Implementación de un Equipo para Análisis Cinético y Electroquímico en Campo del Hormigón Armado
Nombre:	Wesley Olaya	Título:	Cuadrícula de la pila 2 del puente Portete
Dibujado por:	Aprobado por:	Escala:	Lámina: 2/4

# Pila 3 Lado M



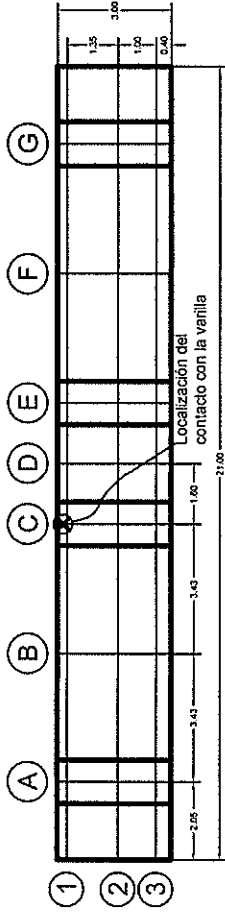
# Pila 3 Lado PJ



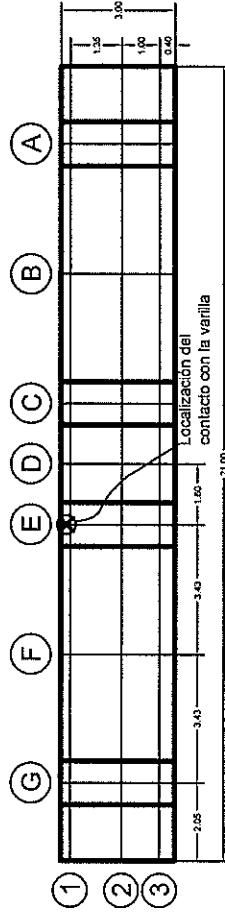
Unidades en metros

<b>ESPOL</b>		Facultad:	FIMCP
		Carrera:	INGENIERÍA MECÁNICA
Fecha:	10/12/2011	Tema:	Implementación de un Equipo para Análisis Cinético y Electroquímico en Campo del Hormigón Armado
Nombre:	Wesley Olaya	Título:	Cuadrícula de la pila 3 del puente Portete
Dibujado por:	Aprobado por:	Escala:	Lámina: 3/4

## Pila 4 Lado M



## Pila 4 Lado PJ



Unidades en metros

<b>ESPOL</b>		Facultad:	F I M C P
		Carrera:	INGENIERÍA MECÁNICA
Fecha:	10/12/2011	Tema:	Implementación de un Equipo para Análisis Cinético y Electroquímico en Campo del Hormigón Armado
Nombre:	Wesley Olaya	Título:	Cuadrícula de la pila 4 del puente Portete
	Dibujado por:	Escala:	Lámina: 4/4
	Aprobado por:		

