



Determinación de la Resistencia y Resistividad Eléctrica de Probetas de varios Diseños de Hormigón sometidas a Ataques de Contaminantes

Vicky Mejía Orellana ⁽¹⁾, Julián Peña Estrella ⁽²⁾

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)

Campus Gustavo Galindo, Perimetral K 30.5 vía Perimetral, Apartado: 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador

vmejia@espol.edu.ec ⁽¹⁾, jpena@espol.edu.ec ⁽²⁾

Resumen

El proyecto consiste en determinar la resistividad eléctrica del hormigón con el propósito de conocer su comportamiento a la protección que le confiere a las varillas. La resistividad eléctrica es afectada por diversos ambientes corrosivos a los que están expuestas las estructuras de hormigón.

Se analiza la teoría básica necesaria para la realización de este proyecto, tal como lo son propiedades de materiales utilizados, distintas técnicas a utilizarse en este estudio, y medios que afectan en las propiedades de los hormigones, además del detalle de él o los equipos que se necesitaron en este proyecto.

Se detalla el procedimiento de elaboración de las diversas probetas de hormigón, de dos tipos hormigón puzolánico y portland tipo II, y de cómo fueron expuestas en tres diferentes medios, una cámara de carbonatación, inmersas en cloruro de sodio y expuestas en condiciones ambientales normales, además se explica cómo se determina el factor de celda experimental, ya que este es un dato importante en la realización de este proyecto, para así luego de todo el periodo de estudio, al que serán sometidas dichas probetas, presentar los datos y graficas obtenidas.

Se revisa y analiza los resultados obtenidos, considerando que las mediciones de la resistencia fueron efectuadas periódicamente cada 15 días, durante 6 meses, a su vez también se realiza como parte principal de este trabajo una evaluación comparativa de la resistividad eléctrica entre el hormigón puzolánico y el portland tipo II.

Se exponen todas las conclusiones que se consideren de dicho estudio, junto con las debidas recomendaciones que se generen durante el análisis realizado.

Palabras Claves: Resistividad eléctrica, factor de celda, hormigón puzolánico, hormigón portland tipo II.

Abstract

This graduation project consists in determinate the concrete electricity resistivity in order to know its behavior and the protection that give to the rods. Resistivity is affected by different corrosives ambient.

It is study the necessary basic theory for this project realization, like the used material properties, diverse techniques and the medium that affected the concrete properties, also the detail for the equipments that were employed

The diverse concrete tests elaboration procedure its detailed, two types pozzolanic and portland type II, and the different ambient in them were exposed, carbonation camera, submerge in sodium chloride and normal conditions. The obtaining of cell factor is explained, this is an important data for this project. With all the information and results the graphics are obtaining.

Obtaining results are analyzed, considered that the resistance measures were realized periodic each 15 days, during 6 months, as an important topic for this project it is realized a resistivity comparative evaluation between the both concretes pozzolanic and Portland type II.

The conclusions and recommendations are presented at the end for this project.

Keywords: Electricity resistivity, cell factor, pozzolanic concrete, Portland type II concrete.



1. Introducción

En la actualidad es imprescindible el uso del hormigón armado con barras de acero en cualquier tipo de construcción, desde los pilares de una casa común hasta las grandes edificaciones que conforman una ciudad. Las aplicaciones de este material compuesto son innumerables y parecen infinitas, por lo que las pruebas de calidad y resistencia a las que se lo somete son de vital importancia para garantizar una estructura confiable.

Es importante destacar que al tratarse de hormigón conteniendo barras de acero, se habla de un material que no sólo se ajusta al diseño deseado, sino que sirve de protector presentando una oposición a la penetración de agentes externos que puedan disminuir u afectar el desempeño de las barras de acero incrementando riesgos de falla en la estructura. Es por tanto importante determinar aquellas propiedades básicas con las que debe cumplir el hormigón para que su funcionamiento sea el adecuado y minimizar los riesgos de contaminación del material.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar el comportamiento del hormigón al exponerlo en condiciones normales y adversas, que nos permitan determinar esas propiedades, como lo son la resistencia y la resistividad eléctrica del hormigón.

El hormigón debe ser denso, compacto, homogéneo, poco poroso y, además, con buenas propiedades mecánicas.

