

PROCEDIMIENTOS PARA PRONOSTICAR LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A 28 DÍAS DESDE LAS EDADES TEMPRANAS

Iatny de la Roz Martínez¹, René A. Puig Martínez², Félix M. Martínez López²

¹Ingeniera Constructor Geodesta. Profesora asistente. Institución Docente de Nivel Superior de las FAR "General Antonio Maceo", Artemisa, Cuba, delarozmartineziatny@gmail.com

²Doctor en Ciencias Técnicas. Ingeniero Constructor. Profesor Titular. Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana, Cuba, rpuiq@civil.cujae.edu.cu

³ Doctor en Ciencias Técnicas. Ingeniero Civil. Profesor Titular. Institución Docente de Nivel Superior de las FAR "General Antonio Maceo", Artemisa, Cuba, fmanolo@nauta.cu

RESUMEN

Durante los últimos años en Cuba se utilizan diferentes tecnologías de construcción hormigonadas in situ, como son las empleadas en los edificios de viviendas del sistema de formaletas FORSA y otras obras dedicadas al turismo. Como tecnologías modernas de construcción, se desencofran en plazos menores que los propios de las tecnologías convencionales y los ritmos de avances no permiten esperar los 28 días para conocer la resistencia a compresión que tendrá el hormigón, siendo necesario predecir la misma a partir de la obtenida a edades tempranas. Aunque a nivel mundial se reconocen procedimientos para pronosticarla, son variados los factores influyentes, siendo necesario constatar los propios para cada región o país. Este artículo tiene como objetivo evaluar los principales procedimientos recogidos en la literatura internacional y nacional para inferir la resistencia a compresión del hormigón a edades tardías, a partir de la resistencia de dicho material a edades tempranas, lo que sirve de basamento teórico para la investigación. De la evaluación de los procedimientos existentes se llega a la conclusión de que en Cuba no se utiliza un método propio para pronosticar la resistencia a compresión a los 28 días, sino que se emplean relaciones en por ciento con respecto a esta edad, asumido en otras regiones.

Palabras claves: hormigón, probetas, resistencia a compresión.

PROCEDURES TO PREDICTION THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE TO 28 DAYS STARTING FROM THE EARLY AGE

ABSTRACT

During the last years in Cuba, different concrete construction technologies have been used in situ, such as those used in the residential buildings of the FORSA form system and other tourism works. As modern construction technologies, they are disengaged in shorter terms than those of conventional technologies and the rates of progress do not allow waiting 28 days to know the compressive strength that concrete will have, being necessary to predict the same from that obtained at early ages. Although procedures for forecasting it are recognized worldwide, the influential factors are varied, and it is necessary to verify their own for each region or country. This article aims to evaluate the main procedures included in international and national literature to infer the compressive strength of concrete at a later age, based on the resistance of said material at an early age, which serves as a theoretical basis for research. From the evaluation of the existing procedures, it is concluded that in Cuba a proprietary method is not used to predict the compressive strength after 28 days, but that percentages are used in relation to this age, assumed in other regions.

Keywords: concrete, compressive strength, specimens.

Nota Editorial: Recibido: enero 2020; Aceptado: abril 2020

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material heterogéneo en que sus componentes tienen características que no son constantes. No solo son los materiales los causantes de las variaciones en la calidad del hormigón, también influyen las formas de mezclarlo, su transporte, su colocación, la compactación y el curado que se le

proporcione. Por las razones anteriores, es necesario tomar precauciones para que la calidad del material resultante sea la mejor. Uno de los criterios que definen dicha calidad, son aquellos que resultan de los ensayos de resistencia a compresión.

La resistencia del hormigón aumenta con la edad, incremento que se produce rápido durante los primeros días posteriores al inicio de la hidratación y va siendo más lenta al transcurrir el tiempo, aunque 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 normalizados, se emplea como índice de calidad del mismo [1].

En el país está establecido por la norma cubana NC 120 [2] determinar la resistencia a compresión del hormigón a la edad de 28 días en ensayos de probetas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. Sin embargo, salvo que se logre algún acuerdo con los usuarios, no es posible predecir la posible resistencia a esta edad a partir de la obtenida en edades tempranas, empleando en esos casos correlaciones porcentuales entre las diferentes edades [3,4].

En los últimos años se vienen desarrollando en Cuba modernas tecnologías de construcción hormigonadas in situ en las que se necesita conocer en un tiempo breve el estado de la estructura con la mayor seguridad posible. En estas construcciones, los tiempos a los cuales se solicita realizar los ensayos son generalmente a los tres y a los siete días. Ello tiene por objeto estimar y, a la vez, verificar, si el hormigón que se diseña cumple o no con la resistencia especificada cuando este tenga una edad de 28 días. Por tanto, conocer con antelación si la estructura puede cumplir la función para la cual ha sido proyectada, depende, en gran medida, de este análisis. Aunque en la literatura internacional [5-15,19,20,34] se reconocen procedimientos para pronosticarla desde las primeras edades, al ser variados los factores influyentes, es necesario constatar los propios de cada región o país, lo que conduce inevitablemente a realizar investigaciones en este campo. En el presente artículo científico se analizan los procedimientos establecidos para ello recogidos en la literatura internacional y nacional.

2. DISCUSIÓN

Se plantea por H. Barrera. V. y. C. P. Figueroa [15] que actualmente la resistencia a compresión del hormigón es la propiedad más buscada en él como material de construcción, ya que es fácil de medir y se relaciona con muchas otras propiedades, independientemente de la importancia que adquiere desde hace ya algunos años la durabilidad. Es por ello que, en variadas fuentes [5-7,16-18,40-46,56,57], tanto nacionales como internacionales, se puede encontrar la interrelación entre esta propiedad y otras que influyen en su determinación a edades tempranas, para así poder estimar la que alcanza a los 28 días.