# APÉNDICE C

## PROGRAMA EN MATLAB PARA EL DESARROLLO DEL MAPA EQUIPOTENCIAL

```
% -----Mapa Equipotencial-----  
% Desarrollado por Wesley Olaya  
  
% Se definen las coordenadas en X de los puntos de medición  
x=[1.3 4.3 7.3 10.3 13.3 16.3 19.3];  
  
% Se definen las coordenadas en Y de los puntos de medición  
y=[1.3 2.6 4.3];  
  
% Se ingresan las mediciones de los potenciales de corrosión  
z=[-478.98 -468.78 -441.85 -438.09 -462.15 -441.11 -400.17;  
    -328.47 -340.67 -308.20 -304.53 -344.27 -342.40 -356.82;  
    -310.87 -317.03 -294.57 -283.88 -333.50 -319.43 -324.60];  
  
% Contadores en cero  
contMenosNegativo=0;  
contMenosPositivo=0;  
  
% Permite determinar la cantidad de mediciones cuyo potencial  
% se encuentra en los rangos que solicita la norma ASTM C876  
for i=1:3  
    for j=1:7  
        % En el caso de potenciales mayores a -250 mV  
        if (z(i,j) > -250)  
            contMenosNegativo=contMenosNegativo+1;  
        end  
  
        % En el caso de potenciales menores a -350 mV  
        if (z(i,j) < -350)  
            contMenosPositivo=contMenosPositivo+1;  
        end  
    end  
end  
  
end  
  
% Se calcula el porcentaje de mediciones que se encuentra  
% en el rango solicitado por la norma
```

```
PorcentajeMenosNegativo=(contMenosNegativo/21)*100
PorcentajeMenosPositivo=(contMenosPositivo/21)*100

% Se convierte los potenciales de mV a V
z=z/1000;

% Se realiza una interpolación entre los valores ingresados
[xi, yi] = meshgrid(1.3:0.5:19.3, 1.3:0.1:4.3);
zi = griddata(x,y,z, xi,yi);

% Crea el mapa equipotencial a partir de los valores generados
[C,h]=contour(xi,yi,zi);
clabel(C,h)

% Se define el color de las líneas equipotenciales
colormap(autumn)
colorbar('location','eastoutside')

% Se define el título del gráfico
title('Pila 1 Lado Mercado')
```

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Jones Denny A. "*Principles and prevention of corrosion*", Upper Saddle River, NJ, USA, Pearson-Prentice Hall, 1992.
- [2] Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. "*Concrete. Structure, Properties And Materials*", Prentice Hall, 1986.
- [3] C. Andrade, "*Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras*", Madrid, España, CSIC, 1989.
- [4] Sandberg, P., "*Chloride initiated reinforcement corrosion in marine concrete*". Report TVBM-1015. Lund, Suecia: Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, 1998.
- [5] BS 6349-1 *Maritime structures. Code of practice for general criteria*

- [6] NEC-11. Norma Ecuatoriana de la Construcción. Decreto Ejecutivo N° 706 del 06 de abril de 2011.
- [7] ACI 318-08 Building Code Requirements for Structural Concrete.
- [8] Revie, R. Winston. "*Uhlig's Corrosion Handbook*", 3ra Edición, John Wiley & Sons, 2011.
- [9] K.D. Stanish, R.D. Hooton and M.D.A. Thomas, "*Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review*", FHWA Contract DTFH61-97-R-00022, Toronto, Canada, 2000.
- [10] Francisco Ripoll, "*Methods and Equipment for Non Destructive Testing of Reinforced Concrete in Harbour Docks*", Chalmers University Of Technology, Göteborg, Suecia, 2010.
- [11] ASTM C876 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete
- [12] Ryan C. Dunn, Guy D Davis and Robert Ross, "*Corrosion Monitoring of Steel Reinforced Concrete Structures Using*

*Embedded Instrumentation*”, NACE Paper No. 10173, 2010.

- [13] Germann Instrument inc., [http://www.germann.org/Articles/download\\_files/Spanish%20catalogs/GalvaPulse%20-%20Spanish.pdf](http://www.germann.org/Articles/download_files/Spanish%20catalogs/GalvaPulse%20-%20Spanish.pdf), 12 de Enero del 2012.
- [14] G. Duffó, S.B. Farina, E.A. Arva, C.M. Giordano y C.J. Lafont, “*Sistema integrado de monitoreo de la corrosión del acero en el hormigón armado*”, Congreso de Materiales y Metalurgia SAM-CONAMET, 2007.
- [15] Feliu, S., Andrade, C., Gonzalez, J. A. and Alonso, C., “*A new method for in situ measurement of electrical resistivity of reinforced concrete*”, *Materials and Structure*, Volume 29, 1996.
- [16] NDT James Instruments, “*Corrosion rate meter Gecor 8 - Instruction Manual*”, Second Edition, 2002.
- [17] DURAR, *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*, CYTED, Red Temática XV.B – Durabilidad de la armadura, España, 1997.