2. Propiedades eléctricas de los hormigones

Los hormigones, al igual que el resto de materiales, poseen propiedades que los identifican. Son de particular interés para el desarrollo de este proyecto, las propiedades eléctricas que los caracterizan, específicamente lo relacionado a: la resistividad eléctrica. La resistividad eléctrica es una propiedad única para cada material, y es el recíproco de su conductividad. La unidad de medida empleada es el $k\Omega\text{-cm}$ u $\Omega\text{-m}$.

Esta propiedad depende principalmente del grado de saturación de los poros del concreto, y de la hidratación de la pasta; y, se ve afectada por el tipo de cemento, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otros.

La velocidad de corrosión del acero en el concreto se ve afectada por su resistividad, de ahí la importancia del análisis de dicha propiedad.

Acorde a varias investigaciones realizadas sobre los valores de resistividad eléctrica, no existe aún un acuerdo general acerca del límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión en las estructuras se pueda considerar despreciable. Pero de acuerdo a los resultados experimentales obtenidos, es factible emplear como criterio general el siguiente:

Valor	Criterio
$\rho > 200 \text{ k}\Omega\text{-cm}$	Poco riesgo
$200 > \rho > 10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$	Riesgo moderado
$\rho < 10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$	Alto riesgo

Figura 1. Criterio general de valores de resistividad eléctrica del hormigón

La resistividad es una propiedad eléctrica, y guarda una relación directa con la resistencia. Los valores de resistividad se calculan de acuerdo a la ecuación:

$$\rho = R \times \frac{A}{L}$$

Ecuación 1

ρ : Resistividad eléctrica (Ωcm)

R: Resistencia eléctrica (Ω)

A: Área transversal (cm^2)

L: Longitud (cm)

3. Técnicas de medición

Uno de los propósitos de este proyecto fue la medición de la resistividad eléctrica de las probetas de hormigón. Para efectuar las mediciones de resistividad se requiere de un telurímetro, instrumento que permite medir resistencia de puesta a tierra y resistividad del terreno. Para la realización de este proyecto se empleó el equipo Nilsson modelo 400, que tiene funciones similares (ver figura 2).



Figura 2. Equipo Nilsson modelo 400

El Nilsson 400 inyecta en el terreno una corriente y mide con buen grado de precisión la tensión generada en dicho terreno, de ésta manera, conociendo la magnitud de la corriente inyectada y midiendo el valor de la tensión generada, puede obtenerse la resistencia eléctrica como el valor registrado por el equipo, y, finalmente para determinar la resistividad eléctrica se realiza un cálculo indirecto, multiplicando los valores de resistencia por una constante, un factor geométrico, denominado factor de celda, el cual será fijo según la geometría de la probeta, la disposición de los electrodos (barras de acero) y de la condición de exposición.

La ecuación empleada para el cálculo de la resistividad eléctrica es la siguiente:

$$\rho = K \times R$$

Ecuación 2

ρ : Resistividad eléctrica (Ωcm)

K: Factor de celda (cm)

R: Resistencia (Ω)

4. Desarrollo del proyecto

Las probetas fueron elaboradas con dos tipos diferentes de hormigones, portland tipo II y puzolánico. Se emplearon barras de acero ASTM A42 y acero inoxidable INOX 304, la disposición de las barras es la indicada en la figura 3. Las probetas son de forma cúbica, cuyo lado mide 10 cm.



Figura 3. Disposición de las barras de acero en las probetas de hormigón

En total se emplearon veinticuatro probetas para la ejecución de este proyecto, doce de cemento portland tipo II y doce de cemento puzolánico. De las doce probetas elaboradas para cada tipo de hormigón, cuatro fueron colocados en una cámara de carbonatación, cuatro inmersas en cloruro de sodio y las cuatro restantes fueron expuestas al ambiente.



Figura 4. Cámara de carbonatación



Figura 5. Probetas inmersas en cloruro de sodio



Figura 6. Probetas expuestas al medio ambiente

Las mediciones de resistencia eléctrica fueron realizadas cada quince días hasta completar diez mediciones en total.

5. Obtención del factor de celda

Para obtener el valor de la constante (K) se utilizó un dispositivo prismático con base de sección cuadrada de 10 cm de lado (la misma sección que tienen las probetas en estudio), el cual se llena con una solución de conductividad conocida, cloruro de potasio, hasta una altura de 10 cm, conservando la mismas dimensiones que las probetas de hormigón.