Toda la literatura consultada coincide en que son disímiles y variados los factores que influyen en el proceso de endurecimiento del hormigón, por lo que resulta muy difícil predecir la resistencia a una edad a partir de la resistencia a edades tempranas y viceversa.

Según exponen diferentes autores [12,19,42,46] el incremento de la resistencia del hormigón es mayor en las primeras edades, haciéndose más lenta con el paso del tiempo hasta que se estabiliza, tomándose como patrón en muchos países del mundo, incluida Cuba, la resistencia que alcanza a los 28 días, pues a esta edad se ha adquirido gran parte de la misma. En la figura 1 se observa el aumento gradual de la resistencia que tiene el hormigón a medida que aumenta el tiempo según M. A. M. González [20].

Aunque la respuesta real del hormigón al esfuerzo aplicado es un resultado de complejas interacciones entre varios factores, para simplificar y entender estos se les puede analizar separadamente bajo tres categorías [11]: las características y proporciones de los materiales, las condiciones de curado y los parámetros de prueba (ensayos).

Dentro de las características y proporciones de los materiales se coincide en que para obtener un hormigón que cumpla con la resistencia especificada, la selección de los materiales constituyentes adecuados y la determinación de sus proporciones resultan primordial.

En la práctica, muchos de estos parámetros del diseño de la mezcla son interdependientes, por lo que sus influencias no pueden ser separadas en la realidad. Entre ellos se reconocen como más importantes por los especialistas la relación agua/cemento, el tipo de cemento, los áridos y el agua de mezclado.

Pedro Jiménez Montoya [3] expone, que a pesar de que la relación agua/cemento es un factor muy influyente en la resistencia a compresión, no pueden darse valores fijos que relacionen ambas magnitudes, por depender además de muchos otros factores, por lo que se plantean valores máximos y mínimos que no deben sobrepasarse.

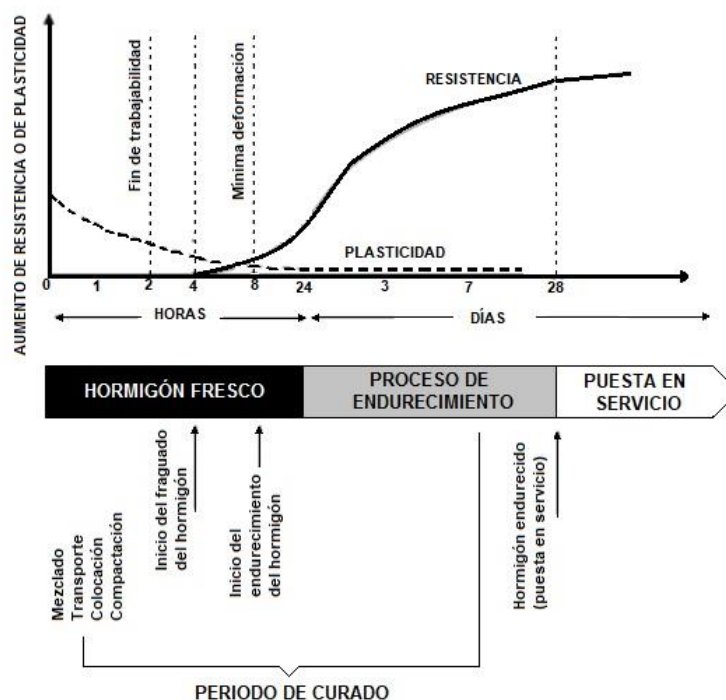


Figura 1: Etapas de transición del hormigón fresco a hormigón endurecido [20]

M. Piñeiro [12] recoge expresiones que trabajan también con la relación agua/cemento, empleando coeficientes que dependen de diversos factores, como el tipo de cemento, lo que resulta un inconveniente pues no se indican en ellas las dispersiones de los resultados que las generaron.

En 1918, como resultado de varios ensayos en el Instituto Lewis, de la Universidad de Illinois, en los Estados Unidos, Duff Abrams [13] encontró que existía una correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia del hormigón. Conocida popularmente como la regla de la relación agua/cemento de Abrams, esta dependencia inversa se representa por la expresión 1:

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad , \text{ MPa} \quad (1)$$

Donde:

f_c : resistencia a compresión del hormigón, MPa
 a/c : relación agua/cemento de la mezcla de hormigón
 k_1 y k_2 : constantes empíricas que dependen de la calidad del cemento, edad del hormigón, tipo de agregado y sistema de curado

Otra expresión que analiza el vínculo entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del hormigón es la que plantea el ingeniero Bolomey [13] (fórmula 2):

$$f_c = A \cdot \left(\frac{c}{a} - m \right) \quad (2)$$

Donde:

f_c : resistencia a compresión del hormigón, MPa
 A : coeficiente que depende de la calidad del cemento y la edad del hormigón
 c/a : relación entre cemento y agua, en peso
 m : valor que para el caso de los 28 días es 0,5.

Marcelo Romo Proaño [21] hace referencia a otras de las formas para estimar la relación entre estos factores, establecida por A.M. Neville [21], lo que se analiza a través de una curva de resistencia media del hormigón, como función de la relación agua/cemento, recogida en la figura 2.

