

Modelo matemático para predecir la resistencia a compresión del hormigón a 28 días

Mathematical model to predict the compressive strength of concrete in 28 days

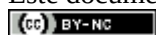
Iatny de la Roz Martínez¹, René Puig Martínez^{2,*}

¹Institución Docente de Nivel Superior de las FAR “General Antonio Maceo”. Artemisa, Cuba.

²Universidad Tecnológica de La Habana, CUJAE. Calle 114 No.11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana, Cuba.

*Autor de correspondencia: rpuig@civil.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](#)



Recibido: 3 diciembre 2020 **Aceptado:** 23 enero 2021 **Publicado:** 26 enero 2021

Resumen

Durante los últimos años en Cuba se han empleado tecnologías de construcción hormigonadas in situ, como las empleadas en los edificios del sistema de formaletas FORSA y otras obras dedicadas al sector del turismo. Como tecnologías modernas de construcción, se desencofran en plazos menores que los propios de las tecnologías tradicionales, no permitiendo los ritmos de avance esperar los 28 días para conocer los valores de resistencia a compresión alcanzados por el hormigón. En estos casos es necesario predecir cuál será la misma a esa edad a partir de la obtenida con la rotura de probetas a edades tempranas. El objetivo del presente trabajo fue obtener un modelo de regresión lineal para predecir la resistencia a compresión a 28 días a partir de los resultados de esta propiedad a los tres días, en hormigones cuya resistencia característica sea de 25 MPa. El modelo matemático obtenido posibilita determinar la resistencia a 28 días de hormigones elaborados con cementos P-35 y PP-25, y con relaciones agua/cemento de 0,45 y 0,65 a partir de los resultados del parámetro a los tres días, para una resistencia característica de diseño de la dosificación de 25 MPa.

Palabras clave: hormigón, modelo matemático, resistencia a compresión

Abstract

During the last years in Cuba, concrete construction technologies have been used in situ, such as those used in the residential buildings of the FORSA form system and other tourism sector works. As modern construction technologies, they are disengaged in shorter terms than those of traditional technologies, not allowing the rates of progress to wait 28 days to know the values of compressive strength reached by concrete. In these cases it is necessary to predict what will be the same at that age from that obtained with the breaking of specimens at an early age. The scope of this work is to obtaining a linear regression model to predict the compressive strength at 28 days from the results of this property at three days, in concretes whose characteristic resistance is 25 MPa. The mathematical model obtained brings the possibility of the compression strength determination for 28 days, for concrete made by cement P-35 and PP-25, and water/cement ratios of 0.45 and 0.65 based on the results for 3 days, for a characteristic strength of a dosage by design of 25 MPa.

Keywords: concrete, mathematical model, compressive strength

1. Introducción

El hormigón es un material heterogéneo debido a que sus componentes tienen propiedades que no son constantes. No solo son los materiales los causantes de las variaciones en las propiedades del hormigón endurecido, sino que también influyen las tecnologías de mezclado, transporte, colocación, compactación y curado; o sea, las actividades simples integrantes del sistema complejo de hormigonado, lo que exige tomar todas las precauciones necesarias para que la calidad del material sea la establecida por las normas. Entre los criterios que definen la calidad del hormigón, se encuentran fundamentalmente aquellos que resultan de los ensayos de resistencia a compresión [1-2].

La resistencia del hormigón aumenta con la edad y dicho incremento se produce rápido durante los primeros días posteriores al inicio de su hidratación, resultando más gradual al transcurrir el tiempo y luego continúa incrementándose en una proporción reducida durante un periodo de tiempo indefinido. La resistencia a compresión de un hormigón a 28 días, determinada de acuerdo con los ensayos que están en las normas, es uno de los indicadores de calidad del mismo [3].

