

La resistividad eléctrica como herramienta para el control de la calidad del hormigón.
The electrical resistivity as a tool for controlling the quality of concrete.



Ing. José Ramón Martínez Díaz
Profesor Auxiliar, Ingeniero Civil,
Centro de Estudios de Matemática para la Ingeniería y las Ciencias,
CEMAT
Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echevarría”, CUJAE,
La Habana, Cuba.
jrmartinez@ceamat.cujae.edu.cu; jrmartinezdiaz1949@gmail.com
Teléfono: 7-205-0490 ; 7-266-3562



MSc. Ing. Nelson Emilio Díaz Brito
Profesor Auxiliar, Ingeniero Civil
Centro de Estudios de la Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT),
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echevarría”, CUJAE,
La Habana, Cuba.
nediaz@civil.cujae.edu.cu
Teléfono 7-266-3837



Dr. Ing. Alfredo del Castillo Serpa
Profesor Emérito, Ingeniero Eléctrico
Centro de Estudios de Matemática para la Ingeniería y las Ciencias,
CEMAT
Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echevarría”, CUJAE,
La Habana, Cuba.
acastillo@ceamat.cujae.edu.cu
Teléfono: 7-266-3562

Recibido: 27-9-18
Aceptado: 15-11-18

RESUMEN

La resistencia a compresión del hormigón es prioridad en el control de la calidad de las obras, garantizando la seguridad y durabilidad de las estructuras. Actualmente, en el sector de la construcción en Cuba, con una frecuencia significativa, se obtienen valores de resistencia a compresión por debajo de lo especificado en el proyecto. Lo anterior conlleva a la realización de ensayos no destructivos y la extracción de testigos, provocando retrasos en la construcción e incrementos de los costos de la obra. La presente investigación tiene por objetivo implementar el uso de la resistividad eléctrica como herramienta idónea en el control de la calidad del hormigón en función de la relación agua-cemento y la proporción de los áridos. Se ejecuta un diseño de experimento factorial 3^2 de superficie de respuesta, logrando controlar la resistividad eléctrica hasta los 50 días y obtener los modelos estadístico-matemáticos que estiman la resistencia a compresión del hormigón, en función de su resistividad eléctrica para los primeros 28 días.

Palabras claves: hormigón, resistividad eléctrica, resistencia compresión.

ABSTRACT

The compressive strength of concrete is a priority in the quality control of the works, guaranteeing the safety and durability of the structures. Currently, in the construction sector in Cuba, with a significant frequency, compressive strength values are obtained below that specified in the project. This leads to the realization of non-destructive tests and the extraction of witnesses, causing delays in the construction and increases in the costs of the work. The objective of this research is to implement the use of electrical resistivity as an ideal tool in the control of concrete quality based on the water-cement ratio and the proportion of aggregates. A factorial experiment design 3^2 of response surface is executed, managing to control the electrical resistivity up to 50 days and obtain statistical-mathematical models that estimate the compressive strength of concrete, based on its electrical resistivity for the first 28 days.

Keywords: concrete, electrical resistivity, compression resistance.

1. INTRODUCCIÓN

La resistividad eléctrica se define como la característica específica de un material para oponerse al paso de la corriente eléctrica y es una propiedad que permite relacionar la micro-estructura del hormigón con su comportamiento resistente y durable de forma no destructiva. La resistividad eléctrica puede evaluar el endurecimiento del hormigón en su estado fresco y endurecido: su grado de curado, la resistencia a la penetración de los cloruros, la carbonatación y la velocidad de corrosión de la armadura, Andrade, 2011^[1]. En el 2016 se terminaron de construir dos nuevas series de esclusas en el Canal de Panamá llevando a cabo el control de las mezclas de hormigón y su durabilidad mediante la medida de la resistividad eléctrica, Andrade, 2014^[2]. Entre las propiedades que tienen relación directa con la durabilidad están: la absorción del agua, la permeabilidad al agua, la permeabilidad al aire, la porosidad y la resistividad eléctrica. Entre todos estos indicadores, el más universal y que mejor se relaciona con la durabilidad de la armadura es la medida de la resistividad eléctrica, Andrade, 2013^[3]. En esta investigación se diseñó un experimento factorial 3^2 de superficie de respuesta, cuyo objetivo es predecir con nivel de confiabilidad al 95% la resistencia a compresión del hormigón, desde las primeras horas de su elaboración hasta los 28 días, en función de la medida de la resistividad eléctrica. Se adicionan los valores de resistividad eléctrica desde las primeras horas hasta los 50 días, determinando los modelos estadístico-matemáticos y/o ábacos que relacionan ambos parámetros del hormigón. Como resultado, es posible con la medida de la resistividad eléctrica y el uso del ábaco (tabla 13), estimar la resistencia a compresión del hormigón y disminuir los costos en el control de la calidad.

El estado del conocimiento de la resistividad eléctrica del hormigón, data desde los años 50 a 70 del pasado siglo (Calleja, 1952^[4]; Hammon, 1957^[5]; Monfore, 1968^[6], hasta la actualidad en que se han realizado progresivamente estudios sobre los factores que influyen en la resistividad eléctrica del hormigón entre los cuales se citan: el tipo de cemento, los áridos, la relación agua-cemento (A/C), la proporción de los áridos (A_f/A_g), la porosidad, los aditivos y las adiciones, las características geométricas de la estructura, el grado de humedad, la temperatura, el proceso de carbonatación, la difusión de cloruros y las condiciones del medio ambiente. Entre los autores que han investigado el tema se citan a Polder et al., 2000^[7]; Lizarazo, 2007^[8]; Quidel, 2008^[9]; Ghasemzadeh, 2009^[10]; D'Andrea, 2010^[11]; Rebollo, 2010^[12]; Cárdenas, 2011^[13]; Spragg, 2011^[14]; Presuel-Moreno et al., 2013^[15]; Andrade et al., 2014^[2] [2]; Medeiros-Junior et al., 2014^[16]; Pico Pérez, 2014^[17]; Polder et al., 2014^[18]; Howland, 2016^[19].