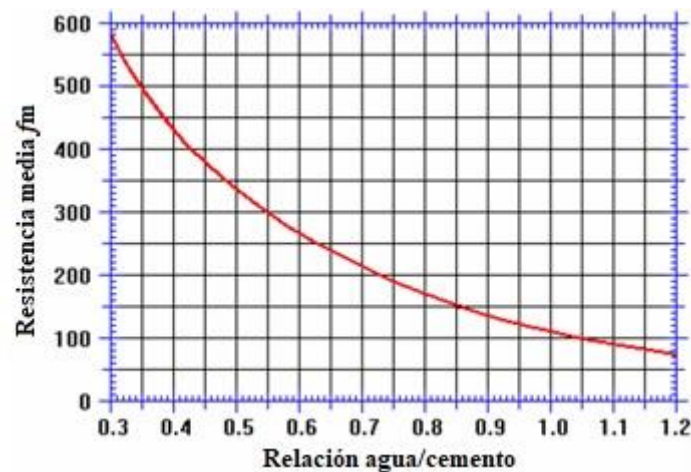


Figura 2: Curva de la resistencia media del hormigón como función de la relación agua/cemento [21]

En la figura 3 se puede apreciar la influencia de la relación agua/cemento, en la resistencia a compresión de las probetas de hormigón, observándose como para altas relaciones agua/cemento, con valores cercanos a la unidad, las resistencias bajan hasta tender a cero [4].

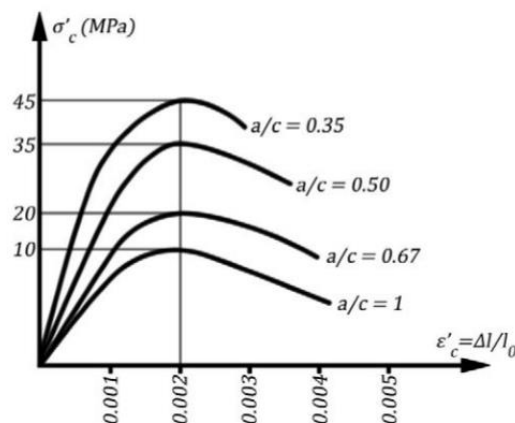


Figura 3: Influencia de la relación agua/cemento en la resistencia a compresión de las probetas de hormigón [4]

Otro científico que obtuvo resultados relevantes en el tema fue Treval Powers [22] quien desarrolló en el año 1958 un modelo físico y una expresión matemática para inferir la resistencia a compresión del hormigón como una función del grado de hidratación del cemento y de la relación agua/cemento. Sus resultados son muy útiles para entender el comportamiento del hormigón en el proceso de hidratación, fraguado y endurecimiento.

Según Powers, la resistencia a compresión del hormigón a una cierta edad puede determinarse por la expresión 3:

$$f_c = K \left[\frac{0,68 \cdot \alpha}{(0,32 \cdot \alpha) + \frac{a}{c}} \right]^{n''}, \text{ MPa} \quad (3)$$

Donde:

- f_c : resistencia a compresión del hormigón, MPa
- K y n : constantes que dependen de los materiales utilizados
- a/c : relación agua/cemento o agua aglomerantes, determinada en peso
- α : grado de hidratación del cemento, en porcentaje

Resulta recurrente en la bibliografía consultada [1,48,49], que las propiedades del cemento son muy influyentes en la futura resistencia a compresión del hormigón, ya que este es el material más activo dentro

de la mezcla. La resistencia que puede alcanzar un determinado cemento depende principalmente de su composición química.

La finura de molido tiene influencia determinante, pues mientras más fino se facilita la hidratación y se alcanzan mayores resistencias, pero se debe tener cuidado, pues mayor finura provoca mayor retracción al endurecer y se libera mayor calor de hidratación, así como tiene mayor velocidad de fraguado.

El efecto del tipo de cemento portland, en la resistencia relativa del hormigón a 1, 7, 28 y 90 días, se muestra en los datos de la tabla 1 la cual fue adoptada en el año 1968 en la oncenava edición de Diseño y Control de Mezclas de Hormigón, de la Asociación del Cemento Portland, en los Estados Unidos de América [11].

Tabla 1: Resistencia relativa aproximada del hormigón afectado por el tipo de cemento [11]

Tipo de cemento portland		Resistencia a la compresión (Por ciento del cemento portland tipo I o normal)			
ASTM	Descripción	1 día	7 días	28 días	90 días
I	Normal o para la construcción en general	100	100	100	100
II	Calor de hidratación moderado y resistencia moderado a los sulfatos	75	85	90	100
III	Alta resistencia inicial	190	120	110	100
IV	Bajo calor de hidratación	55	65	75	100
V	Resistente a los sulfatos	65	75	85	100

Entre las características de los áridos existen dos que son las de mayor influencia en la calidad del hormigón, la granulometría, que tiene en cuenta el tamaño y la distribución de las partículas, así como la naturaleza de las partículas en cuanto a su forma, porosidad y la textura de la superficie [22,24,41].

Los hormigones que tengan áridos angulosos o rugosos son, generalmente, más resistentes que otros que empleen igual relación agua/cemento y que tengan áridos redondeados o lisos; pero, los primeros, exigen mayor cantidad de agua para igual porción de cemento a fin de lograr la misma laborabilidad [1,37,50,56].

Las impurezas en el agua utilizada para mezclar el hormigón, cuando son excesivas, pueden afectar no sólo la resistencia del hormigón, sino también, el tiempo de fraguado, la eflorescencia y la corrosión del acero de refuerzo.

Un elemento fundamental en la tecnología del hormigón es la relación tiempo/resistencia, donde se asumen condiciones de curado húmedo y temperaturas normales. A una relación agua/cemento dada, cuanto más largo sea el período de curado húmedo, mayor será la resistencia [11].

La influencia del curado húmedo en la resistencia del hormigón es obvia [25,39,42,44,51]. Según los datos de la figura 4, después de 180 días a una relación agua/cemento dada, la resistencia del hormigón continuamente curado por humedad, es tres veces mayor que la resistencia del hormigón continuamente curado en el aire [26].

