

# Evaluación de Hormigones Mediante Técnicas Cinéticas Electroquímicas para Control de la Corrosión.

Xavier Andrés Arcentales Bastidas <sup>(1)</sup>, Marcos Javier Bonifaz Vicuña <sup>(2)</sup>, Julián Peña Estrella <sup>(3)</sup>  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción <sup>(1), (2), (3)</sup>  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador  
[xaarcent@espol.edu.ec](mailto:xaarcent@espol.edu.ec) <sup>(1)</sup>, [mbonifaz@espol.edu.ec](mailto:mbonifaz@espol.edu.ec) <sup>(2)</sup>,  
Ing. Mecánico, Profesor FIMCP-ESPOL, [jpena@espol.edu.ec](mailto:jpena@espol.edu.ec) <sup>(3)</sup>

## Resumen

*El estudio presente tiene como objetivo determinar la velocidad de corrosión en las varillas de acero ASTM A-42 en dos tipos de hormigones diferentes, empleando dos técnicas electroquímicas, siendo esta la técnica para laboratorio como el equipo Potencio-Galvanostato y la técnica aplicada para campo como el equipo Gecor8, que sirven para determinar el comportamiento de las armaduras embebidas en hormigón. En la teoría se presenta las características y aplicaciones de los hormigones, un enfoque básico de los principios de la corrosión del acero en el hormigón, causas, efectos y el medio de exposición; y también el modelo de vida útil de Tutti, procedimientos y técnicas experimentales. También la descripción de los equipos y la técnica de resistencia de polarización para evaluar el estado de los hormigones. Se determinó la tasa de corrosión en las varillas de acero y el coeficiente de difusión de cloruro de los hormigones. Con el análisis se estudia el comportamiento de la velocidad de corrosión mediante gráficas y variables utilizadas en el hormigón. Se concluye el grado de confiabilidad de la técnica de resistencia de polarización y la aportación de los equipos en el estudio de la corrosión.*

**Palabras Claves:** *Técnicas electroquímicas, Gecor8, Potencio-Galvanostato, vida útil, resistencia de polarización, embebidas en hormigón, velocidad de corrosión, difusión de cloruro.*

## Abstract

*The objective of this project is to determine the velocity of corrosion of the ASTM A-42 steel rods in 2 different types of concretes, employing two electrochemical techniques, being a technique of laboratory, Potentiostate-Galvanostate equipment and the technique applied on field such as Gecor8 equipment, that are useful to determine the condition of the embedded reinforced concrete. In the theory, the characteristics and applications of the concretes are presented, a basic emphasis of the corrosion principles of the steel in the concrete, causes, effects and environment exposure; and also the useful life of Tutti's mathematical model, procedures and experimental techniques. Also the description of the equipments and the polarization resistance technique to evaluate the condition of the concretes. The rate of corrosion in the rods of steel was determined and the chloride diffusion coefficient of the concretes. With the results obtained, the behavior of the corrosion's velocity is studied through graphics and variables used in the concrete. The degree of trust of the polarization resistance technique and the contribution of the equipments in the study of corrosion is finished.*

**Keywords:** *Electrochemical Techniques, Gecor8, Potentiostate-Galvanostate, useful life, Polarization Resistance, Embedded in Concrete, Velocity of Corrosion, Chloride diffusion.*

## 1. Introducción

La evolución de la tecnología ha llevado a construir edificaciones en grandes ciudades del mundo, es por ello que se hace necesario la utilización de técnicas electroquímicas que realicen un diagnóstico del comportamiento de la corrosión de las armaduras de aceros en los hormigones. La velocidad de corrosión es de gran ayuda para verificar el estado en que se encuentran las varillas dentro de este tipo de estructuras.

El desarrollo industrial en el país ha permitido un crecimiento del estudio de técnicas que determinen el estado de las varillas mediante la velocidad de corrosión, esta tesis emplea técnicas electroquímicas con el uso de equipos de última tecnología en campo y en laboratorio.

Este estudio incluye los principios básicos de corrosión, factores, causas y efectos de la corrosión, medio de exposición. Las técnicas para determinar la tasa de corrosión y el coeficiente de difusión de cloruro en los hormigones. El análisis de los resultados, beneficios y fortalezas de los equipos, que permiten un mejor manejo del proceso de corrosión.

## 2. Los cementos y la corrosión de las armaduras en el hormigón

### 2.1. Los cementos y características

El cemento se elabora mediante mezclas de varios productos como yeso, clinker y otras adiciones. El proceso de calcinación, de calizas y arcillas es obtenido en las canteras y trituradas junto al hierro para dar origen al clinker. Una vez producido, el cemento es almacenado y distribuido a los clientes en sacos de 50 kilos o al granel en gran parte de la industria cementera.

Todos los cementos en HOLCIM S.A cuentan con la norma vigente NTE INEN 2380 equivalente a la ASTM-C1157 (norma norteamericana) cuyo requisito prioritario es el desempeño de los cementos hidráulicos al ser usados en hormigón. Esta norma moderna es aplicable a cementos tales como.

- Tipo GU (Uso General)
- Tipo HE (Alta Resistencia Temprana)
- Tipo HS (Alta Resistencia a los sulfatos)
- Tipo MH (Mediano calor de hidratación)
- Tipo LH (Bajo calor de hidratación)

Para nuestros tipos de probetas se usará dos tipos de cemento, el HE (Alta Resistencia Temprana) y el GU (Uso General). [1]

### 2.2. La corrosión de las armaduras en el hormigón

Se denomina corrosión al ataque destructivo que sufre un material, generalmente metálico, por reacción química o electroquímica con su medio ambiente (atmósfera, suelo, agua, etc). [2]

Además se puede definir a la corrosión como el proceso que tienden los materiales de abandonar el estado de transformación que el hombre los impuso, para regresar a su estado natural original. Este proceso de corrosión se debe a la interacción con varios agentes que lo aceleran como: el agua, oxígeno, productos químicos o biológicos, temperatura y el cambio de la composición del material. La corrosión de los materiales se puede hallar mediante ataque directo en seco u oxidación y en húmedo o electroquímica.