D'Andrea, 2010^[11], demuestra que cuanto mayor sea el tiempo de curado mayor será la resistividad eléctrica y ella aumenta en el tiempo hasta alcanzar un valor en el que se estabiliza a medida que se detiene la hidratación del cemento. De manera que en los cementos de bajo contenido de silicato bicálcico (C_2S) y alto contenido de silicato tricálcico (C_3S) la resistividad debe estabilizar en un menor tiempo.

Monfore, 1968^[6], estudió la influencia de la naturaleza de los áridos sobre la resistividad eléctrica, planteando que los más densos son más aislantes. En los resultados de esta investigación se observó que en los primeros 7 días de elaborado el hormigón tuvieron fuerte influencia en la resistividad la relación A/C y la proporción A_f/A_g y que a los 28 días la influencia de los áridos disminuyó fuertemente, lo que hace pensar que la resistividad al igual que la resistencia a compresión están fuertemente ligada a la porosidad de la pasta de cemento más que a la naturaleza de los áridos.

Ghasemzadeh, 2009^[10], evalúa la resistividad eléctrica en 16 mezclas de hormigón de alta resistencia variando la relación agua-cemento, la adición de micro-sílice y los materiales cementicios, concluyendo que la sustitución parcial del cemento por micro-sílice, la baja relación agua-cemento y el uso de superplastificante de última generación permite producir un hormigón resistente a la corrosión con mucho menor costo comparado con el costo de mantenimiento y reparación.

Quidel, 2008 [9], experimenta que las mezclas con cemento Portland puzolánico presentan un aumento de resistividad eléctrica hasta un 38% en relación al cemento Portland puro a los 7 días, lo cual evidencia la disminución de la red de poros capilares con el Portland puzolánico.

En Cuba el tema de la resistividad eléctrica en los hormigones normales se ha investigado muy poco. En mezclas de hormigón con dos áridos, la medida de la resistividad eléctrica en los trabajos realizados por Riverón, 2010^[20]; Martínez J., 2013^[21]; Martínez L., 2015^[22], en probetas de 15 x 30 cm y cubos de 40 x 40 x 40 cm fueron menores de 10 k Ω -cm, clasificando estos hormigones como de alto riesgo a la corrosión de acuerdo a los rangos de valores definidos en la Red DURAR, 1997^[23]. Ello implica la necesidad de incluir adiciones minerales en las mezclas de hormigón de dos áridos para lograr mejorar su calidad y durabilidad. Es importante poder disponer de un ensayo no destructivo, sencillo, eficaz y económico, que se puede repetir muchas veces sin daños a la estructura. La resistividad como parámetro de control de la calidad del hormigón describe su estado de fraguado y endurecimiento en el transcurso del tiempo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos se realizaron en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de La Habana, CUJAE, el laboratorio del Centro de Investigación Tecnológica de la Construcción, CITEC y el laboratorio de la Fábrica de Cemento de Artemisa.

2.1 Diseño del experimento.

Una vez caracterizados los materiales, para decidir el rango del factor proporción de los áridos A_f/A_g se tomó en cuenta el porcentaje mínimo del vacío experimental obtenido de $A_f/A_g = 50/50$ ejecutado conforme a la norma NC 181:2002 y la menor superficie específica posible de los áridos. Además, se tuvo en cuenta el hecho de que la mayoría de las proporciones en que se mezclan los áridos para hormigones normales en la práctica están entre dicho valor mínimo y la proporción $A_f/A_g = 40/60$. El rango del factor relación agua-cemento, A/C , se seleccionó entre 0,40 y 0,50 tomando en consideración que la gran mayoría de los hormigones fabricados en el Oeste de La Habana deben cumplir con los requerimientos de resistencia y durabilidad dados conforme la norma NC 120:2014 Hormigón Hidráulico. Especificaciones. En los ensayos, se consideraron como variables independientes los factores relación A/C y proporción A_f/A_g como variables dependientes la resistividad, la resistencia y como variables de control la temperatura y la humedad relativa. Las mezclas se realizaron en un orden aleatorio, condición que permite evaluar estadísticamente los resultados y hacer inferencias de la población a partir de las muestras. Cada factor consta de tres niveles o tratamientos. Los tres niveles de los factores se codifican como nivel inferior (-1), nivel intermedio (0) y el nivel superior (+1). Por ejemplo, las relaciones $A/C = 0,45$ y $A_f/A_g = 50$ corresponden a los niveles 0 y 1 respectivamente. Para cada tratamiento de cada mezcla con aditivo, se fija su consistencia mediante el cono de Abrams en el intervalo de 16 a 20 cm, ejecutando mezclas de pruebas previas para determinar la cantidad de agua necesaria para obtener el asentamiento dentro del intervalo indicado. De modo que con las relaciones A/C , la proporción A_f/A_g y la cantidad de agua se determinó la composición de cada mezcla para 1 m³ de hormigón. Cada mezcla tuvo una réplica y se adicionó una mezcla en el punto central (0,45 ; 45) para un total de 19 mezclas ejecutadas mediante el método de muestreo aleatorio simple. En la figura 3 se muestran las proporciones de los factores para cada una de las 19 mezclas.

