

Ajuste de la expresión de resistencia a compresión del hormigón en estructuras según la norma NC 1109

Adjustment of the expression of compression strength of concrete in structures according to NC standard 1109



Carlos Alberto Porras Navarro¹, René Antonio Puig Martínez²

¹ Máster en Ingeniería Civil e Ingeniero Civil, Especialista Principal de la OSDE BioCubaFarma, Avenida Boyeros y Calle 100, Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: cporras@oc.biocubafarma.cu

² Doctor en Ciencias Técnicas e Ingeniero Constructor, Profesor Principal de Tecnología y Materiales de Construcción del Departamento de Construcciones y Viales de la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", Calle 114 No. 11901, Marianao, La Habana, Cuba, e-mail: rpuig200453@gmail.com y rpuig@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

La resistencia a compresión del hormigón es una propiedad que es imprescindible conocer en obras que se encuentren en ejecución, así como en obras en proceso de rehabilitación, en estructuras que sufren accidentes y que demandan acciones de reconstrucción y en obras en explotación que hayan tenido incrementos en las cargas de uso. La determinación de esta propiedad encierra diversas dificultades, como la imposibilidad de extraer testigos en los elementos objeto de estudio sin que se afecte la estructura. Para evitarlo la ingeniería ha desarrollado procedimientos no destructivos, como la esclerometría y el ultrasonido, que empleados de forma independiente no son suficientemente exactos para estimar la resistencia a compresión. Una práctica internacional es auxiliarse de ambos tipos de ensayos, no destructivos y destructivos, confeccionando ecuaciones de regresión para estimar la resistencia a compresión a partir de los primeros. En Cuba, este proceder está regulado por la norma NC 1109 que posee su propia ecuación de regresión. Sin embargo, los autores del presente artículo demuestran que esta ecuación no es suficientemente exacta y que existen otras que se adecuan más a las condiciones del país. Precisamente, en el artículo se compara el comportamiento de la ecuación normada en la NC 1109 del año 2015, con la ecuación general del método combinado SONREB aplicado en otros países, como resultado de lo cual se obtiene una nueva ecuación de regresión propia a partir de los datos analizados.

Palabras claves: ecuación de regresión, hormigón, resistencia a compresión

ABSTRACT

The compressive strength of concrete is a property that is essential to know in constructions that are in progress, as well as constructions in the process of rehabilitation, in structures that suffer accidents and that demand reconstruction actions and in constructions in operation that have had increases in the usage loads. Determining this property involves various difficulties, such as the impossibility of extracting cores in the elements under study without affecting the structure. To avoid this, engineering has developed non-destructive procedures, such as sclerometry and ultrasound, which used independently, are not accurate enough to estimate compressive strength. An international practice is to use both types of tests, non-destructive and destructive, by making regression equations to estimate the compressive strength from the former. In Cuba, this procedure is regulated by the NC 1109 standard, which has its own regression equation. However, the authors of this article show that this equation is not sufficiently exact and that there are others that are more suited to the conditions of the country. Precisely, the article compares the behavior of the equation regulated in NC 1109 of 2015, with the general equation of the combined SONREB method applied in other countries, as a result of which a new regression equation is obtained from the data analyzed.

Keywords: regression equation, concrete, compressive strength.

Nota Editorial: Recibido: agosto 2021; Aceptado: septiembre 2021

1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la resistencia a compresión del hormigón es de vital importancia en la estimación de las propiedades del hormigón endurecido y en el control de la calidad de las obras. Es la propiedad más generalizada en la práctica nacional e internacional para evaluar el comportamiento mecánico del hormigón, no teniendo dificultades su determinación en los casos del hormigonado in situ, en que basta con elaborar probetas antes del vertido del hormigón y someterlas al ensayo correspondiente a la edad indicada. Pero cuando se requiere conocer esta propiedad en obras que se encuentren en etapa avanzada de ejecución y en las cuales los resultados de los ensayos de compresión de las probetas hayan sido desfavorables, en obras que se encuentren en proceso de rehabilitación o cambios de uso, en estructuras que hayan sufrido accidentes y que demanden acciones de reconstrucción y en obras en explotación que hayan tenido incrementos en las cargas de uso, su determinación encierra diversas dificultades. Ya no se trata de determinar la resistencia del hormigón a partir de la aplicación de carga sobre probetas elaboradas en el momento del vertido, sino, de conocer la resistencia de este material directamente en las estructuras. Entre estas dificultades se encuentra muchas veces la imposibilidad de extraer testigos en los elementos objeto de estudio, el elevado costo de la operación de extracción de testigos y lo dificultoso que resulta la humanización de este trabajo en determinados elementos estructurales.