Durante los últimos años se han utilizado en Cuba modernas tecnologías de construcción hormigonadas in situ con ritmos de avance que no permiten esperar 28 días para conocer la resistencia a compresión del hormigón a esa edad, siendo necesario estimar la misma a partir de los resultados de los ensayos a edades tempranas. En Cuba, como en la mayoría del mundo, para determinar la resistencia a compresión del hormigón a 28 días se realizan ensayos de rotura de probetas de acuerdo con normas. En el caso de Cuba son las normas NC 192 (Hormigón hidráulico, cálculo de la resistencia característica real a compresión) y NC 244 (Hormigón endurecido, determinación de la resistencia a compresión en probetas cilíndricas), efectuándose este proceder a edades tempranas sólo por decisión del usuario. En Cuba existe la práctica de emplear relaciones porcentuales para predecir valores de resistencia a compresión entre diferentes edades, pero al ser ésta una propiedad multifactorial, los resultados obtenidos no son exactos y muchas veces se alejan de la realidad. Contradictoriamente, las modernas tecnologías de hormigonado in situ exigen definir las propiedades de este material, en particular la resistencia a compresión, con la mayor exactitud posible, y aunque la literatura internacional recoge procedimientos para predecirla a partir de ensayos a edades tempranas, al ser variados los factores influyentes, se hace necesario investigar los propios para cada región o país.

Castro et al. [4] plantean que actualmente la resistencia a compresión del hormigón es la propiedad más buscada en éste como material de construcción, ya que es fácil de medir y se relaciona con otras propiedades, independientemente de la importancia que adquiere desde hace ya algunos años la durabilidad. Es por ello que, en variadas fuentes, tanto nacionales como internacionales, se puede encontrar la interrelación entre esta importante propiedad y otras que influyen en su determinación a edades tempranas, para así poder estimar la que alcanzará a 28 días.

En el análisis de la literatura realizado [4-6], se reconocen y se adoptan criterios definidos en la práctica internacional, en las cuales la relación agua/cemento, el tipo de cemento y las condiciones del curado, son los principales factores que influyen en la calidad final del hormigón. La bibliografía consultada coincide en que son disímiles y variados los factores que influyen en el proceso de endurecimiento del hormigón [4-5, 7-10], por lo que resulta muy difícil predecir la resistencia a una edad a partir de la resistencia a edades tempranas y viceversa. Definida esta problemática, y teniendo en cuenta lo planteado, el objetivo del presente trabajo es desarrollar un modelo matemático para estimar la resistencia a compresión del hormigón a la edad de 28 días a partir de los ensayos en probetas a edades tempranas. El objeto de investigación es el hormigón de cemento Portland.

2. Materiales y Métodos

La principal característica estructural del hormigón es resistir los esfuerzos de compresión. La resistencia característica a la compresión del hormigón se define como valor de la resistencia a compresión por debajo del cual es esperable que se obtenga no más de un determinado porcentaje de la población de todas las posibles mediciones de resistencias del hormigón especificado [1-2]. Este parámetro se determina en Cuba a partir del ensayo de probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura, elaboradas y curadas de acuerdo con la norma cubana NC-ISO 1920-3 y ensayadas según las normas cubanas NC 192 y NC 244. En la norma cubana NC 192 se expone que cada serie de probetas tiene tres unidades y como mínimo dos para análisis en el laboratorio. A pie de obra es suficiente obtener por cada muestra, tres series de probetas, dos para ensayar a los 3 y 7 días y otra para los 28 días, pero si se desean obtener las resistencias a otras edades se confeccionan tantas series como se soliciten.

Los dos criterios de conformidad para la aceptación de un lote de hormigón por su resistencia a compresión, están indicados en la norma cubana NC 120 (Hormigón hidráulico, especificaciones). Si no cumple con estos, será rechazado. Se puede constatar que el incremento de la resistencia del hormigón es mayor en las primeras edades, en el orden del 40% a los tres días de la que tendrá a los 28 días [11-12], haciéndose más lenta con el paso del tiempo hasta que se estabiliza. A partir de lo anterior, se decide que para obtener el modelo matemático se desarrolle un experimento de un diseño factorial completo con réplicas, del tipo 2^k para tres factores con dos niveles cada uno [13-14]. Como se reconoce la influencia multifactorial en el estudio del problema, para no hacer extensa la investigación, se consideran los siguientes límites: cemento portland P-35 y cemento portland puzolánico PP-25 para la confección de los hormigones; resistencia característica, f_{ck} , de 25 MPa para los hormigones; edad entre 3 y 28 días.