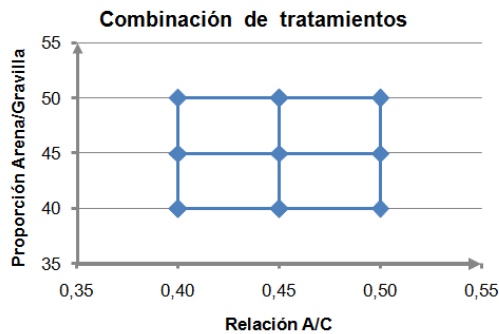


Figura 1.- Combinación de factores en un diseño 3^2 .

Como hay 9 combinaciones de tratamientos hay ocho grados de libertad entre ellas. Los efectos o factores principales A/C , A_f/A_g tienen dos grados de libertad cada uno y la interacción de los factores tienen cuatro grados de libertad. Con solo una réplica ($k = 1$) tendremos un total de $k * 3^2 - 1 = 8$ grados de libertad, lo cual permite introducir un análisis estadístico completo. Usando la ecuación de volumen de mezclas de hormigón para 1 m^3 se determina la composición para cada una de las mezclas del diseño 3^2 . Durante el desarrollo del experimento se controlaron la temperatura y humedad relativa, las cantidades de los componentes para cada mezcla de prueba, la muestra original y única de los materiales, el curado por inmersión en cámara húmeda, el uso de dos técnicos y un ingeniero para todos los ensayos, el control de los equipos calibrados, el uso del pie de rey y pesaje digital, la práctica del muestreo aleatorio simple y el estricto cumplimiento de las normas cubanas.

Los materiales utilizados en el experimento fueron el Cemento P-35 del Mariel, la gravilla Anafe ($gvAn$) y la Arena Bahía Honda (ABH) del Oeste de La Habana, el aditivo SRC-20 de Mapeifluid elaborado en Cuba, muestreados en la Planta de Hormigón y su dosificación con agua potable. Una vez caracterizados los materiales, para decidir el rango del factor proporción de los áridos A_f/A_g se tomó en cuenta el porcentaje mínimo del vacío experimental obtenido de $A_f/A_g = 50/50$ ejecutado conforme a las normas cubanas vigentes.

2.2 Medida de la resistividad. Método de Wenner o de las 4 puntas.

En este epígrafe se describen los métodos que fueron necesarios desarrollar para obtener los modelos estadístico-matemáticos que relacionan la resistividad eléctrica con el tiempo hasta los 50 días y con la resistencia a compresión del hormigón hasta los 28 días.

En esta investigación se utiliza el método de las 4 puntas o de Wenner, 1915^[24], para medir la resistividad eléctrica del hormigón en el tiempo por el efecto de los factores relación agua-cemento (A/C) y la proporción de árido fino-árido grueso (A_f/A_g) disponibles al Oeste de La Habana.

En el diseño de mezclas de hormigón se tomaron en cuenta tres principios básicos: a) la relación A/C b) la proporción de los áridos A_f/A_g c) la consistencia de la mezcla. Para la aplicación de los métodos estadísticos se consideraron esenciales los aspectos siguientes: a) la repetición del experimento (sin réplica del experimento no es posible un análisis de varianza, (ANOVA) b) la aleatorización (genera la no existencia de dependencia entre las observaciones) y c) el control local (consigue la homogenización de las probetas experimentales) que reduce el error experimental.

Para la obtención de los modelos estadístico-matemáticos que relacionan la resistividad eléctrica y la resistencia a compresión del hormigón en el tiempo, se aplican las pruebas normalidad e independencia para los datos observados, el análisis de varianza, la regresión lineal múltiple y la regresión no lineal, conforme al texto del autor Montgomery, 1996^[25].

El método de Wenner emplea 4 electrodos a igual distancia y en un medio cuasi-infinito la resistividad se obtiene por la expresión $\rho = 2 \pi a R = k R$; $k = 2 \pi a / \varphi$ donde:

R : es la resistencia eléctrica a : es la distancia entre los electrodos. φ : factor de forma.

(Morris et al, 1996^[26], demostró que para probetas de diámetro 15 cm y altura de 30 cm, el factor k toma el valor de 1,65. El método de las 4 puntas posibilita medir la resistividad sin daños a la estructura, es

simple y puede realizarse a cualquier edad del hormigón. El equipo de Wenner del Laboratorio CECAT utilizado, se muestra en la figura 2.



Figura 2.- Equipo Wenner de 4 puntas, el patrón y el procesador. 4 lecturas por probeta.

2.3 Materiales

Los materiales utilizados en el experimento fueron el Cemento P-35 del Mariel, la gravilla Anafe (*gvAn*) y la Arena Bahía Honda (*ABH*) del Oeste de La Habana, el aditivo SRC-20 de Mapeifluid elaborado en Cuba, muestreados en la Planta de Hormigón y su dosificación con agua potable.

Se caracterizan en el Laboratorio CECAT-CUJAE el cemento, los áridos y el aditivo empleado para cada una de las mezclas y se control el cumplimiento de las normas NC 95:2017 (Cemento Portland. Especificaciones.), NC 251:2018 (Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos) y la NC 228:2005 (Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 1).

2.3.1 Análisis físicos, mecánicos y químicos del Cemento P-35 del Mariel

Tabla 1	Requisitos	UM	NC 95	Resultados	
Ensayos Físicos	Superficie específica Blaine (mínimo.)	cm ² /g	2 800	3456	
	Tiempo fraguado inicial (mínimo.)	minutos	45	75	
	Tiempo fraguado final (máximo.)	horas	10	2	
Ensayos Mecánicos	Resistencia a la compresión (mínima.)	3 días	N/mm ²	17	25,1
		7 días		25	30,8
		28 días		35	37,7
	Resistencia a la Flexo-tracción (mínima.)	3 días	N/mm ²		5,2
		7 días			5,9
		28 días			7,1
Ensayos Químicos	Oxido de Magnesio (máximo.)	%	5,0	1,7	
	Trióxido de azufre (máximo.)	%	3,5	3,3	
	Pérdidas por Ignición (máximo.)	%	4,0	-----	
	Residuos insolubles (máximo.)	%	4,0	-----	

Fuente: Fábrica de Cemento de Artemisa.