A finales del siglo pasado surgieron en Europa del Este métodos dirigidos a contrarrestar estas dificultades aprovechando la posibilidad de combinar los ensayos de resistencia con los resultados de ensayos no destructivos. Se pudo comprobar que combinando el resultado de los ensayos destructivos realizados en testigos extraídos de las estructuras con los resultados de ensayos no destructivos, en particular, de la velocidad del pulso ultrasónico y del índice esclerométrico, se puede establecer una correlación multivariable para estimar la resistencia a compresión aumentando la confiabilidad de la misma. Entre estos métodos destaca a nivel internacional el conocido como método SONREB [1,2,3,4,5,6], en el que se establece una ecuación general que correlaciona resistencia a compresión del hormigón con velocidad del pulso ultrasónico y el conocido índice de rebote esclerométrico.

En Cuba, la norma NC 1109 del año 2015 [7], establece la estrategia general para la estimación de la resistencia a compresión de los hormigones en las estructuras. Además de regular los procedimientos a seguir en los ensayos, tanto destructivos como no destructivos, plantea una ecuación de regresión que toma como base la extracción de una serie limitada de probetas testigos y donde únicamente se han efectuado mediciones de la velocidad de la onda ultrasónica y del índice esclerométrico. Sin embargo, al evaluar bases de datos existentes, los autores han podido comprobar que los resultados de la ecuación de regresión que plantea la norma cubana no resultan suficientemente exactos.

Teniendo ello en cuenta, en el presente artículo se generalizan los resultados de una investigación en la cual se evalúa la estimación de la resistencia a compresión del hormigón armado, comparando la ecuación de regresión del método SONREB, que combina el empleo de ensayos destructivos a probetas o testigos, con los resultados de los ensayos de velocidad del pulso ultrasónico e índice esclerométrico, y la ecuación refrendada por la norma cubana NC 1109, admitiendo además la posibilidad de un comportamiento lineal de la regresión.

2. DESARROLLO

En Cuba, la resistencia a compresión del hormigón se determina según las regulaciones de la norma cubana NC 244, tomando como elemento la resistencia media a compresión obtenida como resultados de ensayos destructivos sobre probetas cilíndricas después de un tratamiento estadístico. Está demostrado que el comportamiento de la resistencia a compresión de una serie de probetas se corresponde aproximadamente con una distribución normal, y basado en esta hipótesis, se puede determinar la resistencia característica a compresión del hormigón. Precisamente es este último parámetro, determinado a la edad de 28 días, la base del diseño de las estructuras de hormigón.

El concepto de resistencia característica a compresión del hormigón admite una determinada probabilidad de que en un análisis estadístico se puedan obtener magnitudes inferiores a dicho valor. En una distribución normal, la

resistencia característica es menor que la resistencia media obtenida producto de la rotura de las probetas, diferencia que depende de la desviación típica o estándar del lote de hormigón.

El procedimiento para la obtención de la resistencia característica a compresión del hormigón, regulado por la norma cubana NC 192, no es difícil cuando se trata de probetas confeccionadas en la etapa de transporte y vertido del hormigón en las estructuras, en que se aprovecha la toma de muestra aleatoria del hormigón fresco desde los medios de transporte, inmediatamente antes de su vertido. Pero el proceder se complica cuando se trata de conocer la resistencia característica a compresión del hormigón en estructuras ya construidas y que no cuenten con este parámetro en base de datos, como es el caso de los procesos de rehabilitación de obras, cuando se varíe el uso inicialmente concebido en las edificaciones, en estructuras que hayan sufrido accidentes o deterioros y que demanden acciones de reconstrucción, y en obras en explotación que hayan tenido incrementos en las cargas. Si no se cuenta con la resistencia a compresión como dato, se hace necesario extraer testigos de diferentes partes puntuales de la estructura, y mediante los procedimientos establecidos, determinar esta propiedad [8]. Pero este proceder es destructivo, lo que puede afectar mecánicamente la estructura, además de que no siempre, por la ubicación de la misma, es factible realizarlo.