Se empleó un soporte cuadrado de 10 cm de lado para sostener las barras de acero, cuya sección expuesta es igual a las de las probetas en estudio. El soporte se introdujo en el recipiente prismático hasta quedar en contacto con el líquido. De esta manera, se logró una probeta similar a las de hormigón, con la diferencia que el electrolito empleado es de conductividad conocida. Se procedió a realizar las mediciones de resistencia R, empleando el equipo Nilsson 400, previamente descrito.

Reemplazando el valor obtenido de R y la resistividad de nuestra solución en la ecuación (2), se obtiene el valor de la constante de la celda que el presente proyecto fue igual a 6.83cm.



Figura 7. Probeta construida para el cálculo del factor de celda

Medición Nr.	1	2	3	4
RESISTENCIA (OHM)	34	37	33	37
RESISTIVIDAD (OHM-CM)	240	240	240	240
FACTOR K (CM)	7.08	6.49	7.27	6.49

Tabla 1. Medición de resistencia de la celda

6. Procedimiento para la medición de la resistencia eléctrica

Para la medición de la resistencia eléctrica del hormigón, se realizaron las siguientes conexiones:

Conexiones en el equipo Nilsson 400:

- Los puntos C1 y P1 se conectan entre sí.
- El punto C1 se conecta a la barra de acero ASTM A42 (AX) de la probeta de hormigón.
- El punto C2 se conecta a la barra de acero inoxidable INOX 304 (IY) de la probeta de hormigón.
- El punto P2 es conectado al electrodo de referencia de la probeta.



Figura 8. Conexiones en el equipo Nilsson 400

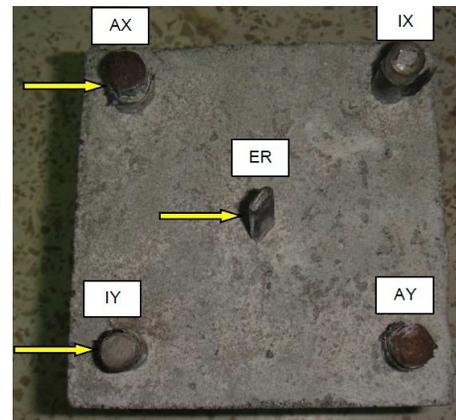


Figura 9. Conexiones en la probeta

DESCRIPCIÓN	CÓDIGO PROBETA	Fecha: 28-Ago				
		AX	AY	RP	DIAS	
PORTLAND	SIN INHIBIDOR-CARBONATACIÓN	2X-R-C-1	1700	2100	1900	30
		2X-R-C-2	1800	1700	1750	
	CON INHIBIDOR-CARBONATACIÓN	2I-R-C-1	1300	1300	1300	30
		2I-R-C-2	1300	1200	1250	
	SIN INHIBIDOR-INMERSIÓN SAL	2X-R-S-1	610	710	660	45
		2X-R-S-2	710	670	690	
	CON INHIBIDOR-INMERSIÓN SAL	2I-R-S-1	750	630	690	45
		2I-R-S-2	640	620	630	
PUZOLÁNICO	SIN INHIBIDOR-CARBONATACIÓN	PX-R-C-1	1600	2000	1800	30
		PX-R-C-2	3200	2800	3000	
	CON INHIBIDOR-CARBONATACIÓN	PI-R-C-1	1500	2500	2000	30
		PI-R-C-2	3700	1900	2800	
	SIN INHIBIDOR-INMERSIÓN SAL	PX-R-S-1	610	640	625	45
		PX-R-S-2	690	670	680	
	CON INHIBIDOR-INMERSIÓN SAL	PI-R-S-1	700	710	705	45
		PI-R-S-2	670	520	595	
SIN INHIBIDOR-NATURAL	PX-R-N-1	3400	3700	3550	45	
	PX-R-N-2	3000	2800	2900		
CON INHIBIDOR-NATURAL	PI-R-N-1	3600	2600	3100	45	
	PI-R-N-2	2900	3000	2950		

Tabla 2. Presentación de datos de medición de resistencia Nr. 3

7. Presentación de datos y graficas

Los valores de resistividad eléctrica fueron calculados para cada tipo de hormigón; y para un mejor estudio de los resultados obtenidos, se elaboraron curvas de resistividad, que muestran su comportamiento a medida que pasa el tiempo.