El cemento P-35 de la fábrica de cemento del Mariel cumple con todas las especificaciones físico-químicas y mecánicas, en particular, con la resistencia a compresión a los 3, 7 y 28 días.

Tabla 2.- Composición química.											
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Si	Al	Fe	Ca	Mg	S	K	Na	-----	-----	-----	-----
19.2	5.06	2.25	63	1.7	3.3	0.6	0.38	64.72	6.31	9.6	6.84

Fuente: Laboratorio de la fábrica de cemento de Artemisa.

La composición de distintos cementos Portland contienen las ecuaciones de Bogue, 1927^[27].

Tipo de cemento	SC ₃	SC ₂	AC ₃	FAC ₄
I. Uso general	50	24	11	8
II. Moderado calor de hidratación	42	33	5	13
III. Endurecimiento rápido	60	13	9	8
IV. Pequeño calor de hidratación	26	50	5	12
V. Resistencia a los sulfatos	40	40	4	9

Fuente.- http://www.uobabylon.edu.iq/eprints/publication_1_302_1586.pdf

De acuerdo con los contenidos de silicatos y aluminatos, el cemento P-35 cubano es similar al tipo III con alto calor de hidratación y resistencias iniciales altas.

El cemento P-35 analizado contiene bajo contenido de silicato bicálcico. Los restantes elementos, de acuerdo con Bogue alcanzan los rangos siguientes:

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O y K ₂ O
60-67	17-25	3-8	0,5-6	0,1-5,5	1-3	0,5-5,5

La muestra de cemento P-35 del Mariel clasificado, cae dentro de los rangos dados, excepto el SO₃ cercano al límite, por lo que se concluye que el cemento empleado es adecuado.

2.4 Áridos

Las variaciones en la granulometría pueden afectar seriamente la uniformidad y laborabilidad del hormigón de una mezcla a otra, de ahí que se requiera su control de calidad conforme a las especificaciones de la norma (NC 251:2018).

2.4.1 Granulometría

En la tabla 6 las aberturas tamices se dan en mm y los valores restantes son los % pasados.

Tamiz	19,1	12,5	9,52	4,76	2,38	1,19	0,595	0,298	0,15
ABH	100	100	100	92,8	68,5	52,4	32,3	13,5	4,1
NC-251	100	100	100	90-100	70-100	45-80	25-60	10-30	2-10
gvAn	99	76	37,5	22,5	0	0	0	0	0
NC-251	90-100	20-55	0-10	0-5	0	0	0	0	0

Fuente: Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil, CECAT-CUJAE.

Se concluye que la ABH no cumple en el tamiz 2,38 mm significativamente, por lo que puede considerarse con buena granulometría. Sin embargo, la gravilla Anafe no cumple las especificaciones, presenta excesos del grueso de material en los tamices 12,5; 9,52 y 4,76 mm dando lugar a mayor contenido de agua en las mezclas, mayor consumo de cemento y estricto curado. En relación al material que pasa por el tamiz #200, la ABH está libre de arcillas y esquistos (6,04% < 7%) y la gvAn solo un 1,42% < 1,5% pasa por el tamiz 200.

2.4.2 Pesos específicos, pesos unitarios y por ciento de absorción.

La ABH no cumple con el PEC. Los grados de absorción de los áridos son aceptables. Ver tabla 6.

Material	P. Específico Corriente (PEC)	P. Específico Saturado (PES)	Peso Unitario Suelto (PUS)	Peso Unitario Compactado	Absorción (%)
ABH	2,41 < 2,5 (NC 251)	2,45	1467	1643	1,90 < 3%
gvAN	2,53	2,58	1444	1586	2,33 < 3%

Fuente: Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil, CECAT-CUJAE.

2.5 Mapeifluid dinamón SRC-20.

Superfluidificante retardador de base acrílica modificada al 22% sin formaldehidos y ausente de cloruros, idóneo para hormigones premezclados caracterizados por una baja relación agua-cemento, altas resistencias mecánicas y un mantenimiento de laborabilidad de 2,5 a 3 horas. Densidad de $1,10 \pm 0,02$ Kg/L a 20°C.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El vacío experimental y la superficie específica deben ser tales que con una relación A/C y proporción de los áridos A_f/A_g dados el hormigón resulte laborable, resistente, durable, uniforme y económico. Estas propiedades del hormigón se citan en la PCA, EB201, 2004^[28].

3.1 Vacío experimental para la mezcla de los áridos ABH y gvAn.

En lo adelante se utilizará la terminología siguiente:

EMA: Error Medio Absoluto. D-W : Estadígrafo Durbin-Watson D-W P(D-W): probabilidad D-W S_e : Error estándar de la regresión *Resid*: Residuos K : curtosis A_s : Asimetría R^2 : coeficiente de determinación, $DesvT$: desviación típica, $J - B$: estadígrafo de Jarque-Bera, $P(J - B)$: probabilidad J-B, $\sum_{i=1}^n e_i$: suma de los residuos, $\sum_{i=1}^n (e_i)^2$: suma de los residuos al cuadrado.

El vacío experimental se desarrolla conforme a la norma NC.181:2002, asegurando de que cada ensayo se realiza de forma independiente. Se efectuó un ensayo y una réplica y cada proporción fue repetida con la misma muestra una vez, controlando que no se diferenciaron en más del 1% en peso. La producción de un hormigón satisfactorio y económico requiere áridos con baja cantidad de vacíos, pero no siempre la mínima, EB201, 2004^[28].