La elaboración de la mezcla de hormigón se desarrolla en el laboratorio del Centro de Investigaciones y Servicios Técnicos de la Construcción (CITEC) de Cuba, entidad certificada para ensayos a materiales de construcción. También en el propio laboratorio, se realizan los ensayos correspondientes, tanto a los materiales constituyentes del hormigón como a las probetas, con todas las condiciones y el equipamiento requerido para cumplir los mismos con rigor.

Para la investigación, cumpliendo con lo normado, se confeccionan tres probetas para cada edad a ensayar. También se toma una muestra para el experimento y dos para las réplicas. Las unidades experimentales en total son 72 probetas de hormigón de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, las cuales cumplen con todas las exigencias planteadas en las normas cubanas NC 167 (Hormigón fresco, toma de muestras) para la toma de las muestras y NC-ISO 1920-3 (Ensayos al hormigón, elaboración y curado de probetas), para la confección y curado de estas. El personal que realiza los ensayos a los materiales, así como los experimentos, son técnicos profesionales pertenecientes al propio CITEC, certificados para realizar esta actividad.

Las variables de la investigación quedan definidas entonces de la siguiente forma:

- Rendimiento o variable dependiente: resistencia a compresión del hormigón (f_c), expresada en MPa
- Factores o variables independientes:
 - a) a/c : Relación agua/cemento, con valores de 0,45 y 0,65
 - b) R_c : Resistencia a compresión del cemento a la edad de 28 días, con valores de 25 y 35 MPa
 - c) n : Edad del hormigón, con valores de 3 y 28 días
- Niveles: se establecen dos niveles para cada factor, máximo y mínimo

Los intervalos de variación de las variables independientes del experimento se calcularon y los resultados de los mismos se reflejan en la Tabla 1 para cada nivel. Al realizar el análisis estadístico de los resultados del experimento se determina el efecto de los factores y sus interacciones en el rendimiento [15]. Para desarrollar este razonamiento teórico se plantea una prueba de hipótesis y se calcula el criterio de *Student*.

Tabla 1. Niveles de variación de las variables independientes

Variable independiente	Código	Nivel de variación		Intervalos de variación
		-1	+1	
n	X ₁	3	28	12,5
R _c	X ₂	25	35	5
a/c	X ₃	0,45	0,65	0,1

Para elaborar el hormigón se diseñan cuatro dosificaciones teniendo en cuenta las combinaciones de las diferentes variables independientes de la investigación. Las dosificaciones son diseñadas por los especialistas del CITEC y en las mismas se prescinde del empleo de aditivos por la variedad y, en ocasiones, poca disponibilidad de estos en el mercado, así como sus diversas influencias en la variación de la resistencia a compresión del hormigón. Las dosificaciones obtenidas y los materiales empleados medidos en peso para elaborar un metro cúbico de hormigón, se aprecian en la Tabla 2, correspondiendo cada una de ellas a una resistencia característica del hormigón de 25 MPa.

Tabla 2. Dosificación de materiales según los tipos de cementos y las relaciones agua/cemento empleados

Número de dosificación	Materiales	Peso de materiales para 1 m ³ de hormigón (kg)			
		Cemento P-35		Cemento PP-25	
		a/c = 0,45	a/c = 0,65	a/c = 0,45	a/c = 0,65
1	Agua	165	235	170	245
2	Cemento	365	365	375	375
3	Gravilla	955	860	945	850
4	Arena	810	730	800	720
Totales		2295	2190	2290	2190

El árido grueso empleado es gravilla proveniente de la cantera “San José” del municipio de San José de las Lajas, provincia de Mayabeque. Como árido fino se emplea arena de la cantera “Peñalver”, del municipio de Guanabacoa, provincia de La Habana. La decisión viene dada por ser dos áridos habitualmente empleados en las obras de la ciudad. El cemento Portland P-35 empleado proviene del Mariel y el Portland puzolánico PP-25 de Artemisa. Se decide el empleo de estos por ser los de mayores volúmenes de fabricación en Cuba y teniendo en cuenta los usos que plantea la NC 845 (Recomendaciones para el uso de cementos).