Este es uno de los motivos por el cual desde finales del pasado siglo, con el desarrollo de la esclerometría y el ultrasonido aplicado a las estructuras de hormigón, se comienzan a desarrollar métodos combinados para determinar la resistencia del hormigón [9,10,11], no siendo necesario en todos los casos proceder con la extracción de testigos. Internacionalmente se emplean diferentes proceder para estimar de forma combinada la resistencia a compresión [12,13], pero sin dudas, uno de los más generalizados internacionalmente es el método SONREB [1,2,4,6] que combina los resultados de la medición de la velocidad de pulso ultrasónico y el índice esclerométrico para obtener la resistencia a compresión del hormigón. En Cuba, este proceder se regula mediante la norma cubana NC 1109 [7]. La mayoría de los métodos, incluida la norma cubana, se basan en el empleo de ecuaciones de regresión obtenidas experimentalmente, lo que permite ajustar los coeficientes en las mismas.

Para la realización del análisis de regresión, es necesario tener resultados de la resistencia a compresión de testigos extraídos de las estructuras. Mientras mayor cantidad de testigos extraídos, por supuesto que mayor exactitud tendrá la regresión. Pero esto es un problema, porque siempre se afecta mecánicamente la estructura. Por eso es que los diferentes procedimientos regulan la cantidad de testigos a extraer para determinar esta propiedad y realizar el ajuste de la misma [14].

Los otros dos parámetros considerados en los métodos combinados son el índice esclerométrico y la velocidad del pulso ultrasónico.

La determinación del índice esclerométrico en la evaluación de elementos de hormigón apareció en 1948 [15,16], en que se introdujo el dispositivo de impacto de resorte por el principio de rebote superficial sobre el hormigón, una foto del cual puede ser apreciada en la figura 1. Desde la introducción del ensayo se han llevado a cabo investigaciones para explicar la interacción del martillo con el hormigón [17,18] y se ha comprobado que se puede utilizar para evaluar la uniformidad de la dureza superficial del hormigón y además comparar la calidad de los hormigones. Pero no debe utilizarse independientemente para la aceptación o rechazo directo del hormigón debido a la incertidumbre inherente en la estimación de la resistencia del mismo.



FIGURA 1: ESCLERÓMETRO O MARTILLO DE REBOTE [19]

Las primeras experiencias de empleo de la velocidad de una onda ultrasónica para definir propiedades de un material datan de 1929 [15], utilizada para la detección de defectos en metales. En la década de 1940, el método

de ensayo de la velocidad del pulso ultrasónico se desarrolló simultáneamente en Canadá e Inglaterra sobre la base de la propagación de la onda mecánica a través del hormigón. El método de ensayo mide el tiempo requerido para que una onda recorra una distancia particular a partir de lo cual se mide la velocidad [20,21,22,23], pudiendo evaluar la presencia de grietas o discontinuidades en el hormigón y los cambios en la uniformidad de la masa. En la figura 2 se puede apreciar el principio de trabajo y foto del equipo de pulsos ultrasónicos. Al igual que ocurre con el índice esclerométrico, de forma independiente, el método no siempre es recomendado para estimar la resistencia del hormigón debido a la falta de homogeneidad, la variabilidad del material y los factores que afectan la velocidad del pulso.

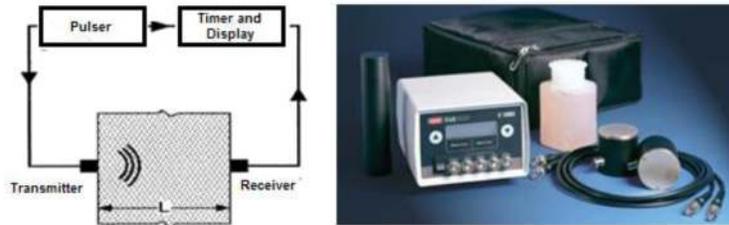


FIGURA 2: FOTO Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL EMISOR DE PULSOS [19]

Precisamente, la determinación de la resistencia a compresión del hormigón, combinando los resultados de la rotura de un número limitado de testigos con los dos ensayos no destructivos (ultrasonido y esclerometría), permite compensar las incertidumbres existentes cuando se utilizan los dos últimos métodos de manera independiente.