ABH:gvAn (%)	0:100	30:7	40:60	45:55	50:50	55:45	60:4	70:30	100:0
Vacío Exp. (%)	34,89	27,2	25,24	24,42	24,11	24,89	24,5	26,03	34,83
Asimetría	K	J - B	P(J-B)	<i>DesvT</i>	Median	Media	E. estándar	Rango	
1,182022	2,5942	2,15	0,3400	4,350	25,24	27,36	1,45209	10,78	
$\% \text{ Vacío} = 0,00413756 (A_f/A_g)^2 - 0,418921 A_f/A_g + 35,178578.$									
$R^2 = 0,99$	$S_e = 0,49$	$EMA = 0,33$	Los métodos estadísticos permiten al especialista tomar de decisiones correctamente con una confiabilidad del 95%.						

En la prueba de normalidad, Espallargas, 2008^[29], se tiene $P(J - B) = 0,34 > 5\%$, por lo tanto, no hay indicios de que los % Vacío no sigan una distribución normal. La proporción de los áridos tienen efecto significativo en el % Vacío.

3.1.1 Intervalo de confianza para los parámetros del modelo.

Modelo estadístico-matemático estimado: $\% \text{ Vacío} = \beta_2 (A_f/A_g)^2 + \beta_1 A_f/A_g + \beta_0$ y los intervalos de confianza para los parámetros son $34,0361 \leq \beta_0 \leq 36,321$; $-0,4623 \leq \beta_1 \leq -0,3755$ y $0,003732 \leq \beta_2 \leq 0,004543$. Los valores de los residuos $\sum_{i=1}^n e_i = 0$ y $\sum (e_i)^2 = 1,45$ son excelentes. Así, el control de la variabilidad de los áridos para la elaboración de los hormigones, con referencia al vacío mínimo, puede realizarse al 95% de confiabilidad para los intervalos de Confianza para los parámetros β_0 , β_1 , β_2 .

3.2 Mezcla de hormigón CK : ($A/C = 0,40$; $A_f/A_g = 40$).

Se muestran los resultados experimentales de los ensayos para la mezcla CK y se presentan los modelos estadístico-matemáticos de la resistividad eléctrica (R_i50) contra el tiempo hasta los 50 días y de la resistencia a compresión del hormigón ($R_{CK}28$) hasta los 28 días.

Edad (días)	2	3	3	4	7	7	9	15	16	17
$R_i(k\Omega - cm)$	3,3	4,0	3,6	3,7	4,5	4,8	5,1	5,3	6,0	5,7
Edad (días)	22	24	27	28	32	38	39	43	46	50
$R_i(k\Omega - cm)$	6,6	6,8	6,6	7,0	6,8	7,5	7,7	7,3	7,6	7,8

$R_i50 = 1,449344 \ln(Edad50) + 1,982972$; $R^2 = 0,967$; $S_e = 0,281$; $EMA = 0,216$
 $\sum_{i=1}^n e_i = 0$; $\sum(e_i)^2 = 1,42$. Los estadígrafos son excelentes.

Edad (días)	3	3	3	3	3	3	7	7	7
$R_i(k\Omega - cm)$	4,0	4,1	4,0	3,6	3,6	3,5	5,0	5,1	5,2
$R_{CK}(N/mm^2)$	32,51	33,47	33,37	33,46	33,34	33,84	37,81	36,03	38,66
Edad (días)	7	7	7	28	28	28	28	28	28
$R_i(k\Omega - cm)$	4,5	4,6	4,7	6,5	7,1	6,9	6,4	6,8	6,5
$R_{CK}(N/mm^2)$	38,34	36,27	37,78	47,25	48,08	49,16	47,40	48,41	46,08

$R_{CK}28 = 24,501931 \ln(R_i28) + 0,213781$; $R^2 = 0,916$; $S_e = 1,87$; $EMA = 1,50$
 $\sum_{i=1}^n e_i = 0$; $\sum_{i=1}^n (e_i)^2 = 27,05$ los estadígrafos dan un ajuste aceptable.

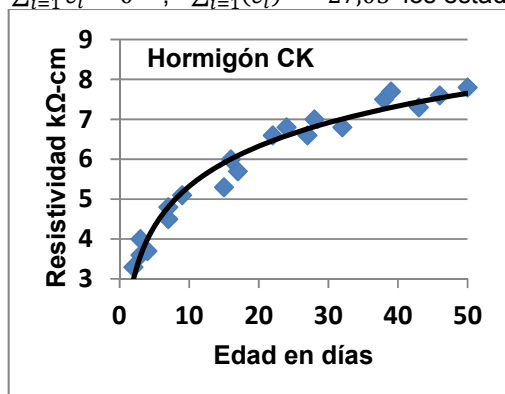


Figura 3.- Resistividad contra el tiempo

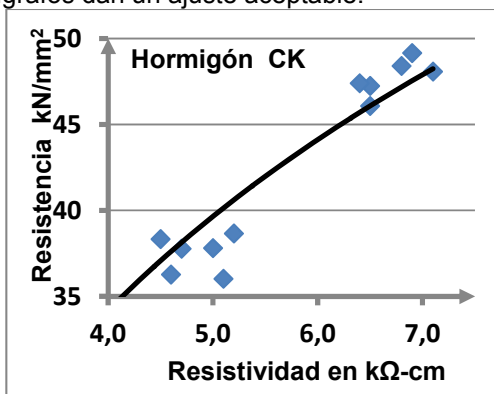


Figura 4.- Resistencia contra resistividad.