3. Resultados y Discusión

Los resultados de los ensayos realizados, tanto a los materiales como a la mezcla de hormigón en estado fresco y endurecido, son los que se presentan a continuación. En las Tablas 3 y 4 se muestran los resultados de los ensayos físicos y granulométricos de los dos áridos, y en la Tabla 5, de los dos cementos empleados.

Puede apreciarse en la Tabla 3 que la arena “Peñalver” cumple con todas las especificaciones establecidas, lo que constituye un elemento favorable, ya que no tendrán las propiedades una influencia negativa en los resultados de los experimentos. La gravilla “San José”, según la Tabla 4, a

excepción de la composición granulométrica en los tamices de 12,7 y 9,52 mm, cumple con todas las especificaciones establecidas.

Tabla 3. Resultados de los ensayos físicos y granulométricos a la arena “Peñalver”

Propiedades	Unidad	Valores	Especificaciones normadas
Peso específico corriente (PEC)	g/cm ³	2,52	No menor de 2,5
Peso específico saturado (PES)	g/cm ³	2,59	-
Peso específico aparente (PEA)	g/cm ³	2,72	-
Peso unitario suelto (PUS)	kg/m ³	1529	-
Peso unitario compactado (PUC)	kg/m ³	1609	-
Porcentaje de absorción	%	2,88	No mayor de 3
Porcentaje de tamiz 200	%	2,79	No mayor de 5
Porcentaje de huecos	%	36,19	-
Porcentaje de terrones de arcilla	%	0,33	No mayor de 3
Porcentaje de azul de metileno	g/kg	0,3	0,6
	9,52	%	100
	4,76	%	90 a 100
	2,38	%	70 a 100
Material pasado por	1,19	%	45 a 80
cada tamiz	0,59	%	25 a 60
	0,297	%	10 a 30
	0,149	%	2 a 10
Módulo de finura (MF)	-	2,67	2,2 a 3,58

Tabla 4. Resultados de los ensayos físicos y granulométricos a la gravilla “San José”

Propiedades	Unidad	Valores	Especificaciones normadas
Peso específico corriente (PEC)	g/cm ³	2,61	No menor de 2,5
Peso específico saturado (PES)	g/cm ³	2,65	-
Peso específico aparente (PEA)	g/cm ³	2,73	-
Peso unitario suelto (PUS)	kg/m ³	1430	-
Peso unitario compactado (PUC)	kg/m ³	1551	-
Porcentaje de absorción	%	1,70	No mayor de 3
Porcentaje de tamiz 200	%	0,60	No mayor de 1
Porcentaje de planas y alargadas	%	4,96	Inferior o igual a 10
Porcentaje de partículas de arcilla	%	0,05	Inferior o igual a 0,25
Porcentaje de huecos	g/kg	40,52	-
	25,4	%	100
	19,1	%	90 a 100
Material pasado por	12,7	%	20 a 55
cada tamiz	9,52	%	0 a 15
	4,76	%	0 a 5
Tamaño máximo del árido (TMA)	mm	19,1	-

Puede apreciarse que ambos tipos de cementos cumplen con las especificaciones normadas en Cuba. En el estado fresco se le realizan al hormigón ensayos de consistencia para determinar la laborabilidad así como ensayos para determinar la temperatura y densidad de la mezcla. Los resultados se reflejan en la Tabla 6. Para corroborar la calidad del hormigón en estado endurecido se determina, primero, la velocidad del pulso ultrasónico [16], según la NC 231 (Determinación, interpretación y aplicación de la velocidad del pulso ultrasónico en el hormigón), y segundo, la resistividad eléctrica [10], la que además brinda criterios de riesgo de corrosión. Cada valor fue

tomado tres veces en tres probetas elegidas al azar, para cada dosificación. Los valores promedios obtenidos en estas dos propiedades se pueden apreciar en la Tabla 7.