**2.2.1. Corrosión electroquímica.** Es un proceso natural que necesita de una zona anódica (la que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito para que esta ocurra, también es imprescindible que exista buena conexión eléctrica entre ánodos y cátodos. [3]

**2.2.2. Deterioro del acero en el hormigón.** La corrosión del acero en el hormigón es parte de un proceso electroquímico. Los potenciales electroquímicos que forman las pilas de corrosión y las causas que pueden dar lugar a la destrucción de la capa pasiva del acero se pueden generar de varias formas. [4]

- La presencia de una cantidad suficiente de cloruros (tanto porque se añadan durante el amasado como porque penetren desde el exterior).
- La disminución de la alcalinidad del hormigón por reacción con sustancias ácidas del medio.

El diagrama de Pourbaix es un diagrama de equilibrio que indica 3 zonas; de "inmunidad", "corrosión" y "pasividad". Inmunidad indica que el metal no es atacado, mientras que en la corrosión se produce el ataque, y la pasivación se produce cuando el metal forma una capa estable de un óxido u otra sal en su superficie.

La alcalinidad del hormigón está basada principalmente al hidróxido cálcico que se forma durante la hidratación de los silicatos del cemento y a los álcalis que puedan estar adheridos como sulfatos en el Clinker. Es por ello que se ubica el pH de la fase acuosa contenida en los poros en valores entre 12,5 y 14, es decir, en el extremo donde hay más alcalinidad de la escala de pH. A estos valores de pH en presencia de una cierta cantidad de oxígeno, el acero de las armaduras se encuentra por lo general en forma pasiva, es debido a esto que forma la capa de óxido transparente, compacta y continua que lo mantiene protegido por periodos indefinidos aun en presencia de humedades elevadas en el hormigón. [5]

**2.2.3. Modelo de vida útil de Tutti.** Una forma clara y concisa es aquella que durante el cual la estructura mantiene todas las características mínimas de funcionalidad, resistencia y apariencias externas forzadas. Tutti divide a la vida útil de las armaduras en dos períodos. El período de iniciación que es el tiempo necesario que tardará el cloruro en atravesar el

recubrimiento, alcanzar la armadura y provocar su despasivación, y un período de tiempo de propagación que comprende una acumulación progresiva del deterioro, hasta que alcanza un nivel inaceptable del mismo. Este modelo es, por el momento, puramente cualitativo, aunque por su simplicidad descriptiva, es muy citado en la durabilidad para los procesos de corrosión. [6]

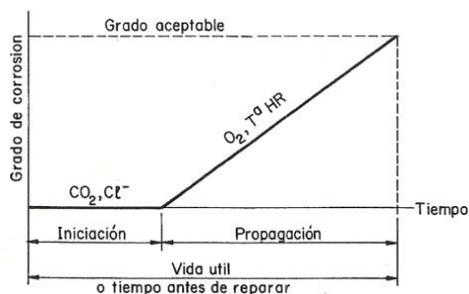


Figura 1. Modelo de vida útil de Tutti

**2.2.4. Método cinético para determinar la velocidad de corrosión.** En los procesos electroquímicos, la velocidad de corrosión viene dada por la corriente. Debido a esto se determinará el estado de las estructuras y saber como se está corroyendo.

$$V_{\text{corr}} = 0.0116 \times i_{\text{corr}} \quad (\text{ec. 1})$$

Donde  $i_{\text{corr}}$  está en  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

**Resistencia a la polarización.** La resistencia a la polarización ( $R_p$ ) o polarización lineal es una de las técnicas electroquímicas que ha sido desarrollado por Stern-Geary, se utiliza con la ayuda de herramientas experimentales, además aporta información mecanística que trabaja con instrumentación cara. Esta técnica se basa en la medición de la corriente entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo, esto corresponde a una pequeña modificación del potencial a partir del potencial de corrosión. Se calcula una resistencia llamada "Resistencia a la Polarización" que se interpreta como el comportamiento resistivo de la interfase metal-solución, que para un control activacional coincide con la resistencia de la transferencia de carga ( $R_{tc}$ ) de la doble capa electroquímica. La linealidad entre cambios de potencial y corriente, es vinculada por la ecuación de Stern-Geary donde la corriente de corrosión es inversamente proporcional a la resistencia a la polarización.

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p} \quad (\text{ec. 2})$$

El valor de  $R_p$  que se obtendrá no es completo, puesto que el valor de  $R_p$  será corregido restandole el valor de resistencia del electrolito  $R_{\Omega}$ . La magnitud  $B$  en la ecuación 2 es una simple función de las pendientes de Tafel. Se toma los valores de la magnitud de  $B$  para el sistema acero-hormigón,  $B=0,26$  V para el acero en estado activo y  $B= 0,52$  para estado pasivo.

### 2.3. El problema de la corrosión en las armaduras expuestas a atmósferas corrosivas

Sin duda alguna en los últimos años se ha dado gran atención a los cada vez mayores problemas que presenta la corrosión metálica, provocados por el progresivo deterioro del medio ambiente en todo el mundo. Numerosos trabajos han puesto de relieve la influencia de la contaminación atmosférica, especialmente en zonas urbanas e industriales, sobre la velocidad de corrosión de diferentes materiales. Los estudios han incidido en la relación que la contaminación del medio ambiente ejerce sobre la corrosión. En cambio, se ha dedicado mucha menos atención a la relación inversa, el efecto que la corrosión tiene sobre el medio ambiente, esto podría ser debido a que la acción de la corrosión sobre el medio ambiente suele presentarse de una manera menos general, con efectos más puntuales, tanto en su localización como en el tiempo, si bien casi siempre revestidos de gravedad. Por otra parte, la misma naturaleza de este tipo de problemas hace que en ellos se encuentren comprometidos técnicos como ingenieros de proceso o jefes de seguridad, la mayoría de las veces poco interesados en los fenómenos de corrosión, es por ello que se debe tomar muy en cuenta el estudio minucioso de los fenómenos que ocurren en la corrosión.