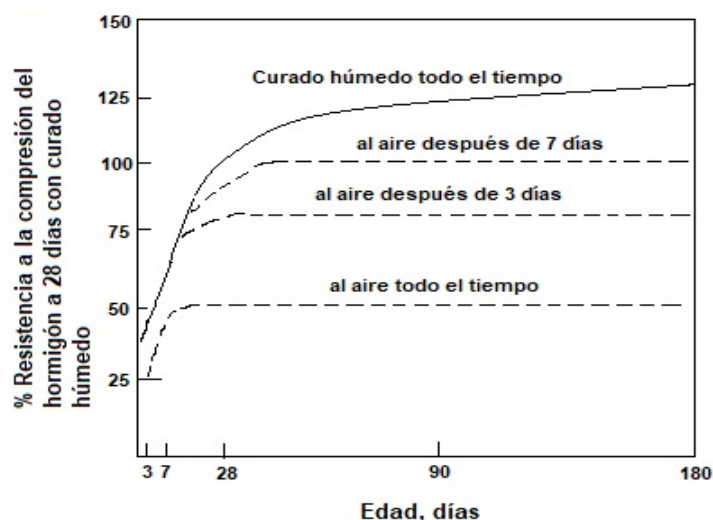


Figura 4: Influencia de las condiciones de curado en la resistencia del hormigón [26]

La influencia de la evolución de la temperatura en el tiempo con respecto a la resistencia del hormigón, tiene varias aplicaciones en la práctica de la construcción con hormigón. Puesto que la temperatura de curado es mucho más importante para la resistencia que la temperatura de colocación, el hormigón ordinario, colocado en clima frío, debe mantenerse por encima de cierta temperatura mínima durante un tiempo suficiente [27,42,46,52].

La exposición al aire del hormigón, debido a la pérdida de humedad, impide la hidratación completa del cemento y, por tanto, la resistencia final disminuye. El hormigón curado en el verano o en un clima tropical puede esperarse que tenga una resistencia temprana mayor, pero una resistencia última menor que el mismo hormigón curado en invierno o en un clima más frío.

Si la temperatura de curado es más alta que la temperatura inicial de moldeo, la resistencia resultante a los 28 días es mayor, y viceversa. En la tabla 2 se puede apreciar cómo van aumentando las resistencias, para diferentes edades, con el aumento de la temperatura.

Tabla 2: Aumento promedio en porcentaje de la resistencia a la compresión con el tiempo y para diferentes temperaturas [1]

Temperatura (°C)	Tiempo (días)				
	3	7	14	21	28
10	25	40	63	76	82
23	34	52	76	91	100
35	40	60	87	102	110

No siempre se aprecia que los resultados de las pruebas de la resistencia del hormigón en el laboratorio, sean afectados significativamente por los parámetros que involucran a las probetas y a las condiciones de carga. Los parámetros de las probetas incluyen la influencia del tamaño, la geometría y el estado de humedad del hormigón; los parámetros de carga incluyen el nivel y la duración del esfuerzo y la velocidad a la cual se aplica el esfuerzo [11,38,39,42,44,47]. La resistencia a compresión de un hormigón, determinada por medio de la rotura de probetas sometidas a una carga axial, puede sufrir alteraciones debido a factores como la velocidad de aplicación de la carga, el efecto probeta/plato, la dureza de los platos, el tamaño y la esbeltez de las probetas e incluso el propio diseño de la máquina [28,47].

El diseño de la dosificación es determinante para las características mecánicas del hormigón. En él, intervienen materiales como el cemento, los áridos, el agua y en la gran mayoría de los casos, no se concibe sin los aditivos [29]. Como factor principal que afecta el diseño parcial de la mezcla se encuentra la relación agua/cemento, debido a que, cuando se realiza la dosificación teórica para determinar esta relación, se tiene presente la agresividad de los agentes medioambientales y la resistencia característica mínima deseada. Al agregar el material pétreo a la mezcla, este puede adicionar o sustraer agua a esta relación, lo que, si no es controlado con las correcciones pertinentes, propicia que el resultado esperado sea distinto al obtenido.

De las propiedades de los materiales constituyentes, así como la correcta relación agua/cemento y la proporción entre los áridos gruesos y los áridos finos, depende el buen diseño de la mezcla de hormigón [30]. La dosificación puede regirse por el método del Instituto Americano del Hormigón o ACI por sus siglas en inglés [32], muy eficiente, que ha alcanzado excelentes resultados en el país con las adecuaciones propias de Cuba [36].

El diseño de las mezclas de hormigón se concibe para un determinado proceso tecnológico, se desarrolla a nivel de laboratorio, ajustándose posteriormente a la escala del proceso productivo, hasta lograr las propiedades especificadas con dispersiones mínimas [33]. La producción de hormigón que se lleva a cabo en plantas, ya sean dosificadoras o dosificadoras mezcladoras, se halla afectada por diversos factores que influyen en la caída de resistencia del hormigón.

A nivel mundial existen plantas de control volumétrico o gravimétrico sobre sus materiales, siendo estas últimas más exactas en sus mediciones. Las plantas dosificadoras gravimétricas presentan la ventaja de controlar la cantidad de materiales empleados por cada amasada de hormigón a través de un sistema computarizado, ya sea de forma manual o automatizada. La principal desventaja de estas plantas, es que el mezclado de los materiales lo realiza el camión hormigonera estacionado en el lugar, provocando una demora en el rendimiento de la producción y una menor calidad del amasado comparado con las plantas dosificadoras mezcladoras, debido a que estas últimas poseen en su estructura un equipo para el amasado.

Entre los factores que más inciden durante el hormigonado en algunas plantas del país, están el incumplimiento de la dosificación de diseño. Esto se debe, fundamentalmente, a que, por indisciplinas de los operarios, no se realiza el ajuste por humedad de los áridos. Dicha situación trae consigo diferentes

fluctuaciones en la relación agua/cemento de la dosificación (aumenta o disminuye) y, por tanto, varían los valores de la resistencia a compresión. También existen imprecisiones durante el control del peso de los materiales, pues, a pesar de presentar las plantas un sistema automático o semiautomático, el mismo está deshabilitado para evitar interrupciones técnicas y, al realizarse de forma manual, conlleva a que se produzcan errores humanos en las mediciones.