El método SONRED es el más diversificado y utilizado en Europa entre los métodos combinados. En relación con este método la comunidad internacional reconoce principalmente cuatro procederes con igual número de ecuaciones de regresión para determinar la resistencia a compresión [4]. Estas son la expresión de Di Leo-Pascale, los resultados de las investigaciones de Gasparik, la propuesta por Del Monte y colaboradores, y la conocida como norma RILEM.

Sin embargo, independientemente de estas anteriores expresiones, el método SONREB, según Cristofaro y Tanganelli [6], permite obtener un mayor nivel de conocimiento y una mayor precisión en la estimación de la resistencia a la compresión del hormigón, si la relación está calibrada en cada caso individual. Con este basamento surge entonces la denominada “expresión general del SONREB”, que se muestra en la fórmula 1.

$$f_c = \beta_0 \cdot S^{\beta_1} \cdot V^{\beta_2} \quad , \text{ MPa} \quad (1)$$

Donde:

f_c : Resistencia a compresión, MPa.

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$: Parámetros determinados mediante regresión múltiple.

S : Índice esclerométrico o de rebote, MPa.

V : Velocidad del pulso ultrasónico, m/s.

A partir de la expresión general del SONREB se ha graficado el ábaco representado en la figura 3, en que, con los resultados de los ensayos de esclerometría y ultrasonido, puede ser estimada la resistencia a compresión del hormigón.

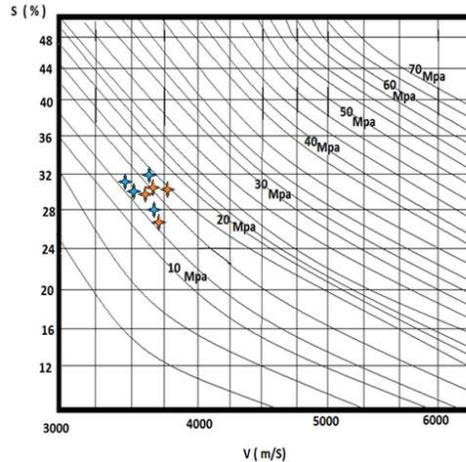


FIGURA 3: ÁBACO PARA CALCULAR LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN SEGÚN SONREB [3]

Ninguna de estas expresiones reconocidas por la comunidad internacional, han sido evaluadas hasta ahora en Cuba. En nuestro país, el método combinado regulado por la norma cubana NC 1109 [7] para la estimación de la resistencia a compresión en las estructuras, se basa en el empleo otra expresión, en este caso la que aparece en la fórmula 2.

$$f_c = \beta_0 + \beta_1 + S + (\beta_2 \cdot V^4) \quad , \text{MPa} \quad (2)$$

En el desarrollo de la investigación, al evaluar bases de datos existentes con el objetivo de comprobar la efectividad de la expresión recogida en la normativa cubana, los autores han podido comprobar que los resultados de dicha ecuación de regresión no resultan suficientemente exactos. Los valores obtenidos con su empleo, difieren significativamente de los obtenidos de manera experimental. Esta incongruencia llevó a los autores a comprobar el comportamiento de otras alternativas de regresión.

Para dar continuidad a la investigación se pudo acceder a bases de datos del Departamento de Patología de la ENIA INVESCON Habana. La revisión detallada de los archivos existentes en esta empresa, constata la existencia de cinco obras con información completa adecuada para la realización de un análisis de regresión que posibilitara evaluar el mejor comportamiento de la estimación de la resistencia a compresión en las condiciones de Cuba.

En cada uno de los cinco casos se compiló una base de datos con la siguiente estructura:

- Resultados de ensayos de esclerometría realizados en el elemento, con los valores del índice de rebote (S) de cada uno y promedio.
- Resultados de ensayos de ultrasonido realizados en el elemento, con los valores de velocidad de pulso ultrasónico (V).
- Resultados de los ensayos de compresión corregida a los testigos, ($f_{c\text{testigo corregida}}$), junto a los resultados de los ensayos de esclerometría y ultrasonido realizados a cada testigo.