**2.3.1. Degradación del hormigón expuesto al ambiente marino.** El ambiente marino se presentará en diversos grados de agresividad para las estructuras de hormigón armado, según la Instrucción EHE española, clasifica el grado de agresividad mediante diferentes zonas:

- Zona aérea.- situada por encima del nivel del mar y con un nivel de influencia hasta 5 Km de la línea costera.
- Zona de marea.- es la zona de carrera de mareas.
- Zona sumergida.- la situada por debajo del nivel mínimo de bajamar. [7]

**Mecanismos de transporte.** Los mecanismos de transportes se origina por medio de la penetración de cloruros, estos son: permeabilidad, capilaridad, absorción, y difusión. La permeabilidad es un mecanismo de transporte muy rápido, mientras que en la difusión es mucho más lento.

**Modelización.** Se ejecutará la penetración de iones de cloruros, debido a esto se estudia diferentes leyes y no solo la de difusión, se aplicará la segunda "Ley de Fick" de difusión para saber el grado de concentración de iones de cloruros simulando ambiente marino (zonas atmosféricas, de carrera de mares, de salpicaduras o sumergida). Debido a una interacción compleja de mecanismos (absorción, difusión, fijación), el coeficiente de difusión  $D$  no es "real" y es considerado como un coeficiente de difusión "aparente".

Dependiendo de las condiciones de exposición del hormigón y su contenido de humedad, dominará el mejor mecanismo, cambiando la velocidad de ingreso del fluido (agua con iones de cloruro en este caso) en el material y cambiando la durabilidad del ciclo de "incubación" en el deterioro de las probetas.

Se realizará el estudio de los ciclos de humedecimiento y secado de los ambientes marinos y el agua de mar, en el medio ambiente se promueve la acumulación de iones de cloruro en las superficies de hormigón. Es por ello que en superficie real se encuentra retenida la mayor parte de iones de cloruros.

Será posible medir la concentración de iones de cloruro en un hormigón, en un cierto tiempo determinado, usando el modelo matemático de la segunda Ley de Fick, que se establecerá en forma de ecuación diferencial. La forma básica de esta Ley de Difusión se representa en la siguiente ecuación:

$$\frac{dC}{dt} = D \left( \frac{d^2C}{dx^2} \right) \quad (\text{ec. 3})$$

Donde:

C: Concentración de la sustancia (para iones de cloruro).

D: Coeficiente de difusión de iones de cloruro en el hormigón.

t: Tiempo

x: Profundidad de penetración a la que se hace el análisis.

Con la experimentación en hormigones se podrá medir las concentraciones de iones de cloruro presentes a varias profundidades de penetración y mediante la solución del modelo matemático planteado para procesos de difusión.

### 3. Ensayos experimentales para determinar velocidad de corrosión en varillas embebidas en hormigones

Se describe el orden metodológico, para lo cual se construyeron hormigones con una misma relación agua cemento la cual fue realizada en el centro técnico del hormigón en la empresa HOLCIM.S.A. Este hormigón servirá para los ensayos electroquímicos que están divididos en dos grandes grupos. El primer

grupo destinado a los ensayos de laboratorio con el tipo Potencio-Galvanostato que sirve para hacer ensayos de predicción de velocidad de corrosión de técnicas electroquímicas. Y el otro grupo destinados para los ensayos de campo empleando el equipo que recientemente fue adquirido por el LEMAT, que es el Gecor8. A continuación se describen los ensayos que fueron realizados para proceder con la investigación.

#### 3.1. Fabricación de probetas de hormigón armado

Las probetas empleadas en el presente trabajo, están constituidas:

a) Por cubos de hormigón de 10 cm de lado que contienen 4 barras de 10 mm de diámetro, dos barras de acero de ASTM A-42 y dos barras de acero AISI 304 de 10 mm de diámetro posicionadas en sus vértices de manera de obtener un espesor de recubrimiento de 10 mm. Estas probetas, fueron usadas para el análisis con el Potencio-Galvanostato y NILSSON 400, expuestas a medio ambiente y simulando un ambiente marino.

b) Por probetas rectangulares de 20 x 25 x 100 cm de profundidad que contienen 8 barras de acero ASTM A-42 y una lámina de Titanio que actúa como electrodo de referencia. Estos tipos de probetas fueron usadas para el análisis con el GECOR8 expuestas solo en medio ambiente.

c) Probetas cilíndricas de  $\varnothing$  10 x 20 [cm], para determinación del coeficiente de difusión de cloruros.

#### 3.2. Condiciones de exposiciones de los hormigones.

Las probetas están listas una vez que se retiran del molde y terminan el tiempo ideal de curado, estas probetas son sometidas a las respectivas condiciones de exposición.

**3.2.1. Medio ambiente.** Para las condiciones de exposición al ambiente natural, fueron colocadas en el Laboratorio de Materiales, para sus respectivas pruebas y usos de dichas probetas.

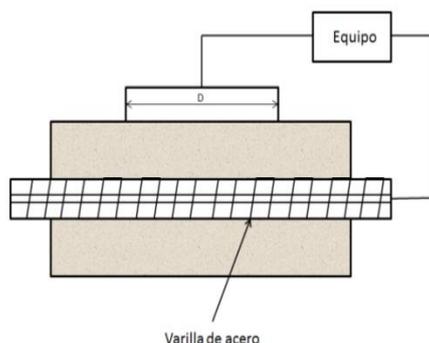
**3.2.2. Sumergidas simulando Ambiente Marino.** Para las condiciones de exposición en ambiente marino, se preparó la solución con un 3,5 % de Cloruro de Sodio mezclado con agua destilada, simulando agua de mar (con iones de cloruro).