Estos elementos que ocurren periódicamente en el proceso de fabricación del hormigón, hacen que la dosificación teórica sea muy distinta en la práctica, afectan la relación agua/cemento e influyen de forma directa en la consistencia y en la caída de resistencia del hormigón. El control de calidad es de obligatorio cumplimiento en el proceso productivo del hormigón, dependiendo de este que la mezcla cumpla con los objetivos para la que fue concebida [34,37-39,48,49,51,52,54,55].

Para gestionar un buen control de calidad debe existir un plan que integre la dosificación de los materiales componentes y la precisión durante el proceso tecnológico del hormigón, al tiempo que evalúe el correcto cumplimiento de estos. En el Reglamento Técnico de la Construcción [34], así como en la norma cubana NC 120 [2], se hace referencia al control de las materias primas, de los diseños de mezclas, del hormigón en estado fresco y endurecido, además del proceso tecnológico.

También es importante mantener el control de la temperatura, tanto la que se mide en la toma de muestra como la que está presente durante el proceso de hormigonado y el curado de las probetas que se ensayan luego a los días planificados [34]. Este último siempre debe cumplirse de forma correcta al emplear el método que se decida en la planta.

Los procedimientos para predecir la resistencia del hormigón a 28 días, a partir de la obtenida en las probetas ensayadas a edades tempranas, es variada a nivel internacional, pues, dependiendo de cada región o país, los criterios asumidos presentan disímiles soluciones. Algunas de estas aparecen expuestas a continuación.

En Cuba, plantea la norma cubana NC 120 [2], que a menos que se especifique otro requisito, la resistencia a compresión se determina sobre probetas ensayadas a 28 días de edad y sólo se podrán utilizar otras edades a efectos del control interno del productor, y no para certificar la calidad de un hormigón. No obstante, a partir de la necesidad, se podrá lograr un acuerdo específico con los usuarios.

En el país no existe un método propio para predecir la resistencia a compresión del hormigón a 28 días a partir de los ensayos de rotura a edades tempranas. Según recogen las normas cubanas y la literatura consultada, y basado en encuestas realizadas a especialistas, se concluye que la relación más utilizada entre las resistencias a edades tempranas y la correspondiente a 28 días, es la que se muestra en la tabla 3.

Tabla 3: Coeficiente de corrección de la resistencia a compresión sobre probetas del mismo tipo a diferentes edades [8]

Edad del hormigón (días)	3	7	28	90	360
Hormigones de endurecimiento normal	0,40	0,65	1,00	1,20	1,35
Hormigones de endurecimiento rápido	0,55	0,75	1,00	1,15	1,20

En el año 2018 J. C. A. Sanchez [23] obtiene un modelo de regresión lineal simple para determinar la resistencia a la compresión en el hormigón. En este trabajo se plantea un método acelerado que permite calcular la resistencia a compresión a cualquier edad, desde su estado fresco o fluido; sin embargo, la experimentación se realizó entre los 28, 56 y 90 días, por lo que, a criterio de la autora, no debe admitirse teóricamente como un método acelerado [24,25]. Además, esta es una propiedad del hormigón en estado endurecido y no en estado fresco, como es reconocido en la literatura nacional e internacional. Dicha expresión se muestra en la fórmula 4:

$$f_c = 47 + 0,002 \cdot M_v + 0,07 \cdot E_d - 47 \cdot a/c \quad (4)$$

Donde:

f_c : resistencia a compresión del hormigón, MPa

M_v : masa volumétrica, kg

a/c : relación agua/cemento

E_d : edad del hormigón, días

La evaluación de la resistencia a compresión con el tiempo es de gran preocupación para los ingenieros estructurales [20,40,42,45,46,53]. P. K. Mehta y P. J. M. Monteiro [11] hacen referencia a dos criterios sobre el tema. El primero de ellos es el Informe del Comité ACI 209 que recomienda la fórmula 5 para un hormigón hecho con cemento portland normal (ASTM Tipo 1) curado con humedad a 23°C.

$$f_c(t) = f_{c,28} \left(\frac{t}{4+0,85 \cdot t} \right), \text{ MPa} \quad (5)$$

Donde:

$f_c(t)$: resistencia a compresión del hormigón a t días, MPa
 $f_{c,28}$: resistencia a compresión del hormigón a 28 días, MPa
 t : edad del hormigón, días

El segundo criterio, mostrado en la expresión 6 y planteado por CEB-FIP Model Code, la NBR 6118 y la UNE EN 1992-1-1 [8], presenta un modelo que describe el crecimiento de la resistencia a compresión del hormigón con la edad.

$$f_c(j) = \beta_{cc}(j) \cdot f_{c,28} \quad (6)$$

Siendo $\beta_{cc}(j)$ un coeficiente de valor, dado por la expresión 7:

$$\beta_{cc}(j) = e^{\left[s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{j}} \right) \right]} \quad (7)$$

Donde:

$f_c(j)$: resistencia a compresión a la edad j
 $f_{c,28}$: resistencia a compresión a la edad de 28 días
 S : coeficiente que depende del tipo de cemento y que adopta los valores:
 0,20 para cementos de endurecimiento rápido y de alta resistencia
 0,25 para cementos de endurecimiento normal o rápido
 0,38 para cementos de endurecimiento lento

Expone Gerardo A. Rivera. L. [1] que en Colombia y muchos países del área geográfica, se ha tratado de correlacionar la resistencia a compresión a 28 días, con la adquirida a 7 días, al tomar en cuenta que son muchos factores que influyen en ello, por lo que solo se deben tomar como aproximaciones. La expresión utilizada se puede observar en la fórmula 8.

$$f_{c,28 \text{ días}} = 50 + 1,13 \cdot f_{c,7 \text{ días}} \quad (8)$$

Donde:

$f_{c,7 \text{ días}}$: resistencia a compresión del hormigón a los 7 días, MPa
 $f_{c,28 \text{ días}}$: resistencia a compresión del hormigón a los 28 días, MPa

Referencian [3,8,35,42,43,46] a la Instrucción Española EHE que en su tabla 30.4.b se proporcionan unos valores estimados de la resistencia a compresión a la edad de "j" días, en relación con la resistencia a 28 días. Esta misma estimación es la que se emplea en Cuba y plantea que a los 3 días la resistencia será del orden del 40 % de la que tendrá a los 28 días; a los 7 días, del 65 %, etc.