En las tablas 1, 2 y 3, a modo de ejemplo, se recogen los resultados obtenidos en estos parámetros en uno de los cinco casos de estudio con información completa, correspondiente a la cimentación de un edificio biplanta, al que se decidió dar continuidad en octubre de 2018 luego de seis años de paralizada la obra.

TABLA 1: LECTURAS DE ÍNDICE DE REBOTE EN LA CIMENTACIÓN DE EDIFICIO BIPLANTA

Zona	Lecturas de índice de rebote, MPa															Promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	30	32	32	34	32	34	36	36	32	32	32	36	36	34	32	33,3
2	32	32	32	30	30	34	34	36	34	34	32	32	32	34	34	32,8
3	34	32	32	32	34	34	36	32	34	32	32	34	34	34	32	33,2
4	26	22	24	26	24	24	22	22	24	26	22	24	24	24	26	24,0
5	32	34	32	32	30	30	32	32	34	34	34	30	32	36	34	32,5
6	24	22	26	26	28	26	26	24	26	24	26	26	28	28	26	25,7
7	24	22	24	26	22	24	24	24	22	26	24	24	22	24	24	23,7
8	32	24	34	32	32	34	32	32	34	34	36	36	34	32	32	32,7
9	28	30	30	32	30	32	34	34	32	30	30	30	28	32	32	30,9
10	28	30	28	28	30	32	28	30	28	30	30	30	32	32	32	29,9

TABLA 2: LECTURAS DE VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN LA CIMENTACIÓN DE EDIFICIO BIPLANTA

Zona	Distancia, cm	Tiempo, μ s	Velocidad, m/s
1	10,2	25,4	4013
2	9,7	22,3	4350
3	11,3	26,4	4253
4	10,5	28,6	3671
5	11,0	24,8	4496
6	10,4	25,9	4015
7	9,9	25,5	3882
8	11,1	24,7	4494
9	9,7	22,3	4350
10	9,0	20,8	4327

TABLA 3: RESULTADOS DE ENSAYOS A LOS TESTIGOS EN LA CIMENTACIÓN DE EDIFICIO BIPLANTA

Zona	$f_{ctest,corr}$, MPa	IR, MPa	VPU, m/s
1	18,24	33,33	4013
2	-	32,80	4350
3	21,26	33,20	4253
4	14,49	24,00	3671
5	21,74	32,50	4496
6	7,74	25,70	4015
7	10,52	23,70	3882
8	11,65	33,30	4494
9	12,14	30,90	4350
10	15,86	29,80	4327

La base de datos se confeccionó de igual manera para cada uno de las restantes cuatro obras o casos de estudio, logrando sintetizar un juego de 27 datos válidos en los que se correlacionan los valores de resistencia a compresión de los testigos extraídos con los resultados de mediciones del índice de rebote y velocidad del pulso ultrasónico.

La cantidad de juegos de datos seleccionada, aunque no numerosa, sí permite efectuar una adecuada evaluación del comportamiento de los tres parámetros objeto de estudio mediante análisis de regresión. En el mismo se evaluaron tres alternativas: un comportamiento lineal; la ecuación establecida en la norma cubana NC 1109; y la expresión general del método SONREB.

3. RESULTADOS

Con los 27 juegos de datos experimentales disponibles, se realizaron los correspondientes análisis de regresión para determinar los coeficientes propios de cada proceso, empleando el programa Statgraphics.

Ya anteriormente, en las fórmulas 1 y 2 se recogen respectivamente la expresión general del método SONREB [3] y la expresión obtenida mediante análisis de regresión que recoge la norma cubana NC 1109 [7]. La tercera expresión a evaluar, con comportamiento lineal, se corresponde entonces con la fórmula 3.

$$f_c = \beta_0 + (\beta_1 \cdot S) + (\beta_2 \cdot V) \quad , \text{MPa} \quad (3)$$

Recordando que en estas expresiones:

f_c : Resistencia a compresión estimada del hormigón, MPa.

S : Índice esclerométrico o de rebote, MPa.

V : Velocidad del pulso ultrasónico, m/s.

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$: Parámetros determinados mediante un modelo general de regresión múltiple.