#### 3.3. Técnicas empleadas en los ensayos para corriente de corrosión

Los principios en que se basan los equipos usados para los diferentes ensayos son: Resistencia a la polarización o Polarización lineal, Media celda y Disco para resistividad.

**Método de Resistencia a la polarización lineal.** La técnica electroquímica, comúnmente referida como la técnica LPR o de Resistencia de Polarización Lineal, es el único método que monitorea la tasa de corrosión de forma directa, en tiempo real. Aunque está limitado, su uso a medios conductivos líquidos, el tiempo de respuesta y la calidad de los datos que aporta esta técnica es claramente superior, donde sea aplicable, frente a todos los otros medios de monitoreo de corrosión.

**Método de Disco para resistividad.** La resistividad ( $\rho$ ) es una medición complementaria para establecer el riesgo de corrosión ya que está relacionado con el contenido de humedad del concreto. Esta técnica implementada en GECOR8 consiste en formar un circuito, en el cual se coloca un disco metálico sobre la superficie del hormigón y para cerrar el circuito con la pinza de lagarto nos agarramos a una de las varillas de la estructura de acero del hormigón armado tal como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.** Circuito cerrado del método de disco para medir resistividad del hormigón usando el Gecor8

Esta técnica implementada hace uso de la fórmula:

$$\rho = 2RD \quad (\text{ec. 4})$$

Donde:

R: es la resistencia (caída óhmica) desde un pulso entre el electrodo auxiliar del sensor y la red de las varillas de refuerzo.

D: es el diámetro del electrodo opuesto.

La técnica es aplicada a través de un sensor muy pequeño que permite acceso a cualquier parte en la estructura.

Los sensores tienen diferentes aplicaciones que se acoplan al tipo de trabajo que se requiere realizar y la aplicación de acuerdo a las condiciones de la estructura. La clasificación de sensores que dispone el Gecor8 para diferentes condiciones de trabajo y aplicación esta resumida en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Resumen de métodos de medición

Sensor	Aplicación	Técnica	Mediciones
A	Mediciones en estructuras aéreas	Técnica de confinamiento modulado (MCT)	Tasa de corrosión Potencial de corrosión Resistencia eléctrica del hormigón
	Medición en estructura con protección catódica	Técnica de verificación por pasividad (PVT)	Potencial de corrosión Eficiencia de protección
		Técnica de apagado instantáneo (IOT)	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 (APT)	Tasa de corrosión Potencial de corrosión Resistencia eléctrica de concreto Resistividad

Los sensores A y B fueron usados para los hormigones rectangulares. Las mediciones fueron hechas después de los 28 días de curado más los 15 días adicionales en el cual suman un total de 43 días después de que el hormigón fue elaborado.

**Método de Media celda.** El método de media celda es conocido y usado para la medición de un potencial de una varilla de acero dentro de un hormigón. Este método solo es conocido para identificar ciertas áreas para determinar riesgos de corrosión dentro del acero, la media celda de trabajo más común es de cobre/sulfato de cobre. El método se limita a un circuito eléctrico para ello es importante que esté conectado en un extremo donde la varilla esta descubierta como se encuentra en la Figura 3.



**Figura3.** Circuito de media celda de cobre/ sulfato de cobre

### 3.3.1. Ensayos cinéticos y de laboratorio usando el Potencio-Galvanostato

**Resultados experimentales para obtener la resistencia de polarización.** En esta parte del trabajo se muestran los resultados obtenidos mediante la aplicación de la técnica de resistencia a la polarización lineal (RPL) y medición de resistencia eléctrica del hormigón. Para la determinación de la velocidad de corrosión de barras de acero embebidas en hormigón, las probetas fueron sometidas a dos condiciones de

exposición: a) medio ambiente y b) simulando ambiente marino. Se toma como ejemplo el hormigón tipo HE sin inhibidor.

**Tabla 2.** Hormigones HE sin inhibidor expuestos al medio ambiente natural

MEDICIÓN No	FECHA	CÓDIGO PROBETA	POTENCIAL DE CORROSIÓN Ecorr [mV]		POTENCIAL EN vs CSC [mV]				CORREGIDO			PROMEDIO			Resumen	
			Ax	Ay	CARA 1	CARA 2	CARA 3	CARA 4	Promedio	Ecorr [mV] (Ecorr Ax)	Ecorr [mV] (Ecorr Ay)	PROMEDIO [mV] (PROMEDIO)	Ecorr CSC [mV] (Ecorr CSC)	Ecorr CSC [mV] (Ecorr CSC)		Ecorr CSC [mV] (Ecorr CSC)
			ax	ay												
1	15/08/2012	HE-SI-RP-N-01	60	51.4	161.2	155.9	141.3	142.2	150.15	-90.15	-90.75	-94.45				
		HE-SI-RP-N-02	261.6	178.8	306	304.2	308	299.2	299.35	-117.75	-120.55	-119.15	-108.138	-0.1081		
		HE-SI-RP-N-03	173.6	183.8	300.2	297.3	294.4	286.1	289.5	-115.9	-105.7	-110.8				
2	30/08/2012	HE-SI-RP-N-01	300.1	108.3	175.6	174.1	172.2	157.1	169.75	-69.65	-51.45	-65.55				
		HE-SI-RP-N-02	138.8	137.9	277.4	258.5	273.8	266.6	269.075	-130.275	-131.175	-130.725	-106.967	-0.1070		
		HE-SI-RP-N-03	118.7	113.5	246.7	244.3	240.1	231.8	240.725	-122.025	-127.225	-124.625				
3	14/09/2012	HE-SI-RP-N-01	110	104.9	244.3	240.2	232.9	240.7	239.275	-129.275	-134.375	-131.825				
		HE-SI-RP-N-02	180.9	174.5	236.4	246.9	241.9	242.825	242.825	-61.925	-68.125	-65.125	-88.825	-0.0888		
		HE-SI-RP-N-03	175.2	181.1	251.7	251.4	248.4	247.2	247.675	-72.475	-66.575	-69.525				
4	29/09/2012	HE-SI-RP-N-01	73.4	61.7	230	230	200	200	215	-141.6	-153.3	-147.45				
		HE-SI-RP-N-02	80.8	76.6	250	240	220	140	212.5	-131.7	-135.9	-133.8	-169.35	-0.1694		
		HE-SI-RP-N-03	98.1	88.4	300	300	300	300	300.05	-221.95	-231.65	-226.8				
5	15/10/2012	HE-SI-RP-N-01	131.5	97.1	396	399	354.6	361	352.4	-220.9	-255.3	-238.1				
		HE-SI-RP-N-02	74.2	40	132.5	200	194.3	197.2	178.5	-104.3	-138.5	-121.4	-155.675	-0.1557		
		HE-SI-RP-N-03	49	47.3	212.5	204	200.5	190.7	200.175	-110.175	-104.675	-107.525				
6	30/10/2012	HE-SI-RP-N-01	201.2	189.7	388.8	366.4	323.8	338.8	349.45	-149.25	-160.75	-154.5				
		HE-SI-RP-N-02	183.5	157.6	354.4	362.4	353.7	353	358.425	-143.525	-130.625	-137.075	-160.14	-0.1601		
		HE-SI-RP-N-03	186.4	70.1	396.2	388.5	339.2	321.3	356.3	-246.9	-286.2	-266.05				