Tabla 5. Resultados de los ensayos a los cementos

Propiedades	Unidad	Cemento P-35		Cemento PP-25	
		Valor	Especificaciones	Valor	Especificaciones
Densidad	g/cm ³	3,18	No se especifica	2,99	-
Consistencia normal	%	24,6	No se especifica	24,9	-
Fraguado inicial	min	92	Mín. 45	157	Mín. 45
Fraguado final	h y min	2;00	Máx. 10	3;25	Máx. 12
Peso volumétrico	kg/m ³	1153	No se especifica	1039	-
Finura	%	2,4	No se especifica	5,6	-
Estabilidad de volumen	%	1	Máx. 10	2	Máx. 10
Resistencia a 28 días	MPa	35	35	25	25

Tabla 6. Resultados de los ensayos realizados a los hormigones de las dosificaciones en estado fresco

Dosificación	Asentamiento en el cono (mm)	Temperatura (°C)				Densidad (kg/m ³)
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Promedio	
1	50	27,3	27	27,4	27,23	2453
2	150	28,5	28,2	28,6	28,43	2427
3	60	27,8	28	27,9	27,90	2441
4	170	29,2	28,9	29,1	29,06	2419

Tabla 7. Resultados promedios de velocidad del pulso ultrasónico y de resistividad en las probetas

Dosificación	Promedio del pulso ultrasónico (m/s)			Resistividad promedio (kΩ·cm)		
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
1	3700	3729	3684	10,43	10,53	10,26
2	3666	3654	3669	12,4	12,23	12,5
3	3712	3684	3719	9,53	9,23	9,33
4	3691	3693	3691	11,1	11,36	11,5

Puede apreciarse que en todos los casos la velocidad del pulso ultrasónico es siempre superior a 3000 m/s, lo que se corresponde con un hormigón de alta capacidad de resistencia al medio agresivo. La resistividad, en las dosificaciones 1, 2 y 4, se corresponden con un hormigón con bajo riesgo de corrosión de las armaduras de refuerzo; la dosificación 3, ligeramente por debajo de esta categoría.

Para desarrollar los ensayos de determinación de la resistencia a la compresión de las probetas se confeccionó la matriz de planificación del experimento que se muestra en la Tabla 8. Estos resultados se analizaron en el Statgraphics Centurion obteniendo el modelo de regresión lineal mostrado en la ecuación 1, en variables codificadas:

$$f_c = 19,083 + 9,483 \cdot n + 1,458 \cdot R_c - 0,625 \cdot \frac{a}{c} + 0,375 \cdot n \cdot R_c - 0,142 \cdot n \cdot \frac{a}{c} + 0,05 \cdot R_c \cdot \frac{a}{c}, \text{ MPa} \quad (1)$$

Siendo:

f_c : Resistencia a compresión del hormigón (MPa).

n : Edad del hormigón (días).

R_c : Resistencia a compresión del cemento (MPa)

a/c : Relación agua/cemento

Tabla 8. Matriz de planificación del experimento y sus réplicas

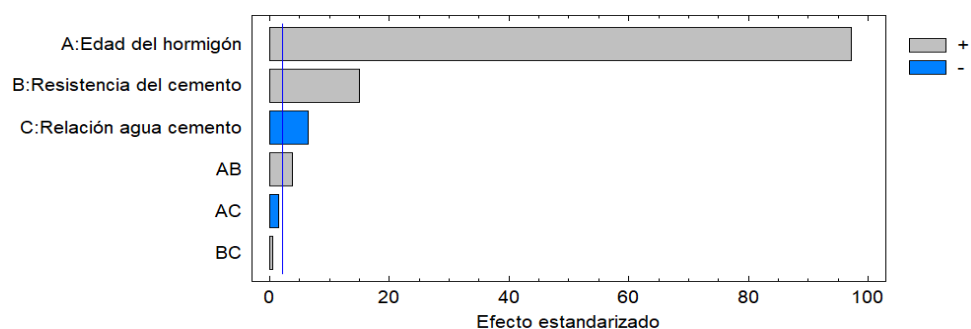
Experimentos	Variables independientes			f_c (MPa)		
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3
1	+1	+1	+1	29,6	29,4	29,7
2	+1	-1	+1	26,2	25,7	26,2
3	-1	+1	+1	10,6	10,5	10
4	-1	-1	+1	8,1	7,8	7,7
5	+1	+1	-1	30,1	31,4	32,2
6	+1	-1	-1	27,3	28	27
7	-1	+1	-1	11	10,9	11,1
8	-1	-1	-1	9,1	9,2	9,2

Los resultados del análisis de varianza del modelo, mediante la tabla ANOVA, se muestran en la Tabla 9. El diagrama de Pareto para el análisis de la influencia de factores propio del modelo se muestra en la Figura 1.