Las corridas con el programa Statgraphics permitieron obtener los coeficientes β_0, β_1 y β_2 propios de cada expresión. En la ecuación de regresión lineal los coeficientes se expresan según la fórmula 4; por la expresión general del SONREB según la fórmula 5; y por la norma cubana según la fórmula 6.

$$f_c = -24,3667 + (1,61975 S) - (0,00238382 V) \quad , \text{MPa} \quad (4)$$

$$f_c = 0,027991747 \cdot S^{2,38037} \cdot V^{0,221664} \quad , \text{MPa} \quad (5)$$

$$f_c = -27,4763 + 1,58525 S - 0,0184173 V^4 \quad , \text{MPa} \quad (6)$$

Mediante el correspondiente procesamiento estadístico de estos resultados con el Statgraphics, en la tabla 4 se muestran los R-cuadrado y errores estándar de cada una de las tres ecuaciones.

TABLA 4: RESULTADOS DEL PROCESAMIENTO ESTADÍSTICO DE LAS TRES ECUACIONES DE REGRESIÓN

Ecuación	R-cuadrado	Error estándar
Regresión lineal	72,14%	5,97586
Norma cubana NC 1109	73,14%	5,86704
SONREB	72,85%	0,10491

Puede apreciarse en la tabla 4 que la ecuación general del SONREB, con los coeficientes obtenidos por análisis de regresión según la fórmula 5, tiene un mejor comportamiento debido a que el error estándar obtenido es considerablemente menor que el de las otras dos ecuaciones. En el caso de la regresión lineal y de la expresión refrendada por la norma cubana, el error estándar, además de elevado, resulta muy similar en ambas ecuaciones de regresión.

Pero un análisis riguroso requiere de técnicas estadísticas mediante prueba de hipótesis, bajo las condiciones de hipótesis nula y alternativa siguientes:

✓ $H_0 : \mu_4 = \mu_5 = \mu_6$

✓ $H_1 : \text{No todos los modelos son iguales}$

Empleando el programa Statgraphics se introducen los datos de los residuos obtenidos en cada uno de los juegos de datos con las tres expresiones, y se realiza la comparación de los residuos medios mediante la técnica de la prueba de múltiples rangos, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 5.

TABLA 5: RESULTADOS DE LA PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS PARA UN 95% DE CONFIABILIDAD

Expresiones	Juegos de datos	Residuo medio	Grupos homogéneos
Regresión lineal	27	9,76432	X
SONREB	27	2,68475	X
Norma cubana NC 1109	27	8,54912	X

Con todos los grupos homogéneos en la tabla 5 para un nivel de confiabilidad del 90%, se concluye que teniendo además un valor residual menor, la ecuación general del SONREB (ecuación 5) resultado del análisis de regresión se ajusta mejor que las otras dos (ecuaciones 4 y 6).

De ello se infiere que, con la base de datos experimentada representativa de casos reales existentes en los archivos de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, resulta más exacto al estimar la resistencia a compresión del hormigón en base a los resultados de los ensayos de esclerometría y velocidad del pulso ultrasónico, emplear la expresión general del método SONREB [3], generalizada en los países europeos en lugar de la expresión propuesta por la norma cubana NC 1109 [7], rechazando también el comportamiento lineal.

Con la expresión general del método SONREB [3] y los coeficientes obtenidos mediante análisis de regresión, si se despeja el índice de rebote en función de la resistencia a compresión estimada y la velocidad del pulso ultrasónico, se obtiene la fórmula 7, que posibilita construir el ábaco mostrado en la figura 4, y determinar rápidamente la resistencia a compresión a partir de los resultados de los ensayos no destructivos de esclerometría y ultrasonido.

$$IR = \left[\frac{f_{cestim}}{(0,027991747 \cdot VPU^{-0,221664})} \right]^{2,38037}, \text{ MPa} \quad (7)$$