Los dos modelos estadístico matemáticos (Figura 3 y 4) que se obtienen son logarítmicos. Un control de calidad del hormigón CK a los 15 días debe medir una resistividad eléctrica de 5,9 kΩ-cm con una resistencia a compresión estimada de 43,7 N/mm².al 95% de confiabilidad.

El análisis para las 8 mezclas restantes se realizó de forma similar al mostrado para la mezcla CK, a partir de los datos experimentales para cada una de las mezclas. Los resultados se muestran en la tabla13.

Parámetros	Estimación	Error estándar	t-student	Probabilidad
Intercepto (β_0)	0,213781	3,00289	0,0711919	0,9441
Pendiente (β_1)	24,501931	1,85176	13,2317	0,0000

Los resultados que se muestran en la tabla 11 permiten rechazar la hipótesis nula $H_0: \beta_1 = 0$ y no rechazar la hipótesis alternativa $H_1: \beta_1 \neq 0$, dado que probabilidad = $0 < 5\%$, indicando que hay relación significativa entre la resistencia a compresión del hormigón y su resistividad eléctrica. Modelo simple.

Tabla 11.- Análisis de Varianza (ANOVA)					
Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados Medios	Estadístico F de Fischer	Probabilidad
Modelo	615,442	1	615,44	175,08	0,0000
Residuos	56,2439	16	3,5152		
Total (Corr.)	671,686	17			

Los resultados del ANOVA aseguran la validez del Modelo $R_{CK28} = 24,5019 \ln(R_i28) + 0,2138$ ya que probabilidad = $0 < 5\%$.

La resistividad eléctrica disminuye con el aumento de la relación A/C y la proporción de los áridos A_f/A_g , tal como se ilustra en la figura 5.

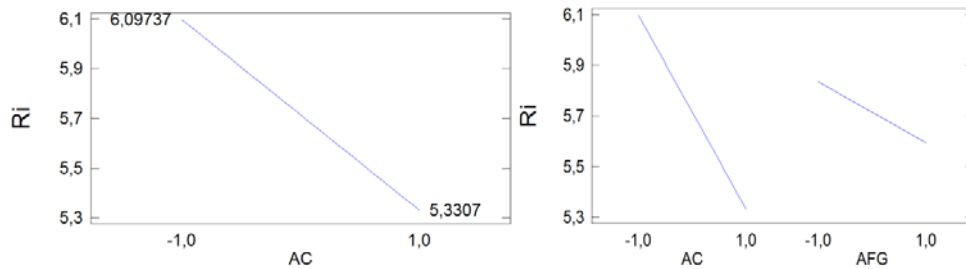


Figura 5.- Variación de los niveles $0,40 \leq AC = A/C \leq 0,50$ y $40 \leq A_f/A_g = AFG \leq 50$.

La proporción A_f/A_g no presta aporte revelador en la resistividad eléctrica y estadísticamente dicho aporte puede ser despreciado, respecto a la relación A/C .

3.3 La resistividad eléctrica y la resistencia a compresión del hormigón en el tiempo.

En 9 dosificaciones con una réplica y una adicional en el punto central, se elaboraron 57 probetas de cada mezcla a los 3, 7 y 28 días. Los modelos de R_i50 vs $Edad50$ de las mezclas se le realizan los ensayos de resistividad eléctrica hasta los 50 días, excepto las mezclas QR hasta los 32 días, TVO hasta los 35 y PS hasta los 36. Los modelos, por ejemplo, R_{CK28} vs R_i28 son los valores de resistencia a compresión del hormigón CK y de la resistividad eléctrica a los 28 días. En la tabla 12 siguiente, se muestran los modelos de las 9 mezclas.

Tabla 12.- La resistividad eléctrica y la resistencia a compresión del hormigón.

Mezclas	Modelo estadístico-matemático	R^2	S_e	$\sum(e_i)^2$
CK	$R_i = 1,4493 \ln(\text{Edad}50) + 1,9834$	0,97	0,28	1,42
	$R_{CK} = 24,5019 \ln(R_i28) + 0,214$	0,92	1,88	56,24
ML	$R_i = 1,4026 \ln(\text{Edad}50) + 1,3637$	0,98	0,15	0,52
	$R_{ML} = 24,6857 \ln(R_i28) + 1,40$	0,97	1,13	20,49
FG	$R_i = 0,9934 * \ln(\text{Edad}50) + 2,2841$	0,91	0,31	1,54
	$R_{FG} = 29,7531 \ln(R_i28) - 10,701$	0,92	1,71	46,77
DI	$R_i = 2,2841 \ln(\text{Edad}50) + 1,0771$	0,92	0,33	1,97
	$R_{DI} = 21,1102 \ln(R_i28) + 2,277$	0,92	1,57	39,42
DI	$R_i = 2,2841 \ln(\text{Edad}50) + 1,0771$	0,92	0,33	1,97
	$R_{DI} = 21,1102 \ln(R_i28) + 2,277$	0,92	1,57	39,42
NH	$R_i = 1,2337 \ln(\text{Edad}50) + 1,6130$	0,93	0,30	1,82
	$R_{NH} = 24,7878 \ln(R_i28) - 2,0061$	0,93	1,75	39,51
EJ	$R_i = 1,0994 \ln(\text{Edad}50) + 1,8508$	0,96	0,21	5,23
	$R_{EJ} = 21,9482 \ln(R_i28) + 3,2445$	0,74	2,89	71,75
QR	$R_i = 1,1467 \ln(\text{Edad}50) + 1,833$	0,741	0,59	5,23
	$R_{QR} = 19,2492 \ln(R_i28) + 8,0477$	0,883	1,74	35,34
TVO	$R_i = 1,2497 \ln(\text{Edad}50) + 1,799$	0,963	0,397	3,22
	$R_{TVO} = 17,0656 \ln(R_i28) + 5,073$	0,83	1,95	94,77
PS	$R_i = 0,8359 \ln(\text{Edad}50) + 2,0361$	0,71	0,43	2,80
	$R_{PS} = 17,3954 \ln(R_i28) + 3,0278$	0,89	1,36	29,40

3.4 La resistividad eléctrica como parámetro de control de la calidad del hormigón.

Mediante el ábaco que se muestra a continuación se puede llevar a cabo el control continuo de la calidad del hormigón, tanto por el proveedor como por el cliente. La edad marca los días.