Tabla 9. Análisis de varianza del modelo (Tabla ANOVA)

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A : Edad del hormigón	2 158,41	1	2158,41	9445,98	0,0000
B : Resistencia del cemento	51,0417	1	51,0417	223,38	0,0000
C : Relación agua/cemento	9,375	1	9,375	41,03	0,0000
AB	3,375	1	3,375	14,77	0,0016
AC	0,481667	1	0,481667	2,11	0,1671
BC	0,06	1	0,06	0,26	0,6158
Bloques	0,205833	2	0,102917	0,45	0,6457
Error total	3,4275	15	0,2285		
Total (corr.)	2 226,37	23			

Tanto en los valores de probabilidad en la tabla ANOVA, como en el diagrama de Pareto, se puede constatar que, de los coeficientes en la ecuación, solo las interacciones entre los factores edad del hormigón con relación agua/cemento (AC) y resistencia del cemento con relación agua/cemento (BC), no cumplen con la regla de decisión que plantea la primera prueba de hipótesis, para el nivel de significación entre los factores y sus interacciones. Por esta razón se decide excluirlos del modelo. El nuevo modelo ajustado con las variables codificadas, al excluir estas interacciones que según se expone en la ecuación 2.

**Fig. 2.** Diagrama de Pareto

$$f_c = 19,083 + 9,483 \cdot n + 1,458 \cdot R_c - 0,625 \cdot \frac{a}{c} + 0,375 \cdot n \cdot R_c \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

Al realizar la segunda prueba de hipótesis se determina que el estadígrafo calculado es mayor que el obtenido por la tabla, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta el modelo como adecuado. Al sustituir en la ecuación 2 los valores reales de las variables independientes (ver Tabla 1), la ecuación definitiva queda según 3:

$$f_c = 4,802 + 0,579 \cdot n + 0,199 \cdot R_c - 6,25 \cdot \frac{a}{c} + 0,375 \cdot n \cdot R_c \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

4. Conclusiones

Del desarrollo de la investigación se extraen criterios importantes que corroboran la hipótesis inicialmente trazada para la misma. Puede apreciarse que los dos áridos empleados cumplen las propiedades establecidas en las normas cubanas vigentes, con excepción de la granulometría del árido grueso, lo que posibilita aislar la influencia de factores negativos en los resultados. Lo mismo ocurre con los dos cementos empleados, cuyas propiedades cumplen con las especificaciones previstas en las normas cubanas NC 95 (Cemento Portland, especificaciones) y NC 96 (Cemento con adición activa, especificaciones). La medida de asentamiento muestra que las dosificaciones 1 y 3 se corresponden con mezclas secas a plásticas debido a la baja relación agua/cemento, en este caso tan solo 0,45. Las otras dos presentan asentamiento entre blandas y fluidas, por la razón contraria, dado que la relación agua/cemento en ellas es de 0,65. La temperatura, en todos los casos, se comporta por debajo de los 35°C, como plantea la norma cubana NC 354 (Hormigón fresco, determinación de la temperatura). Todas las variantes de dosificaciones corresponden a hormigones de densidad normal, es decir, aproximadamente 2400 kg/m³. Con los resultados que se obtienen de la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico y la resistividad eléctrica, se aprecia que los hormigones diseñados presentan buena calidad y ofrecen bajo riesgo de corrosión de las armaduras. El modelo matemático obtenido posibilita determinar la resistencia a compresión a 28 días de edad, de hormigones elaborados con cementos P-35 y PP-25, y con relaciones agua/cemento de 0,45 y 0,65, a partir de los resultados de este parámetro a los tres días, para una resistencia característica de diseño de la dosificación de 25 MPa.