TIEMPO (DÍAS)	RESISTIVIDAD (OHM-CM)	
	SIN INHIBIDOR	CON INHIBIDOR
15	10245.00	7205.65
30	12464.75	8708.25
45	12635.50	8708.25
60	12977.00	8537.50
75	12977.00	8879.00
90	15538.25	11611.00
105	14343.00	9732.75
120	14343.00	9562.00
135	16050.00	11098.75

Tabla 3. Resistividad del hormigón Portland tipo II, medio carbonatación

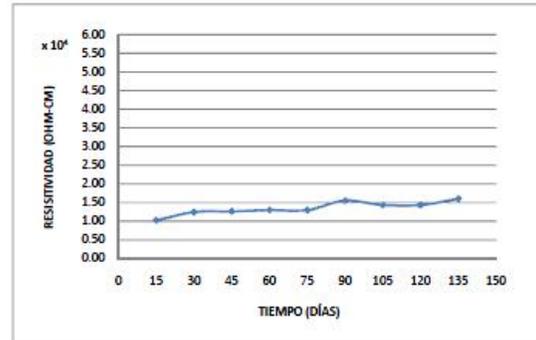


Figura 10. Resistividad del hormigón Portland tipo II, sin inhibidor de corrosión

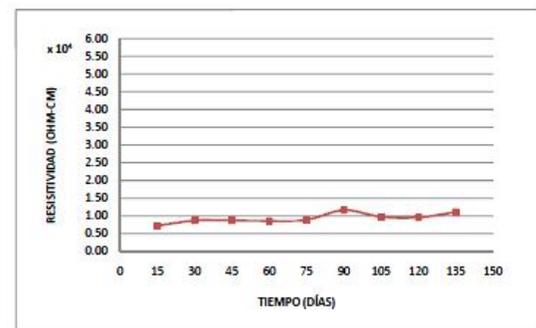


Figura 11. Resistividad del hormigón Portland tipo II, con inhibidor de corrosión

8. Revisión de resultados

Para el efecto de análisis de resultados se estudia el comportamiento de las dos clases de hormigones portland tipo II y puzolánico, se establecen curvas comparativas de resistividad eléctrica versus el tiempo transcurrido, y, exposición de las probetas en los tres diferentes medios

Además se analiza el efecto que el inhibidor de corrosión genera en las probetas de hormigón, para ello se elaboran gráficas comparativas entre las probetas que tienen inhibidor de corrosión y aquellas que no.

Las curvas obtenidas permiten apreciar el comportamiento de los hormigones frente a los diferentes agentes contaminantes a los que fueron expuestos.

8.1. Análisis comparativo de los hormigones puzolánico y portland tipo II

Para establecer comparaciones entre los hormigones puzolánico y portland tipo II, se elaboró gráficas para cada una de las clases de probetas que fueron empleadas en este proyecto, en las que se

consideró el medio al que fueron expuestas, y, si en su elaboración se empleó el inhibidor de corrosión.

Estructura de hormigón sin inhibidor de corrosión, agente contaminante CO₂

Como se puede observar en la figura 12 el cemento puzolánico presenta valores de resistividad eléctrica más elevados en relación al hormigón portland tipo II. El comportamiento que se observó a medida que el tiempo transcurría es similar para las dos clases de hormigones. El valor máximo de resistividad que alcanza el hormigón puzolánico es 25kΩ-cm, mientras que el del portland tipo II es 15kΩ-cm.

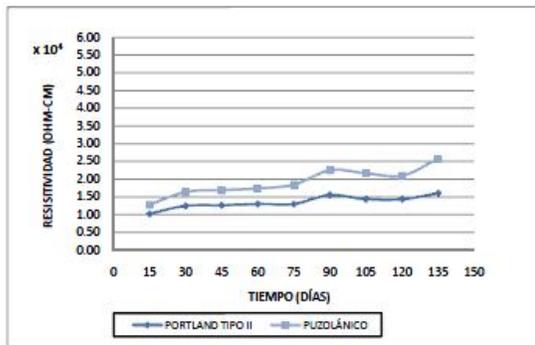


Figura 12. Hormigón sin inhibidor de corrosión, medio cámara de carbonatación

8.2. Influencia del inhibidor de corrosión

Probetas de hormigón, agente atacante CO₂
Hormigón Portland tipo II

Las probetas que se elaboraron sin inhibidor de corrosión presentan valores de resistividad eléctrica superiores a las probetas con el inhibidor de corrosión. (Ver figura 13)