**Determinación de la resistencia de polarización y corriente de corrosión.** Las fórmulas que emplea el método de Rp (Resistencia de Polarización), son las siguientes.

$$R_t = R_p + R_{\Omega} \quad (\text{ec. 5})$$

Donde

Rt: Resistencia total en la probeta.

Rp: Resistencia de polarización.

R Ω: Resistencia debido al electrolito, que se lee con el equipo NILSSON 400.

$$R_t = \frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{(E - E_{corr})}{\Delta I} \quad (\text{ec. 6})$$

El valor de E es el que se lee a los 60 segundos de inyectada la corriente. Ecorr corresponde al potencial de corrosión leído con el multímetro, y el ΔI es la corriente aplicada.

$$R_p = \frac{B}{I_{corr}}$$

**Tabla 3.** Hormigones he sin inhibidor expuestos al medio ambiente natural

MEDICIÓN No	FECHA	CÓDIGO PROBETA	Valor de B	Valor de B	POTENCIAL E (mV)				Medición de Resistencia				Resistencia Final [ohmios]	Resistividad [ohmio-cm]	
					Ax		Ay		Ax		Ay				RΩ (Promedio)
					E (perturbado)	E (Final)	E (perturbado)	E (Final)	Ax [ohmios]	Ay [ohmios]	RΩ [ohmios]	RΩ [ohmios]			
1	15/08/2012	HE-SI-RP-N-01	0.652	0.652	540	690	388.85	539.85	940	800	870				
		HE-SI-RP-N-02	0.652	0.652	610	550	310.65	250.65	660	630	645	755	12178.15		
		HE-SI-RP-N-03	0.652	0.652	580	530	290.15	240.15	700	800	750				
2	30/08/2012	HE-SI-RP-N-01	0.652	0.652	520	670	390.25	500.25	1000	1300	1150				
		HE-SI-RP-N-02	0.652	0.652	690	590	360.65	330.65	800	700	750	966.7	15592.3		
		HE-SI-RP-N-03	0.652	0.652	590	560	349.275	339.275	800	1200	1000				
3	14/09/2012	HE-SI-RP-N-01	0.652	0.652	520	770	380.725	530.725	1300	1700	1500				
		HE-SI-RP-N-02	0.652	0.652	620	620	407.175	377.175	950	950	950	1366.67	20413.33		
		HE-SI-RP-N-03	0.652	0.652	610	490	382.325	302.325	1100	1600	1350				
4	29/09/2012	HE-SI-RP-N-01	0.652	0.652	770	800	595	585	1200	1600	1400				
		HE-SI-RP-N-02	0.652	0.652	800	800	467.5	387.5	1300	1400	1350	1550	25001.5		
		HE-SI-RP-N-03	0.652	0.652	660	600	339.95	279.95	1700	2100	1900				
5	15/10/2012	HE-SI-RP-N-01	0.652	0.652	800	770	277.6	427.6	1000	1100	1050				
		HE-SI-RP-N-02	0.652	0.652	690	600	511.5	421.5	2500	1500	2000	1733.33	27958.67		
		HE-SI-RP-N-03	0.652	0.652	660	590	457.825	347.825	2000	2300	2150				
6	30/10/2012	HE-SI-RP-N-01	0.652	0.652	580	490	230.55	160.55	1700	1600	1650				
		HE-SI-RP-N-02	0.652	0.652	610	690	411.575	491.575	2500	2400	2450	1966.67	31722.33		
		HE-SI-RP-N-03	0.652	0.652	690	580	333.7	223.7	1900	1700	1800				