R_{ij} : resistividad eléctrica (k Ω -cm), R_{CK} : resistencia a compresión del hormigón CK en N/mm^2 .

Tabla 13.- Ábaco para el control de la calidad del hormigón. ($1 \leq j \leq 9$)

Edad	3	5	7	9	11	14	17	21	24	28	30	35	40	45	50
R_{i1}	3,6	4,3	4,8	5,2	5,5	5,8	6,1	6,4	6,6	6,8	6,9	7,1	7,3	7,5	7,7
R_{CK}	31	36	39	40	42	43	44	46	46	47	***	***	***	***	***
R_{i2}	2,9	3,6	4,1	4,4	4,7	5,1	5,3	5,6	5,8	6,0	6,1	6,4	6,5	6,7	6,9
R_{ML}	28	33	36	38	40	41	43	44	45	46	***	***	***	***	***
R_{i3}	3,6	3,7	3,8	3,8	3,8	3,9	3,9	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,1	4,1
R_{FG}	28	28	29	29	29	30	30	30	30	31	***	***	***	***	***
R_{i4}	3,2	3,7	4,1	4,4	4,6	4,8	5,0	5,3	5,4	5,6	5,7	5,8	6,0	6,1	6,2
R_{DI}	27	30	32	33	34	36	36	37	38	39	***	***	***	***	***
R_{i5}	3,0	3,6	4,0	4,3	4,6	4,9	5,1	5,4	5,5	5,7	5,8	6,0	6,2	6,3	6,4
R_{NH}	25	30	32	34	36	37	38	40	40	41	***	***	***	***	***
R_{i6}	3,1	3,6	4,0	4,3	4,5	4,8	5,0	5,2	5,3	5,5	5,6	5,8	5,9	6,0	6,2
R_{EJ}	28	31	34	35	36	37	38	39	40	41	***	***	***	***	***
R_{i7}	3,1	3,7	4,1	4,4	4,6	4,9	5,1	5,3	5,5	5,7	5,7	5,9	6,1	6,2	6,3
R_{QR}	30	33	35	36	37	38	39	40	41	41	***	***	***	***	***
R_{i8}	3,2	3,8	4,2	4,5	4,8	5,1	5,3	5,6	5,8	6,0	6,1	6,2	6,4	6,6	6,7
R_{TVO}	25	28	30	31	32	33	34	34	35	36	***	***	***	***	***
R_{i9}	3,0	3,4	3,7	3,9	4,0	4,2	4,4	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3
R_{PS}	22	24	26	27	27	28	29	30	30	30	***	***	***	***	***

Es posible la interpolación. Un control de la calidad de la mezcla ML el día 21 debe indicar una resistividad eléctrica aproximada de $R_i = 5,6 \text{ k}\Omega - \text{cm}$ con un estimado de la resistencia a compresión del hormigón de $R_{mi} = 44 \text{ N/mm}^2$ al 95% de confiabilidad.

Conclusiones

- El ábaco de trabajo ingenieril, con la medida de la resistividad eléctrica, permite el control continuo de la calidad del hormigón en su estado fresco y endurecido, tanto al fabricante como al usuario en todo el dominio experimental, al 95% de confiabilidad. Se disminuyen notablemente los costos.
- Se mide cuantitativamente los grados de influencia de los factores relación A/C y la proporción de los áridos A_f/A_g en las respuestas, resistividad eléctrica y resistencia a compresión del hormigón, con lo cual se pueden hacer pronósticos y controlar las propiedades fundamentales de los materiales.
- El diseño experimental 3^2 de superficie de respuesta proporciona calidades de hormigón entre 20 y 45 N/mm^2 , en todo el dominio experimental: $0,40 \leq A/C \leq 0,50$ y $40 \leq A_f/A_g \leq 50$ al 95% de confiabilidad y facilita la búsqueda de la mezcla óptima.
- Los valores de resistividad eléctrica alcanzados a los 28 y 50 días son menores de $10 k\Omega - cm$, concluyendo que las mezclas de hormigón con los materiales empleados, no garantizan la durabilidad de la estructura, cuestión a tener en cuenta a la hora de su uso en obras. El uso de adiciones minerales es pertinente para disminuir los porcentos de vacío, aumentando compacidad y resistividad eléctrica.