Pedro Jiménez Montoya [3] propone una tabla que muestra la relación de la edad entre diferentes probetas de hormigón testigos y sus homólogas de los moldes, a partir de diferentes ensayos de la Asociación del Cemento y Hormigón de los Estados Unidos, donde se demuestra que la edad está ligada fundamentalmente al tipo de cemento y al grado de maduración del hormigón. Dicho criterio se puede apreciar en la tabla 4.

Tabla 4: Influencia de la edad en la resistencia a compresión de las probetas [3]

Tipo de cemento	Resistencia relativa					
	7 días	14 días	28 días	3 meses	1 año	> 2 años
Normal	0,7	0,88	1	1,12	1,18	1,20
De alta resistencia inicial	0,8	0,92	1	1,10	1,15	1,15
De endurecimiento lento	-	0,7	1	1,40	1,60	1,60

La evolución de la resistencia del hormigón depende también de la temperatura de conservación, evolucionando más rápidamente cuanto mayor es esta, pues la temperatura actúa como catalizador de las reacciones de hidratación del cemento.

Aun cuando al realizar un diseño de hormigón se tienen en cuenta varios aspectos ya señalados anteriormente como la relación agua/cemento y tamaño máximo del árido entre otros, para obtener un determinado desempeño mecánico éste se hace bajo condiciones ideales [25,35,36,47]. En la obra deberá hacerse un seguimiento que requiere cierto número de probetas que conllevan tiempo y gastos de recursos. Por todo

esto se puede afirmar que la resistencia del hormigón también va a depender del entorno en el cual se encuentre y es proporcional a la hidratación del cemento la cual va a estar influenciada por la relación agua/cemento, el tiempo de curado y las condiciones medioambientales.

Para poder relacionar la evolución de la resistencia con la temperatura se suele utilizar el término de madurez [19,40,42,46] que plantea: "Dos hormigones de igual dosificación, pero de distinta edad tienen la misma resistencia si tienen la misma madurez."

El método de la madurez es una técnica que fue desarrollada por investigadores ingleses a inicios de la década del 50 del pasado siglo, donde se identifica la gran influencia de la temperatura sobre la evolución de la resistencia del hormigón. Durante esa época se dedujo que la temperatura del hormigón estaba directamente relacionada con la cantidad de hidratos que se generan en la hidratación del cemento y estos, a su vez, con la resistencia del mismo. De esta forma aparece el término madurez que se fundamenta en el historial de temperaturas internas del concreto y utiliza el principio de que la resistencia del concreto está directamente relacionada con la edad y el desarrollo de su temperatura [9,19,40,42,46].

La madurez "m" es el producto de la temperatura por el tiempo de actuación de la misma, recogida en la expresión 9:

$$m = \sum (T_a - T_o) \cdot \Delta t \quad (9)$$

Donde:

M : madurez (factor tiempo y temperatura) a la edad t

T_a : temperatura promedio del hormigón durante el intervalo de tiempo Δt , °C

T_o : temperatura dato, °C

Δt : intervalo de tiempo, días u horas

En el caso particular de hormigones sometidos durante "j" días a una temperatura constante de 20°C, la expresión anterior sería, sustituyendo en 9:

$$m = 30 j \quad (10)$$

Igualando las dos expresiones anteriores y despejando "j", se tiene:

$$j = \frac{\sum_{i=1}^n [(T_i + 10) t_i]}{30} \quad (11)$$

Esta edad "j" se denomina edad teórica o equivalente de un hormigón, y es el tiempo que ha de permanecer dicho hormigón a la temperatura de referencia de 20 °C para alcanzar la misma madurez (y, por lo tanto, la misma resistencia) que si hubiese estado durante t_i días reales a una temperatura de T_i.

El método presenta como inconveniente que se debe llevar un riguroso y constante control de la temperatura de la mezcla de hormigón durante tiempos prolongados, siendo indispensable la disciplina en el cumplimiento del procedimiento de forma correcta, aspecto difícil de lograr en las construcciones en Cuba [5]. Además, se debe contar con el equipamiento necesario a pie de obra para sustentarlo.

3. CONCLUSIONES

De la crítica a la bibliografía, se extraen como conclusiones fundamentales que son múltiples los factores que influyen en la resistencia a compresión del hormigón, desde su concepción en el diseño de la mezcla, hasta su puesta en obra y el curado que se le proporcione. A mayor cantidad de agua en la mezcla, mayor será su laborabilidad, pero, al evaporarse el agua en exceso la pasta resulta más porosa, por lo que decrece la resistencia. Asimismo, mientras sea superior la calidad del cemento mayor será la resistencia del hormigón a edades tempranas. Para igual dosificación, un cemento de alta resistencia tendrá a 28 días, un aumento entre un 20 % y un 30 % del valor de la resistencia con respecto a un cemento normal. La correcta granulometría y forma de los áridos determinan un volumen de huecos mínimos, que influyen en lograr un hormigón más homogéneo y por tanto, más resistente. Al proporcionarse buenas condiciones de humedad y de temperatura en el curado del hormigón, la resistencia puede continuar incrementándose de forma indefinida en el tiempo, ya que las reacciones de hidratación del cemento que dan origen a los compuestos resistentes son lentas.