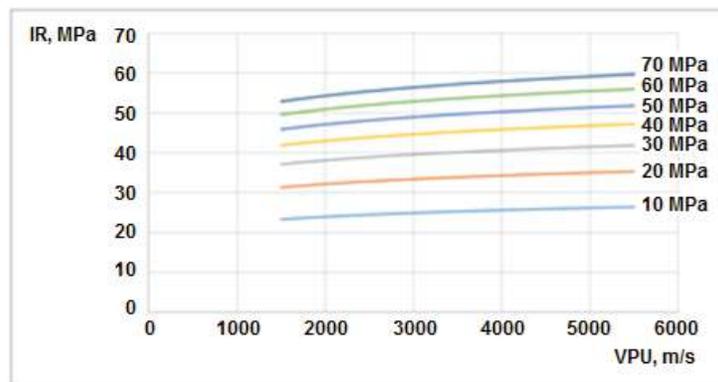


FIGURA 4: ÁBACO PARA ESTIMAR LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN A PARTIR DE LOS ENSAYOS DE ESCLEROMETRÍA Y ULTRASONIDO

La base de datos utilizada, independientemente de no ser amplia, ha permitido entonces sintetizar una ecuación de regresión que posibilita estimar la resistencia a compresión a partir de los resultados de los ensayos no destructivos de esclerometría y ultrasonido. Esta base de datos tiene que ser ampliada, por lo que se propuso a la ENIA INVESCON Habana habilitar un procedimiento normativo que posibilite que siempre que se rompan testigos para determinar resistencia a compresión, simultáneamente se hagan los ensayos no destructivos y se recojan los tres resultados: resistencia a compresión, índice de rebote y velocidad del pulso ultrasónico.

Ello permitirá en un plazo aproximado de dos años, aplicar el procedimiento recogido en esta investigación y entonces obtener, con un grado de confiabilidad mucho más elevado, una nueva ecuación de regresión que caracterice en Cuba la estimación de la resistencia a compresión de una estructura en base a los ensayos no destructivos de ultrasonido y esclerometría.

4. CONCLUSIONES

Entre los métodos combinados para estimar la resistencia a compresión del hormigón en las estructuras, a nivel internacional, se utiliza mayoritariamente el método SONREB, que plantea una ecuación diferente a la que recoge la norma cubana NC 1109, actualmente vigente en Cuba y en la que los resultados teóricos difieren significativamente de los resultados experimentales. Ello motivó efectuar un análisis de regresión que incluyó la expresión general del método SONREB, una expresión lineal y la expresión recogida en la normativa cubana.

Sin ser amplia la base de datos experimental, de los tres análisis de regresión realizados, la ecuación general del SONREB muestra un mejor comportamiento, con error estándar considerablemente menor que el obtenido mediante la ecuación de regresión lineal y la planteada en la norma cubana NC 1109.

Si la ENIA INVESCON Habana, como se propuso, instituye siempre en el procedimiento de ensayos de testigos de hormigón la realización y registro ordenado de ensayos de velocidad de pulso ultrasónico y esclerometría, en un plazo mínimo de dos años se puede contar con una base de datos más amplia que permita, aplicando el procedimiento descrito en esta investigación, sintetizar una ecuación mucho más confiable para la estimación de la resistencia a compresión del hormigón en las estructuras.

Se debe analizar entonces, y así se ha propuesto, la conveniencia de sustituir la ecuación de regresión que aparece en la norma cubana NC 1109, por la fórmula general del SONREB con los coeficientes de regresión obtenidos en la investigación.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Cristofaro, D. Stefano, R. Nudo, M. Tanganelli y A. D'Ambrisi, "Caracterización mecánica del hormigón: El caso de un edificio escolar ubicado en Toscana", *Revista Integridad Estructural de Procedia*, Vol. 11, pp. 234-241, 2018.
- [2] J. Cuetara, "Inspección de una losa de 80 años de una edificación en la Habana Vieja: Estimación de la resistencia a compresión a partir del método SONREB", presentado en la 19 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, La Habana, Cuba, noviembre de 2018.
- [3] M. Lenzi, D. Versari y R. Zambrini, *Indagine Sperimentale di Calibrazione del Metodo Combinato SonReb*. Bologna, Italia: R&S Corso ACMAR, 2018.
- [4] N. Chandak y H. Kumavat, "SONREB method for evaluation of compressive strength of concrete", presented at the ICEMEN-2019, Mumbai, India, 2019.
- [5] C. Porras, M. Balbuena y R. Puig, "Casos de estimación de la resistencia a compresión del hormigón armado validando ecuaciones de regresión que combinan el empleo de ensayos no destructivos con ensayos destructivos en Cuba", *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, Vol. 13, No. 1, 2019.
- [6] M. Cristofaro y M. Tanganelli, "New predictive models to evaluate concrete compressive strength using the SONREB method", *Journal of Building Engineering*, Vol. 27, 100962, 2020.
- [7] NC 1109, "Estimación de la resistencia a compresión de los hormigones en las estructuras", ed. La Habana, Cuba: Cuban National Bureau of Standards, 2015.
- [8] L. Rojas, "Ensayos de información y extracción de probetas testigo en hormigones autocompactantes", Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Civil-Construcciones, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, España, 2012, recuperado de: <http://oa.upm.es.lina.ma>.
- [9] G. Ercolani, N. Ortega y L. Señas, "Empleo de ultrasonidos y esclerometría en el diagnóstico de estructuras de hormigón afectadas por elevadas temperaturas, presentado en la IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, Argentina, Octubre 2007.
- [10] R. Cruz, L. Quintero, C. Galán y E. Espinosa, "Evaluación de técnicas no destructivas en elementos de concreto para puentes", *Revista Facultad de Ingeniería*, Vol. 24, No. 40, pp. 81-94, 2015.
- [11] Y. Socarrás, L. González, E. Álvarez, M. González y E. Roca, "Evaluación de la calidad del hormigón en edificaciones construidas con el sistema prefabricado gran panel soviético", *Revista Tecnologías Químicas*,