REFERENCIAS

1. Andrade et al. "La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad". ALCONPAT, Volumen 1, Número 2, 2011, pp. 93-101. <http://www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista>; <http://www.redalyc.org/pdf/4276/427639585001.pdf>
2. Andrade et al., "Evaluación de mezclas de hormigón para el nuevo canal de Panamá mediante la medida de la resistividad y de la resistencia a la difusión de cloruros". ALCONPAT, Volumen 4, Número 2, 2014, pp. 100-115. <http://www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista>.
3. Andrade, C. "Especificaciones de cálculo de la vida útil y estado límite de corrosión", IETcc, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Madrid, España. 2013 Web: <http://www.ietcc.csic.es/index.php/es/>, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v3i2.45>.
4. Calleja, J., "Effect of current frequency on measurement of electrical resistance of cement pastes", J Am Conc Inst, 24 (1952) p329-332.
5. Hammond et al. "Comparison of Electrical Properties of Various Cements and Concretes". The Engineer, Vol. 199, No. 5165, 1955, pp. 78, London. <https://www.giatecscientific.com/wp-content/uploads/2013/06/Electrical-Resistivity-Measurements-in-Cementitious-Systems.pdf>
6. Monfore, G. E. "The electrical resistivity of concrete". Journal of the PCA Research Development Laboratories, 10(2), 1968, pp.35-48. <https://books.google.com/cu/books?id...>
7. Polder, R. et al., "Test methods for on site measurement of resistivity of concrete". RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. Materials and Structure, Vol 33, 2000, pp. 603-611.
8. Lizarazo, J. M. et al., "Desarrollo de un modelo de redes neuronales artificiales para predecir la resistencia a compresión y la resistividad eléctrica del concreto". Instituto de Ciencias de la Construcción, Eduardo Torroja, Madrid, España. Revista Ingeniería e investigación, Vol. 27, No. 1, 2007, p 11-18. <http://www.redalyc.org/pdf/643/64327103.pdf>
9. Quidel, R.A., "Estudio experimental de la relación permeabilidad - resistividad eléctrica del hormigón". Tesis de grado para Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.: Santiago de Chile, 2008, 50 p. http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104170/cf-gonzalez_as.pdf?sequence=3
10. Ghasemzadeh H. M. et al. "An investigation of the effect of the different mix constituents on concrete electric resistivity". World Academy of Science, Eng. and Technology, 2009, 4 p.
11. D'Andrea R., "Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica". Tesis Doctoral. UPM, 2010, 342 p. http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/13747/PicosPerez_MariaDelCarmen_TFG_2014.pdf;sequence=2
12. Rebolledo N., "Aplicación de técnicas no destructivas al estudio del hormigón fresco". Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de caminos, canales aplicación de la resistividad eléctrica. Tesis Doctoral. UPM. CSIC, 2010, 342 p.

13. Cárdenas J. D., "Manual para la interpretación del perfil de resistividad obtenido al realizar el estudio de la resistividad del suelo a partir de las configuraciones del método de Wenner". Proyecto de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Fac. de Tecnologías. Pereira, 2011.
14. Spragg, R. et al., "*Variability 19 Analysis of the Bulk Resistivity Measured Using Concrete Cylinders*", Publication 20, 2011, FHWA/IN/JTRP.
<http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2979&context=jtrp>
15. Presuel-Moreno et al. "*Numerical Modeling of the Effects of Rebar 27 Presence and/or Multilayered Concrete Resistivity on the Apparent Resistivity Measured 28 via the Wenner Method*". Construction and Building Materials, V.48, pp. 16-25, 29. DOI: 10.1016/j. con build mat. 2013.06.053
16. Medeiros-Junior, R. A. et al. "Investigação da resistência à compressão e da resistividade eléctrica de concretos con diferentes tipos de cimento. ALCONPAT, Volumen 4, Número 2, pp. 116-132.
<http://www.revistas.onacyt.unam.mx/alconpat/index.php/RA/article> .
17. Pico M. C., "La resistividad eléctrica como indicador de durabilidad". Tesis de grado. Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica. Universidad da Coruña, 2014, 127 p.
18. Polder R. B. et al. "Electrical resistivity testing for as-built concrete performance assessment of chloride penetration resistance". RILEM International workshop on performance- based specification and control of concrete durability, Croatia, 2014, 7 p.
19. Howland Albear, J. J. (2016), Acevedo J. et al., "Estudio de las proporciones óptimas de microsilíce y nanosilíce en hormigones de alto desempeño por durabilidad, mediante un diseño de experimento de tipo hexagonal". Revista Cubana de Ingeniería. Vol. VII, No. 2, pp. 26-32, ISSN 2223-1781.
20. Riverón, R. W. "Algunas consideraciones sobre la resistividad eléctrica en modelos y probetas", Tesis de Diploma para Ingeniero Civil, Universidad Tecnológica de la Universidad de La Habana, Cuba, 2010, p. 97.
21. Martínez, J. R. et al. "Evaluación de Materiales de Construcción y su aplicación en el Diseño de Hormigones Normales y en Masa.", 10^{mo} Simposio Internacional de estructuras, geotecnia y materiales de construcción, Universidad Central "M. Abreu" de Las Villas, 2013, Cuba.
22. Martínez, L. R. "Estudio de la relación entre la resistividad eléctrica y las propiedades físico-mecánicas del hormigón", Trabajo de Diploma para Ingeniero Civil, 2015, CUJAE.
23. RED DURAR. "Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión de estructuras de hormigón armado". CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo. Subprograma XV Corrosión/Impacto ambiental sobre materiales. 1997. 208 p.
24. Wenner, F. "A Method for Measuring Herat Resistivity", Bureau of Standards J., 1915, pp. 469 – 478.
<https://groups.google.com/d/topic/listaelectricaSM/-RA4YZVtPlo>.
25. Montgomery, Douglas C. "Diseño y análisis de experimentos". Arizona State University, Grupo Editorial Iberoamérica, Nebraska 1996. Col. Nápoles, 03810 México.
26. Morris et al., "Practical Evaluation of Resistivity of Concrete in Test Cylinders Using a Wenner Array Probe". Cement and Concrete R. 26 (12), 1779-1787.
27. Bogue, R. H. "Portland Cement in Concrete Engineering Concrete", 30 (3), 1927, p33-36.
http://www.uobabylon.edu.iq/eprints/publication_1_302_1586.pdf
28. EB201. "Diseño y control de mezclas de concreto. Agregados para concretos", Cap. 5, PCA, 2004.
29. Espallargas, I., D. et al. "Guía de estudio de Econometría". Dpto. Estadística - Informática. Facultad de Economía. Universidad de La Habana, 2008, 49 p.