Referencias

1. Gambhir, M.L., *Concrete technology. Theory and Practice*. 5ta Edición, 2013. McGraw Hill Education: New Delhi. ISBN 978-125-906-255-1.
2. Neville, A.M., Brooks, J.J., *Concrete technology*. 2da Edición, 2010. Prentice Hall: Harlow. ISBN 978-027-373-219-8.
3. Giménez, E., Torres, R., Serna, P., *Tiempos de fraguado, consistencia y propiedades mecánicas de hormigón de ultra alta resistencia con fibras (UHPFRC)*. V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6380>.
4. Castro, M., Alvarado, Y., Gash, I. *Aplicación del método de la madurez para la estimación del plazo de descimbrado de forjados construidos con sistemas industrializados*. Revista Informes de la Construcción, 2016. **68**(541): e131. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.14.105>.
5. León, L., Hernández, M., *Comparación de los valores de resistencia a compresión del hormigón a la edad de 7 y 28 días*. Revista de Arquitectura e Ingeniería, 2016. **10**(1): p. 1-9.
6. Akasaki, J., Bassan, M., Silva, C., Floriti, C., Mitsuuchi, M., *Evaluación del concepto de madurez en el hormigón con adición de ceniza de cáscara de arroz*. Revista Ingeniería de Construcción, 2016. **31**(3): p. 175-182. DOI: <https://doi.org/10.4067/SO718-50732016000300003>.

7. Ebensperger, L., Oyarzún, J.C., Torres, R., *Determinación de la temperatura DATUM para la aplicación de madurez en climas fríos*. Revista Ingeniería de Construcción, 2020. **35**(1): 88-99. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732020000100084>.
8. Yu, J., Lu, C., Leung, C.K., Li, G., *Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash*. Construction and Building Materials, 2017. **147**: p. 510-518. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.188>.
9. Santamaría, J., Morales, L., Pitaluisa, J., *Modelo para dosificación de mezclas de hormigón utilizando lógica difusa*. Revista Investigación y Desarrollo, 2018. **1**(1): p. 54-61 DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.815>.
10. Juela, D., Bermeo, J., Álvarez, D., *Resistencia a compresión y resistividad eléctrica de hormigones elaborados con materiales cementicios suplementarios y agregados reciclados*. Revista Ingeniera de Obras Civiles, 2020. **10**(1): p. 32-44.
11. Rudeli, N., Santilli, A., *Medición de resistencias a tempranas edades del hormigón: método que mejor se ajusta para la determinación de tiempos mínimos de desencofrado de elementos verticales de hormigón*. Revista Obras y Proyectos, 2017. **22**: p. 6-16.
12. Fernández, A., Howland, J.J., *Factores de corrección a la resistencia de testigos de hormigón. Análisis crítico de las normas cubanas e internacionales*. Revista Informes de la Construcción, 2017. **60**(547): e212. DOI: <https://dx.doi.org/10.3989/id53723>.
13. Howland, J.J., *Elementos de estadística y diseño de experimentos en la tecnología del hormigón*, 2004, Editorial Obras: La Habana. ISBN 978-959-247-002-6.
14. Toirac, J., *La resistencia característica del hormigón: fundamentos estadísticos y determinación práctica*. Ciencia y Sociedad, 1999. **24**(1): p. 88-117. DOI: <https://doi.org/1022206/cys.1999.v24i1>.
15. Melo, O., López, L., Melo, S., *Diseño de experimentos. Métodos y aplicaciones*. 2da Edición, 2020, Universidad Nacional de Colombia: Bogotá. ISBN 987-958-701-815-8.
16. Cruz, J., Martínez, L., López, A., Lakah, J., Ceballos, C., *Relación entre ensayos ultrasónico y convencional para determinar la resistencia simple a la compresión*. INGE CUC, 2016. **12**(1): p. 94-98.

Conflicto de Intereses

No existe ningún conflicto de intereses entre los autores, ni de los autores con otras entidades vinculadas al contenido del manuscrito.

Contribución de los autores

Iatny de la Roz Martínez. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6321-8424>

Participó en la investigación y la redacción del manuscrito.

René Puig Martínez. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9025-4423>

Participó en la investigación y la revisión del manuscrito.