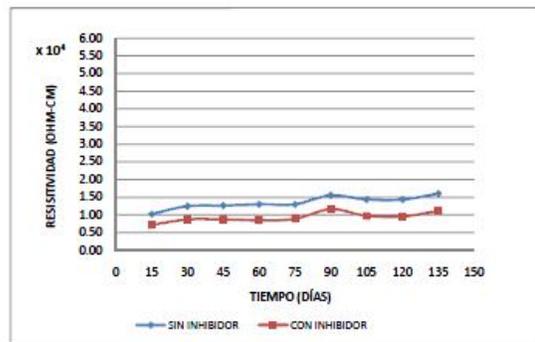


Figura 13. Hormigón Portland tipo II, cámara de carbonatación

Probetas de hormigón, agente atacante CO₂
Hormigón Puzolánico

Las probetas elaboradas sin el inhibidor de corrosión presentan valores de resistividad eléctrica superiores a los de las probetas con inhibidor, pero conservan la misma tendencia.

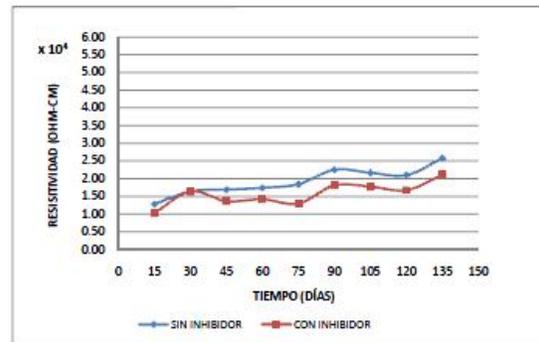


Figura 14. Hormigón Puzolánico, cámara de carbonatación

9. Conclusiones

La resistividad eléctrica del hormigón presenta una tendencia creciente en el tiempo lo cual refleja el continuo proceso de curado que manifiesta el hormigón durante su etapa inicial. Si la resistividad eléctrica del hormigón tiende a aumentar, entonces la conductividad disminuye, por ende el riesgo a la corrosión también.

El hormigón puzolánico presenta una mejor resistividad eléctrica en relación con el hormigón portland tipo II.

El agente contaminante más agresivo son los iones cloruros, las probetas que fueron inmersas en solución salina presentan una resistividad eléctrica baja, por lo tanto, el riesgo de corrosión en este medio es más elevado.

El hormigón en condiciones normales tiene una resistividad eléctrica alta, por lo que su conductividad es baja, y el riesgo a la corrosión es mínimo.

El inhibidor de corrosión ocasionó que la resistividad eléctrica en los hormigones disminuya.

10. Recomendaciones

En el proceso de la elaboración de las probetas de hormigón es importante ser rigurosos con el tiempo de curado.



Es importante que las probetas sumergidas en cloruro de sodio estén totalmente sumergidas, y fuera interesante realizar pruebas con probetas que estén parcialmente inmersas en medio salino.

Al momento de elaborar las probetas, es importante considerar la relación agua/cemento, ya que la resistividad se ve afectada por este parámetro.

Se recomienda la utilización de un aditivo para mejorar la impermeabilidad del hormigón, con el fin de mejorar las propiedades de la estructura y evitar filtraciones de agua, o de otro medio corrosivo.

Para futuros experimentos se recomienda realizar pruebas con otro tipo de hormigones, y emplear otro acero diferente al ASTM A42, por ejemplo A36.

11. Referencias

- [1] Estudio de la Corrosión en barras de acero inoxidable en concreto contaminado por cloruros cuando se le aplican esfuerzos residuales, Publicación Técnica No. 287, Sanfandila, Qro 2006
- [2] Manual for assessing corrosion-affected concrete structures, Geotecnia y cimientos S. A.
- [3] ESTEBAN ALEJANDRO ARVA, Corrosión de armaduras en hormigón armado debido a factores medio ambientales, 2003.
- [4] Evaluación de la corrosividad del cemento conductor CELEC, Corporación para la investigación de la corrosión, Junio 2007.
- [5] MANUEL D. VARELA, Curso teórico práctico sobre medición de puesta a tierra con telurímetro.
- [6] CARLOS PANCHANA, “Influencia de carboxilato de amina en la velocidad de corrosión del acero A42 en hormigones diseñados con cemento portland tipo II, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, ESPOL, 2010.