**Tabla 4.** Hormigones HE sin inhibidor expuestos al medio ambiente natural

MEDICIÓN No	FECHA	CÓDIGO PROBETA	Cálculo de ecorr para Ax						Cálculo de ecorr para Ay						Resumen		
			E-Ecorr [V]	E-Ecorr [uA]	E-Ecorr [uA]	Icorr [uA/cm²]	E-Ecorr [V]	E-Ecorr [uA]	E-Ecorr [uA]	Icorr [uA/cm²]	Icorr PROMEDIO	Icorr final	Potencial de ecorr [mV] (E)	Potencial de ecorr [mV] (E)	Tempo de duración de la Prueba [min]		
1	15/08/2012	HE-SI-RP-N-01	0.480	18000	21000	0.1124	0.636	3300	0.300	0.087							
		HE-SI-RP-N-02	0.438	17430	20775	0.1192	0.712	3550	0.361	0.111	0.1260	0.00106	1.46	54.795			
		HE-SI-RP-N-03	0.436	17310	20570	0.1229	0.742	3730	0.370	0.1149							
2	30/08/2012	HE-SI-RP-N-01	0.420	17895	19845	0.1180	0.567	2895	0.265	0.085	0.1138						
		HE-SI-RP-N-02	0.481	19560	23010	0.1260	0.621	3285	0.285	0.100	0.1155	0.00104	1.54	59.701			
		HE-SI-RP-N-03	0.471	19395	22665	0.1230	0.645	3435	0.279	0.1036							
3	14/09/2012	HE-SI-RP-N-01	0.448	18500	21800	0.1180	0.612	3255	0.276	0.089	0.1094						
		HE-SI-RP-N-02	0.469	19455	22950	0.1255	0.645	3435	0.279	0.1036	0.1191	0.00104	1.54	51.948			
		HE-SI-RP-N-03	0.455	17740	20760	0.1275	0.690	3645	0.292	0.1012							
4	29/09/2012	HE-SI-RP-N-01	0.697	34830	39450	0.0778	0.789	3915	0.355	0.0712	0.0795						
		HE-SI-RP-N-02	0.599	29910	33630	0.0880	0.524	2670	0.243	0.104	0.0765	0.00107	1.07	74.766			
		HE-SI-RP-N-03	0.521	26055	29265	0.0880	0.516	2590	0.246	0.098	0.0945						
5	15/10/2012	HE-SI-RP-N-01	0.449	17425	21575	0.1235	0.719	3845	0.359	0.078	0.1017						
		HE-SI-RP-N-02	0.516	19790	23790	0.0893	0.56	2900	0.260	0.100	0.0952	0.1029	0.00119	1.19	67.227		
		HE-SI-RP-N-03	0.588	29400	36200	0.0890	0.627	3265	0.295	0.109	0.1130						
6	30/10/2012	HE-SI-RP-N-01	0.579	28940	37290	0.0928	0.743	3795	0.345	0.096	0.1080						
		HE-SI-RP-N-02	0.427	17125	18875	0.1277	0.524	2820	0.247	0.1076	0.1227	0.1047	0.00104	1.04	48.780		
		HE-SI-RP-N-03	0.534	26580	37980	0.0890	0.539	2785	0.259	0.1007	0.0922						

### 3.3.2. Pruebas cinéticas con variables a determinar empleando el Gecor8.

#### Mapeo

Este método consiste en utilizar el equipo Gecor8. Se realiza formando un circuito, en el cual se coloca el "Sensor B" sobre la superficie del hormigón y para cerrar el circuito con la pinza de lagarto nos agarramos a una de las varillas de la estructura de acero del hormigón armado. Se toma como ejemplo el hormigón tipo HE sin inhibidor.



**Figura 4.** Circuito cerrado usando el "Sensor B" para medir potencial de corrosión y resistividad

#### Resistividad del hormigón

Los resultados obtenidos usando el sensor B conectado al equipo Gecor8 de la resistividad de cada uno de los hormigones sacando media de todos sus lados, se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Resistividad del hormigón HE sin inhibidor expuesto al medio ambiente [KΩ-cm]

Fecha	I	II	III	IV	V	VI
15 de Agosto						
1	6.45	5.68	6.90	7.47	6.38	5.59
2	6.27	4.97	5.01	4.97	6.40	5.51
3	8.46	8.72	6.98	6.21	7.17	6.71
30 de Agosto						
1	10.84	10.55	9.74	10.01	10.13	9.01
2	10.18	10.63	9.17	8.97	8.44	8.97
3	12.54	10.71	10.21	11.21	11.11	9.12
14 de Septiembre						
1	9.38	7.98	9.74	9.83	9.70	6.21
2	9.01	8.53	8.82	9.72	8.87	6.83
3	9.24	9.73	11.13	10.47	10.08	7.28
29 de Septiembre						
1	12.74	10.10	10.96	11.15	10.12	9.08
2	10.14	9.72	9.07	9.19	8.23	7.42
3	11.71	11.90	9.64	9.77	8.84	10.09
15 de Octubre						
1	15.50	12.81	13.05	14.67	12.17	8.60
2	12.61	11.36	10.75	11.61	9.15	8.75
3	18.05	14.89	13.73	12.35	10.92	10.52
30 de Octubre						
1	15.53	16.59	11.63	13.21	11.59	9.43

### Potencial de corrosión

Los resultados obtenidos del potencial de corrosión usando el sensor B, sacando la media de cada uno de los lados de los hormigones (Lado A, B, C Y D) se muestran de la Tabla 6. Dichas tablas están en voltios.

**Tabla 6.** Potencial de corrosión del hormigón HE sin inhibidor expuesto al medio ambiente

15 de Agosto	I	II	III	IV	V	VI
1	-197,05	-191,95	-197,43	-206,70	-200,55	-198,93
2	-188,38	-200,18	-195,34	-204,80	-191,26	-203,83
3	-183,14	-200,35	-200,30	-201,75	-196,43	-206,08

30 de Agosto	I	II	III	IV	V	VI
1	-237,34	-227,90	-246,31	-234,82	-232,89	-251,26
2	-221,62	-229,78	-238,47	-244,76	-232,41	-248,41
3	-212,65	-223,54	-246,87	-218,23	-231,39	-254,04

14 de Septiembre	I	II	III	IV	V	VI
1	-235,63	-105,43	-265,90	-273,83	-250,62	-365,53
2	-222,97	-274,46	-272,17	-278,55	-273,35	-355,96
3	-233,64	-275,87	-289,90	-260,40	-294,81	-352,95

29 de Septiembre	I	II	III	IV	V	VI
1	-240,03	-267,98	-263,19	-270,78	-275,61	-339,51
2	-240,81	-257,45	-285,63	-265,22	-277,72	-334,44
3	-237,49	-272,03	-296,94	-271,71	-290,83	KL

15 de Octubre	I	II	III	IV	V	VI
1	-225,37	-263,73	-269,27	-271,53	-273,88	-375,95
2	-234,99	-246,61	-276,56	-272,56	-285,37	-337,68
3	-227,44	-271,32	-290,60	-262,24	-277,45	-317,64

30 de Octubre	I	II	III	IV	V	VI
1	-265,75	-292,12	-296,23	-283,99	-293,35	-365,55
2	-262,34	-274,11	-294,90	-280,69	-281,23	-330,89
3	-243,14	-278,20	-296,89	-277,03	-297,70	-330,79

### Resultados obtenidos.

Se tomaron tres veces la medición de corriente por cada probeta rectangular y se sacó el promedio para que nuestros resultados sean confiables. Estas mediciones fueron hechas cada 15 días por un tiempo máximo de tres meses y estuvieron expuestas al medio ambiente.