Los modelos para predecir la resistencia a compresión a 28 días en base a la resistencia a edades tempranas son múltiples para cada región o país. Todos estos modelos incluyen criterios, parámetros y coeficientes que dependen de diversos factores, como el tipo de cemento, los áridos empleados, la relación agua/cemento, el

tiempo y temperatura de curado, etc. lo que resulta un inconveniente, más si no se indican en ellas las dispersiones de los resultados que las generaron. En Cuba la resistencia a 28 días se predice con el empleo de relaciones porcentuales desde diferentes edades, tomado de la práctica internacional, lo que evidencia que no existe un método propio que resuelva esta problemática, y que exige investigar alternativas que hagan más exacto el procedimiento.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Rivera. L., *Resistencia del concreto in Concreto simple, 1ra. ed.*, Cauca, Colombia: Editora de la Universidad del Cauca, 2013.
- [2] NC 120, "Hormigón hidráulico-Especificaciones", ed. Cuba: Cuban National Bureau of Standards, 2018.
- [3] P. Jiménez M., A. García M. and F. Morán C., *Hormigón armado, 14 ed.* Barcelona, España: Editorial Gustavo Gili, 2000.
- [4] J. A. Hernández C. and J. J. Hernández S., *Hormigón estructural. Diseño por estados límites. Parte 1*, La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela, 2014.
- [5] C. Videla and O. Parada, "Predicción de la resistencia potencial del hormigón", *Revista de Ingeniería de Construcción*, vol. 5, pp.17-34, 1988.
- [6] S. L. Cha, S. S. Jin, G. H. An, and J. K. Kim, "A prediction approach of concrete properties at early ages by using a thermal stress device", *Journal of Construction and Building Materials*, vol. 178, pp. 120-134, 2018.
- [7] L. L. Consuegra and M. H. Puentes, "Comparación de los valores de resistencia a compresión del hormigón a la edad de 7 y 28 días", *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, vol. 10, no. 1, pp. 1-9, 2016.
- [8] A. F. Domínguez and J. J. H. Albear, "Relación entre la resistencia a compresión de testigos y probetas de hormigón. Estado del arte y propuestas para actualización de la normativa cubana", presented at the FECONS, La Habana, Cuba, 2016.
- [9] C. J. M. Escobedo, C. V. Herrero, C. M. A. Untiveros, and M. Á. D. Bautista, "Predicción de la resistencia a partir del método de la madurez: determinación experimental de la energía de activación de concretos autocompactantes y convencionales de alta resistencia", presented at the XIX Congreso Nacional de Ingeniería Industrial, Jalisco, Mexico, 2014.
- [10] A. M. Hincapié and J. V. Valencia, "Resistencia al hormigón: núcleos vs cilindros", *Revista Universidad EAFIT*, vol. 39, no. 131, pp. 87-95, 2003.
- [11] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Hormigón. Estructura, propiedades y materiales*, México: ed. Instituto Mexicano del Cemento y del Hormigón, 1998.
- [12] M. Piñeiro, "Relación entre las resistencias a compresión de hormigones a 7 y a 28 días", *Revista del IDIEM*, vol. 2, no. 1, p. 11, 1963.
- [13] L. Rojas-Hena, J. Fernández-Gómez, and J. C. López-Agüi, "Factores de corrección para predecir la resistencia a compresión in-situ de un hormigón autocompactante", *Revista de Materiales de Construcción*, vol. 63, no. 312, pp. 497-514, 2013.
- [14] E. S. H. Sosa, "Predicción de la resistencia a compresión axial del concreto en función de los resultados obtenidos en ensayos a probetas de dimensión standard y la obtención de su módulo de elasticidad", Tesis profesional para obtener el grado de Master en Ingeniería (Construcción), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F., 2010.
- [15] J. D. Sotz, F. A. Avid, P. Moreira and M. Chury, "Medida de la madurez de un hormigón en la estructura", *Revista ALCONPAT*, vol.6, no. 3, pp. 216-224, 2016.
- [16] J. J. H. Albear, "*Elementos de estadística y diseño de experimentos en la tecnología del hormigón*", La Habana, Cuba: Editora del Ministerio de la Construcción, 2004.
- [17] J. J. H. Albear, "*Tecnología del Hormigonado para ingenieros y arquitectos, 2da. ed.*", La Habana, Cuba: Editora Félix Varela, 2017.
- [18] C. Andrade, "La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad", *Revista ALCONPAT*, vol. 1, no. 2, pp. 93-101, 2011.