- Vol. 40, No. 2, pp. 288-302, 2020.
- [12] C. Won-Chang, M. Picornell y S. Hamoush, "Performance of 90-year-old concrete in a historical structure", *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 105, pp. 595-602, 2016.
- [13] A. Lorenzi, L. Reginato, L. Lorenzi y L. Silva, "Emprego de ensaios não destrutivos para inspeção de estruturas de concreto", *Revista IMED*, Vol. 3, No. 3, pp. 3-13, 2016.
- [14] A. Fernández y J. Howland, "Evaluación de métodos para estimar la resistencia característica a compresión del hormigón en estructuras existentes a partir de la extracción y ensayo de testigos", *Revista Hormigón y Acero*, Vol. 70, No. 287, pp. 55-65, 2018.
- [15] S. Sourav, S. Al-Sabah y C. McNally, "Strength assessment of in-situ concrete for the evaluation of structural capacity: State of the art, presented at the Civil Engineering Research in Ireland Conference (CERI 2016), Galway, Ireland, 29-30 August 2016.
- [16] J. Hernández, A. Orozco, D. Almanza y J. Montoya, "Correlation between compressive strength of concrete Cylinders and rebounding with digital sclerometer", *Revista Ingieneare*, Vol. 13, No. 22, pp. 59-68, 2017.
- [17] K. Szilágyi, A. Borosnyoi e I. Zsigovics, "Understanding the rebound surface hardness of concrete", *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 21, No. 2, pp. 185-192, 2015.
- [18] J. Hernández, A. Orozco, D. Almanza y J. Ramírez, "Relación entre resistencia a compresión en cilindros de concreto y los rebotes con esclerómetro digital", *Revista Ingieneare*, No. 22, pp. 59-67, 2017.
- [19] Controls SA, Equipos de ensayo para la industria de la construcción, Catálogo general, 19th. Edition. Toledo, España: Controls Copyright, 2020.
- [20] J. Cruz, L. Martínez, A. López, J. Lakat y C. Ceballos, "Relación entre los ensayos ultrasónicos y convencional para determinar la resistencia simple a la compresión", *Revista INGE CUC*, Vol. 12, No. 1, pp. 94-98, 2016.
- [21] A. Lorenzi, J. Chies, D. Adamatti y L. Silva, "Evaluación de la capacidad de detección de fallas en el concreto a través del ensayo ultrasónico", *Revista ALCONPAT*, Vol. 7, No. 3, pp. 286-301, 2017.
- [22] M. Silva, J. Rocha, E. Monteiro, Y. Póvoas y E. Kohlman, "Evaluación del ensayo de ultrasonido para la estimación de la profundidad de fisuras en concreto", *Revista ALCOMPAC*, Vol. 9, No. 1, pp. 79-92, 2019.
- [23] W. Mejía, J. Orozco y A. Rojas, "Diagnóstico de estructuras de hormigón empleando ultrasonido", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, Vol. 1, No. 35, pp. 38-43, 2020.
- 