**Tabla 7.** Corriente de corrosión en la probeta rectangular (HESI)

Fecha	Lado	$i_1$ [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	$i_2$ [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	$i_3$ [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	$i_{\text{corr (prom)}}$ [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]
15 de Agosto	A	0,15	0,18	0,18	0,17
30 de Agosto	A	0,18	0,17	0,19	0,18
14 de Septiembre	A	0,16	0,15	0,16	0,16
29 de Septiembre	A	0,14	0,17	0,16	0,16
15 de Octubre	A	0,18	0,18	0,17	0,18
30 de Octubre	A	0,19	0,18	0,19	0,19

### 3.4. Determinación del coeficiente de difusión de iones de cloruro

Es necesaria la adecuación de un sistema sencillo que nos permita lograr el objetivo, la idea es de inducir la difusión de iones de cloruro presentes en el agua de mar en las probetas de hormigón en sentido vertical hacia abajo, de modo que se distribuya axialmente durante el tiempo de exposición de 3 meses.

Los resultados se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Datos de difusión de cloruros

T de exposición	3 meses			
Hormigón HE	Profundidad [mm]	% Concentra. Cl- #1	% Concentra. Cl- #2	%Concentra. Cl- (Prom)
	10	0,379	0,381	0,38
	30	0,233	0,251	0,24
	Co	-----	-----	0,14
Hormigón GU	Profundidad [mm]	% Concentra. Cl- #1	% Concentra. Cl- #2	%Concentra. Cl- (Prom)
	10	0,34	0,331	0,34
	30	0,215	0,208	0,21
	Co	-----	-----	0,14

Luego de haber obtenido las concentraciones de cloruros a varias profundidades, se procedió a calcular el coeficiente de difusión a través de la resolución del modelo matemático de la segunda "Ley de Fick".

$$F(x, D, c_s, \Delta) = \int_{x-\Delta}^{x+\Delta} \left[ c_s - (c_s - c_o) x \operatorname{erf} \left[ \frac{x}{2x\sqrt{(D|t|)}} \right] \right] x \frac{1}{2\Delta} dx$$

Donde:

**X:** Profundidad a la que se hace el análisis [cm].

**D:** Coeficiente de difusión [ $\text{cm}^2/\text{seg}$ ].

**Cs:** Concentración superficial de cloruros [%].

**Co:** Contenido de cloruros aportado por las materias primas (áridos, cemento, agua, etc), en el momento de fabricación del hormigón [%].

**t:** Tiempo [años].

$\Delta$ : Variación de la profundidad en consideración [cm].

Mediante un software se obtuvieron los coeficientes de difusión y se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Coeficientes de difusión de cloruros

Coeficiente de difusión de cloruros	
	D [ $\text{cm}^2/\text{seg}$ ]
Hormigón HE	$1.014 \times 10^{-6}$
Hormigón GU	$7.895 \times 10^{-7}$

### 4. Análisis de resultados

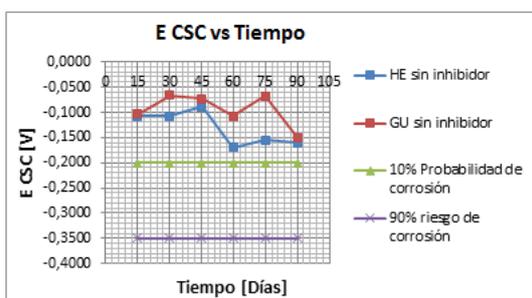
Para el análisis de los dos tipos de cementos HE y GU, se muestra los resultados obtenidos de las variables que perjudican la tasa de corrosión de las armaduras de acero en los hormigones.

#### 4.1. Resistencia a la polarización y corriente de corrosión bajo las atmósferas expuestas utilizando el Potencio-Galvanostato.

**Exposición al Ambiente Natural:** Sin inhibidor

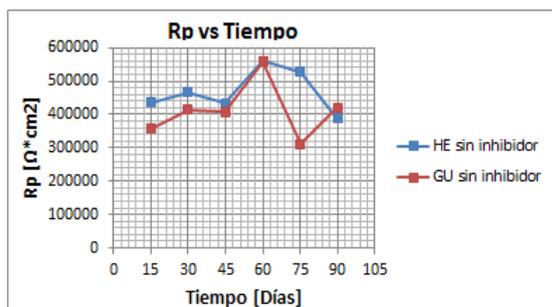
En la Figura 5 se muestra la evolución con el tiempo del potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) de las barras de acero que fueron sometidas a ambiente natural de exposición durante 90 días.

Para este caso de exposición, al ambiente natural; el Ecorr parte aproximadamente de -0,1081 V para el cemento HE y -0,1070 V para el cemento GU, manteniéndose durante los siguientes 15 días casi constante con el tiempo con un valor de -0,1070 V para el cemento HE y aumentando con el tiempo hasta alcanzar un valor de -0,067 V para el cemento GU. En el día 45 de medición hasta el día 60 de medición el Ecorr decrece para el cemento HE y GU. Finalmente alcanzan un valor final de -0,1601 V para el cemento HE y -0,149 V para el cemento GU. Siendo estos valores típicos de un material que se encuentra en estado pasivo (ASTM C 876). Se observó que las varillas dentro del cemento GU estuvieron más protegidas que el cemento HE. Se observó que las varillas dentro del cemento GU estuvieron más protegidas que el cemento HE.