- [19] M. Valcuende P., E. Marco S., R. Jardón G. and A. Gil A., "Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura", Report # 15-08, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Construcciones, Valencia, España, 2015.
- [20] M. R. Proaño, "*Temas de hormigón armado*", Quito, Ecuador: Editora de la Escuela Politécnica del Ejército, 2008.
- [21] A. M. Neville and J. Brooks, "*Concrete Technology, 2nd ed.*", Canadá: Editorial Pearson Education, 2010.
- [22] T. C. Powers, "Structure and physical properties of hardened portland cement paste", *Journal of American Ceramic Society*, vol. 1, pp. 1-24, 1958.
- [23] J. C. Abdo S., "Método acelerado para pronosticar el comportamiento de los hormigones elaborados con áridos finos dolomíticos calizos", Tesis doctoral, Cátedra de Ingeniería, IDNS de las FAR General Antonio Maceo, Artemisa, Cuba, 2018.
- [24] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. C. Panarese, and J. Tanesi, *Diseño y control de mezclas de concreto, 1ra ed*, Illinois, EEUU: P. C. Association ed., 2004.
- [25] A. Steopoe, "Influencia del árido sobre la resistencia de los hormigones", *Revista de Materiales de Construcción*, vol. 18, no. 132, p. 7, 1968.
- [26] A. Holmgren. G., "La importancia de un correcto curado de las probetas de hormigón", presented at the XV Jornadas Chilenas del Hormigón, Santiago de Chile, Chile, 2005.
- [27] Z. Mi, Y. Hu, Q. Li, and Z. An, "Effect of curing humidity on the fracture properties of concrete", *Journal of Construction and Building Materials*, vol. 169, pp. 403-413, 2018.
- [28] L. Garín, A. Santilli, and E. Pejoja, "Influencia del curado en la resistencia a compresión del hormigón: estudio experimental", *Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica*, vol. 10, pp. 109-114, 2012.
- [29] N. R. Ramos, "Aplicación de técnicas no destructivas al estudio del hormigón fresco," Tesis en opción al grado científico de Máster, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2010.
- [30] O. G. Bolívar, *Dosificación de mezclas de hormigón*, Medellín, Colombia: Editora de la Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- [31] R. A. Puig M., "Monografía sobre trabajos de laboratorio de materiales de construcción", La Habana, Cuba: ed. Cujae, 2015.
- [32] A.C.I. 211.1-91, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete", ed. EE.UU. ACI Committee 211, 2002.
- [33] P. Helene and B. F. Tutikian, "Dosagem dos concretos de cimento portland", Brasília, Brasil: ed. G. C. Isaia, 2011.
- [34] Reglamento Técnico de la Construcción No. 1, "Control de la calidad en el hormigón", ed. La Habana, Cuba: Cuban National Bureau of Standards, 2003.
- [35] R. G. Solís, E. I. Moreno, and E. Arjona, "Resistencia de concreto con agregado de alta absorción y baja relación a/c", *Revista ALCONPAT*, vol. 2, no. 1, pp. 21-29, 2012.
- [36] R. Puig, M. Llanes, A. Fernández. "Diseño de mezclas para las obras de la Zona Especial de Desarrollo del Mariel", presented at 19 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, La Habana, Cuba, 2018.
- [37] NC 251, "Áridos para hormigones hidráulicos-Requisitos", ed. Cuba: Cuban National Bureau of Standards, 2018.
- [38] NC 192 "Hormigón hidráulico-Cálculo de la resistencia característica real a la construcción", ed. Cuba: Cuban National Bureau of Standards, 2017.
- [39] NC 244, "Hormigón endurecido-Determinación de la resistencia a compresión en probetas cilíndricas", ed. Cuba: Cuban National Bureau of Standards, 2016.
- [40] H. B. V. Figueroa, "La ganancia de resistencia del hormigón en sus primeras edades, estudiada por ultrasonido y método de madurez", presented at XV Jornadas Chilenas del Hormigón, Santiago de Chile, Chile, 2005.
- [41] M. Olivares, "Evaluación de la resistencia mecánica de un hormigón según su porosidad", *Revista Materiales de Construcción*, vol. 54, no. 273, pp. 14-27, 2004.

- [42] M. V. Payá, Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura, report Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2017.
- [43] M. A. M. González, Fórmula empírica de predicción de resistencia a la compresión para los hormigones confeccionados en la Comuna de Valdivia, report Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, 2016.
- [44] G. A. Rivera, "Resistencia del concreto", in *Concreto simple*, ed. Universidad del Cauca, Colombia, 2002, pp. 33-66.
- [45] R. K. Iyer and N. S. Nair, "Ensayos acelerados de resistencia del hormigón", *The Indian Concrete Journal*, vol. 51, no. 11, pp. 7-15, 1977.
- [46] S. G. C. Camacho, E. E. G. León and J. R. R. Serran, "Determinación de la resistencia del hormigón en obra a partir de la madurez y estudio de factibilidad en su implementación basándonos en la correlación temperatura – tiempo – resistencia", in *Memorias de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra*, ed. ESPOL, Guayaquil, Ecuador, 2016.
- [47] A. Castillo S., E. F. Guerra and M. L. B. Vallina, "*Diseño y análisis estadístico de experimentos*", La Habana, Cuba: ed. Félix Varela, 2017.
- [48] NC 95, "Cemento Portland-Especificaciones", ed. Cuba: Cuban National Bureau of Standards, 2017.
- [49] NC 96, "Cemento con adición activa-Especificaciones", ed. Cuba: Cuban National Bureau of Standards, 2017.
- [50] R. Herrera and R. Gayoso, *Áridos para hormigón-Especificaciones y ensayos*, La Habana, Cuba: ed. Ministerio de la Construcción, 2017.
- [51] NC-ISO 1920-2, "Ensayos al hormigón. Parte 2: Propiedades del hormigón fresco", ed. Cuba: Cuban National Bureau of Standards, 2016.
- [52] NC 354, "Hormigón fresco-Determinación de la temperatura", ed. Cuba: Cuban National Bureau of Standards, 2016.
- [53] R. Uller, O. Tronconis, I. Alanis, P. Helene, R. Mejías, V. O'Reylli et al., *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*, Río de Janeiro, Brasil: ed. CYTED, 1997.
- [54] NC 231, "Determinación, interpretación y aplicación de la velocidad del pulso ultrasónico en el hormigón", ed. Cuba: Cuban National Bureau of Standards, 2016.
- [55] NC-ISO 6275, "Hormigón endurecido-Determinación de la densidad", ed. Cuba: Cuban National Bureau of Standards, 2017.
- [56] R. Solís, "Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados", *Revista de Ingeniería*, vol. 8, No. 2, pp. 41-52, 2014.
- [57] C. Videla and O. Parada, "Predicción de la resistencia potencial del hormigón", *Revista de Ingeniería de Construcción*, vol. 5, pp.17-34, 1988.