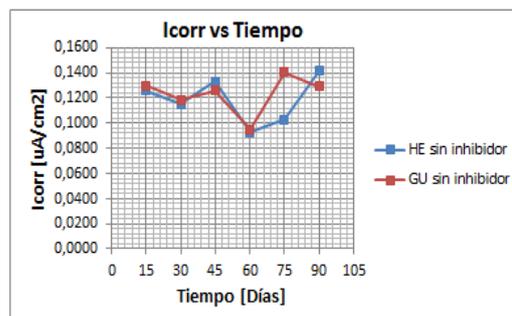


**Figura 5.** Evolución del potencial de corrosión durante 90 días expuestos al medio ambiente

Respectivamente con los valores de Ecorr; se midió la Resistencia de Polarización lineal en las barras de acero ( $R_p$ ); y los resultados se muestran en la Figura 3.2 y Figura 3.3, la Resistencia de Polarización de los cementos HE y GU aumentan durante los primeros 30 días, pero disminuye durante los 15 días siguientes. Su máxima resistencia a la polarización para los dos tipos de cementos se da en el día 60 de medición con un valor de 574166,667 [ohmios- $cm^2$ ] para el cemento HE y 557966,667 [ohmios- $cm^2$ ] para el cemento GU. En el día 60 de medición hasta el día 90 la velocidad de corrosión aumenta para el cemento HE; sin embargo sufre un altibajo para el cemento GU; primero aumentando linealmente para luego disminuir.



**Figura 6.** Evolución de la resistencia a la polarización durante 90 días expuestos al medio ambiente



**Figura 7.** Evolución de la velocidad de corrosión durante 90 días expuestos al medio ambiente.

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

Se concluye lo siguiente.

1. El empleo del equipo Gecor8 tiene como ventaja realizar mediciones de campo para determinar la velocidad de corrosión en estructuras de hormigón de gran tamaño de manera directa ya sea edificaciones, muelles portuarios y puentes, mientras que en la técnica de laboratorio empleando el Potencio-Galvanostato se mide indirectamente la corrosión en muestras y probetas de hormigón pequeñas preparadas exclusivamente para estos ensayos.
2. Con respecto a las variables eléctricas; el equipo Gecor8 tiene como fortaleza la determinación directa de estas, a diferencia del Potencio-Galvanostato que requiere de un equipo adicional como el Nilsson 400 para medir la resistividad eléctrica, siendo estas mediciones de gran importancia para la determinación de la velocidad de corrosión en las varillas.
3. La técnica electroquímica de campo Gecor8 requiere de la información del enlace de las varillas entre sí, en virtud de que los estribos permiten la continuidad eléctrica, contrario a la técnica de laboratorio Potencio-Galvanostato que no requiere de la unión de las barras de acero ASTM A-42, para el análisis cinético de la corrosión en las estructuras de acero en los hormigones sin importar el medio y el tiempo de exposición.
4. La técnica de resistencia de polarización es el método más rápido para obtener la tasa de corrosión usando el Potencio-Galvanostato y Gecor8, equipos que poseen ventajas que pueden ser complementados entre sí, indicando el nivel de corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón.
5. La velocidad de corrosión en las varillas de acero ASTM A-42 en las probetas con inhibidor y sin inhibidor, fue mayor en el hormigón tipo HE en los dos medios que fueron expuestas las probetas, con una gran probabilidad de tener una mayor vida útil el hormigón de tipo GU.
6. Con respecto a la medición de potenciales de corrosión, se puede inferir cualitativamente el nivel de porosidad, contenido de agua y establecer en que zonas existen mayor corrosión.

7. El cemento tipo GU muestra mayor resistencia a la corrosión con respecto a los cementos tipo HE en el proceso de difusión de cloruro.

Se recomienda lo siguiente.

1. Trabajar con técnicas electroquímicas para el análisis cinético de las varillas en los hormigones, con el objeto de evaluar la confiabilidad de aditivos empleados en los hormigones para preservar las varillas de un ataque de corrosión.
2. Adquirir un equipo de alta tecnología que permita medir directamente la concentración de iones de cloruros a diferentes profundidades en los hormigones.
3. Realizar las pruebas de difusión de cloruro en dos tipos de cementos en las mismas condiciones, con un mayor tiempo de exposición para obtener datos más reales.
4. Cuando se realiza mediciones con el multímetro en el hormigón, es importante conectar el electrodo de referencia al polo negativo y al polo positivo la estructura.
5. Hacer mantenimiento mensual del Potencio-Galvanostato y Gecor8, para obtener mayor efectividad en la toma de lecturas en futuras prácticas.

## 6. Referencias

- [1] HOLCIM S.A. Cemento HOLCIM/ Procesos de producción del cemento. [www.holcim.com.ec/productos-y-servicios/calidad/cemento-holcim.html](http://www.holcim.com.ec/productos-y-servicios/calidad/cemento-holcim.html).
- [2] Félix Cesáreo Gómez de León Hijes; Diego J. Alcaraz Lorente.; Manual Básico de Corrosión para Ingenieros; Murcia: Universidad de Murcia, 2004.
- [3] Jones Denny A. "Principles and prevention of corrosion", Upper Saddle River, NJ, USA, Pearson-Prentice Hall, 1992.
- [4] Mehta, P.K. y Montero. Concrete, Structure, Properties and Materials (113-118).Ed Prentice Hall.1986.
- [5] Miguel Ángel Climent Lorca, Pedro Garcés, Emilio Gómez.; Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado. Editorial Club Universitario; San Vicente Alicante, España, 2008.
- [6] C Andrade., "Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras", Madrid, España, CSIC, 1986.
- [7] Inspección Española de hormigón estructural (EHE) 2008.
- [8] ASTM C1157 Standard Performance Specification for Hydraulic Cement.
- [9] ASTM C876 Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete