

Factores de corrección a la resistencia a compresión de testigos de hormigón. Estado del arte y propuesta para actualización de la normativa cubana

Relation between the compressive strength of concrete cores and standard test specimens. State of the art and proposal for and update of the cuban

Alejandro Fernández Domínguez¹, Juan José Howland Albear¹

¹Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Correo electrónico: afernandezd@civil.cujae.edu.cu

Este documento posee una licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional 

Recibido: 26 de octubre de 2018 Aprobado: 6 de enero de 2019

Resumen

La diferencia entre la resistencia a compresión de las probetas elaboradas y los testigos extraídos de un mismo hormigón está dada por diversos factores. Algunos asociados a propiedades del material como la exudación; otros a aspectos tecnológicos como la calidad del curado y la compactación y otros asociados a diferencias entre las probetas y testigos en aspectos como la edad, las dimensiones, el estado de saturación en el momento del ensayo y la presencia de acero de refuerzo. Estas diferencias son cuantificadas en forma de factores de corrección aplicados al valor de resistencia a compresión del testigo. Este trabajo aborda principalmente el estado del arte sobre el tema. En el estudio fueron detectados un total de 10 factores de corrección, de los cuales 6 se encuentran en las normativas internacionales. Por su parte la norma cubana del tema: la NC 724:2015, solo exige la aplicación de uno de estos factores e incluye con carácter informativo otros dos, uno de los cuales presenta incongruencias. Finalmente, se proponen los factores de corrección que deben aparecer en una actualización de esta norma cubana así, como recomendaciones con el objetivo de determinar los factores de corrección específicos para las particularidades de Cuba.

Palabras claves: probeta, testigo, resistencia a compresión, factor de corrección

Abstract

The difference between the compressive strength of cores and cylinders are given by many factors. Some of them related to properties of the material, like the bleeding; others with technological practices like curing and vibration quality and others associated with differences between the cylinders and the cores in aspects like: age, dimensions, moisture content before testing and the presence of reinforcement. These differences are quantified as correction factors applied to the compressive strength value of the core. This paper aims to reflect the state of the art on the subject. In this study, 10 correction

factors were found, of which six are established by international standards. The Cuban standard on the subject: NC 724:2015, only demands the application of one correction factor, and includes two more as an informative way, one of them with incongruities. The analysis of the state of the art permitted to propose the correction factors that should appear on an upgrade of the NC 724:2015. Finally recommendations are made in order to promote the research of the subject under the Cuban particularities.

Key words: standard test specimen, concrete core, compressive strength, correction factor

INTRODUCCIÓN

La resistencia a compresión es la propiedad más importante del hormigón. Como material pétreo, su calidad desde el punto de vista de resistencias mecánicas, está definida por su resistencia a los esfuerzos de compresión. Por esta, entre otras razones, es la propiedad que se utiliza para caracterizar al hormigón, y se emplea como referencia para estimar o inferir otras propiedades mecánicas (resistencia flexión y tracción) e incluso aspectos relacionados con la durabilidad del material (porosidad, densidad).

La resistencia a compresión del hormigón de una estructura puede ser determinada por dos vías:

- A. Mediante el ensayo de probetas estandarizadas [1-4], cilíndricas o cúbicas, en dependencia de la normativa, a la edad de 28 días, aunque también se realiza a otras edades por requerimientos especiales. Las probetas son tomadas como parte del proceso de control de calidad durante la ejecución de la estructura.
- B. Mediante el ensayo de testigos [5-11] extraídos de la estructura ya construida.

Diversas causas pueden propiciar la toma de testigos de una estructura de hormigón. En el caso de obras en ejecución, puede deberse a que los resultados de resistencia a compresión obtenidos en las probetas no satisfacen los requerimientos establecidos en el proyecto. Cuando se trata de obras terminadas la toma de testigos puede estar dada por la realización de estudios previos a intervenciones a consecuencia de la presencia de patologías en la estructura, al cambio de uso (aumento de la carga), entre otras. Otro caso puede ser el de obras paralizadas, en las que se decide reanudar su construcción, y no se cuenta con suficiente documentación técnica de la misma. En cualquier caso, van a existir diferencias entre los valores de resistencia a compresión obtenidos a partir de probetas y los obtenidos de testigos. Varios factores influyen en este hecho y pueden clasificarse en dos grupos:

- a) Aquellos relacionados con el material y las prácticas de ejecución como: la exudación, la compactación y el curado.
- b) Aquellos asociados a diferencias entre los especímenes de ensayo en aspectos como: la edad del hormigón, las dimensiones, el estado de saturación en el momento del ensayo, la presencia de acero de refuerzo, etc.

Diversas investigaciones se han realizado desde la segunda década del siglo XX, con mayor fuerza después de los años 60 y hasta la actualidad, con el objetivo de cuantificar la influencia de estos factores sobre el resultado del ensayo de resistencia a compresión de un testigo respecto al de una probeta estandarizada, incluso el tema ya está siendo abordado de manera diferenciada en el campo de los hormigones autocompactantes [12-14].

Como resultado de estas investigaciones se manejan en la actualidad alrededor de 10 factores de corrección, de los cuales 6 son referidos en las normativas internacionales de referencia del tema [5-9, 15], en algunos casos solo con carácter informativo. Vale resaltar que existen diferencias entre los factores que son tenidos en cuenta por una normativa u otra y aquellos de aplicación generalizada presentan incluso valores diferentes en los distintos reglamentos técnicos.

Por su parte, la normativa cubana del tema, NC 724:2015 [10], solo exige la aplicación de uno de estos factores, además de referir otros dos con carácter informativo. Es opinión de los autores que la normativa cubana vigente no está considerando el estado actual del conocimiento sobre la materia. En consecuencia, los autores se han planteado la hipótesis de que es posible incluir con carácter normativo en una próxima actualización de la NC 724:2015 [10], un mayor número de factores de corrección a la resistencia a compresión de testigos de hormigón, ya sea asimilando los ya existentes en la literatura, o promoviendo investigaciones en este sentido, con las particularidades cubanas. En este artículo se expone el estado actual del conocimiento en la materia y se

aportan criterios con el objetivo de demostrar la hipótesis planteada. Finalmente se arriban a conclusiones que trazan una estrategia para solucionar esta problemática.

FACTORES DE CORRECCIÓN A LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE TESTIGOS DE HORMIGÓN ARMADO. ESTADO DEL ARTE

En este apartado se tratan los diferentes factores de corrección (F_i) que se manejan en las normativas internacionales y en la literatura científica actual, además de explicar los aspectos teóricos asociados a cada uno.

Los factores de corrección se aplican al resultado de la resistencia a compresión de cada testigo de manera individual (f_{test}) y cuantifican de manera porcentual la influencia de los diferentes fenómenos que influyen sobre la resistencia a compresión del testigo. Hasta el año 2015, el enfoque en toda la literatura era aplicarlos en productos con base en la unidad (ver ecuación 1). La reciente norma brasileña NBR 7680-1:2015 [5] cambia dicha forma respecto a su versión anterior de 2007 [16] y pasa a emplear coeficientes con base en el valor 1 aplicándolos en forma de sumatoria según la ecuación 2. En ambos casos se obtiene para cada testigo un valor de resistencia a compresión corregido ($f_{testcorr}$).

$$f_{testcorr} = F_1 * F_2 * F_3 * \dots * F_n * f_{test} \quad (1)$$

$$f_{testcorr} = 1 * (F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n) * f_{test} \quad (2)$$

Factor de esbeltez ($F_{h/d}$)

Este factor tiene en cuenta la relación altura/diámetro (h/d) o esbeltez del testigo. Fue identificado por primera vez en la ASTM C42 de 1927, sufriendo pequeñas variaciones en las ediciones siguientes [6]. La resistencia a compresión obtenida del ensayo de un testigo es inversamente proporcional al valor de su esbeltez. Testigos con menores esbelteces fallan ante mayores cargas por varias razones. Una es el llamado efecto zunchado, que toma en cuenta el confinamiento que las platinas metálicas de la prensa de ensayos confieren a los extremos del testigo, fenómeno que es más notable a menores esbelteces [17]. Otra razón es el denominado efecto volumen, que refiere que a medida que este es mayor también lo es su heterogeneidad y en consecuencia las zonas débiles; resultando especímenes con un mismo diámetro, y menores esbelteces y por tanto menores volúmenes, más resistentes [17].

Aunque algunas normativas internacionales [5-11] recomiendan una esbeltez de 2 para los testigos, muchas veces esto no puede lograrse pues son extraídos de elementos cuya profundidad no permite mantener la relación altura/diámetro en ese valor, o que para hacerlo habría que recurrir a diámetros pequeños, práctica no conveniente (tratada en el siguiente epígrafe). Esto lleva a la necesidad de aplicar un factor de corrección que disminuya el valor de la resistencia a compresión del testigo, si este presenta una esbeltez menor que 2.

El factor ($F_{h/d}$) es el único, que presenta con carácter normativo la NC 724:2015 [10] en su anexo C y emplea los mismos valores que la ASTM C42/C42M-04 [8] y la AASHTO T24-2009 [11], como se indica en la tabla 1. Según la propia normativa [8], estos son valores promedios, determinados a partir de testigos secos y saturados con resistencias entre 14 y 40 MPa; además, declara que los valores reales dependen del módulo de elasticidad y de la resistencia a compresión del testigo.

Tabla 1. Factor asociado a la relación altura/diámetro de los testigos extraídos según las Normas Técnicas NC 724:2015 [10], ASTM C42/C42M-04 [8] y AASHTO T24-2009 [11]

h/d	NC 724:2015[10]	ASTM C42/C42M-04[6]	AASHTO T24-2009 [11]
2	1	1	1
1,75	0,98	0,98	0,98
1,5	0,96	0,96	0,96
1,25	0,93	0,93	0,93
1	0,87	0,87	0,87

Nota: Para valores de esbeltez intermedios, los factores de corrección se obtienen por interpolación lineal

El ACI 214.4-10 [6] por su parte, establece varias ecuaciones (tabla 2) para determinar este factor, las que dependen además de h y d , del estado de humedad en que es ensayado el testigo y de la resistencia a compresión obtenida, en total concordancia con lo que declara al respecto [8]. Estas ecuaciones, así como el resto de los factores que aparecen en el ACI 214.4-10 [6], son el resultado de una investigación realizada por Barlett y MacGregor en 1994 [18], y son de recurrente aplicación internacional, como se refleja en la literatura [13, 19-21]. Investigaciones recientes [22, 23] confirman la validez de estas ecuaciones.

Tabla 2. Valor real del factor de corrección de esbeltez ($F_{h/d}$) según la ACI 214.4-10 [6]

Condición de ensayo	$F_{h/d}^{***}$	Coefficiente de variación $V(\%)$
Tratamiento de ASTM C42/C42M*	$1 - (0,13 - \alpha f_{c_{test}})(2 - h/d)^2$	$2.5(2 - \frac{h}{d})$
Sumergido 48 h	$1 - (0,117 - \alpha f_{c_{test}})(2 - h/d)^2$	$2.5(2 - \frac{h}{d})$
Secado al aire**	$1 - (0,144 - \alpha f_{c_{test}})(2 - h/d)^2$	$2.5(2 - \frac{h}{d})$

*La ASTM C42/C42M-04 [8] establece un tratamiento especial del testigo luego de extraído y hasta el momento del ensayo.

** Secado durante al aire durante 7 días a temperatura ambiente y humedad relativa menor de 60 %.

*** La constante $\alpha = 4,3 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$.

La BS EN 12504-1:2009 [9] no admite testigos con esbelteces menores que 1,6 a diferencia del resto que admite valores entre 1 y 2 y para determinar este factor se aplica la ecuación 3, también empleada por varios investigadores [24-29]. El rango de esbelteces entre 1 y 2 se debe a que los resultados que se obtienen para valores fuera del mismo, tienen una elevada variación [6], aunque en la actualidad se realizan algunas investigaciones [30, 31] para demostrar la posible utilización de esta clase de testigos. Por su parte la NBR 7680-1:2015 [5] emplea los valores de la tabla 3.

$$F_{h/d} = \frac{2}{1,5 + d/h} \quad (3)$$

Tabla 3. Valores del factor $F_{h/d}$ según NBR 7680-1:2015 [5]

h/d	2,00	1,88	1,75	1,63	1,5	1,41	1,33	1,25	1,21	1,18	1,14	1,11	1,07	1,04	1,00
$F_{h/d}$	0,00	-0,01	-0,02	-0,03	-0,04	-0,05	-0,06	-0,07	-0,08	-0,09	-0,10	-0,11	-0,12	-0,13	-0,14

Varios investigadores en la actualidad continúan abordando el tema, arrojando como resultado diversas ecuaciones (ver ecuaciones 4 y 5) [32,33].

$$F_{h/d} = 0,045 * (h/d)^3 - 0,308 * (h/d)^2 + 0,766 * (h/d) + 0,340 \quad (4)$$

$$F_{h/d} = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{75}{f_{test}^{1,15}} \right) * \left(2 - \frac{h}{d} \right)^2 \right]} \quad (5)$$

Los autores opinan que el valor más adecuado para el factor ($F_{h/d}$) que debe aparecer en la actualización de la NC 724, es el que se obtiene aplicando las ecuaciones que propone el ACI 214.4-10 [6], específicamente el segundo caso, para testigos sumergidos 48 h, en concordancia con las prácticas establecidas al respecto en la NC 318:2015 [15].

Factor de diámetro ($F_{diá}$)

El diámetro del testigo tiene una influencia directa en su resistencia a compresión. Según la UNE-EN 13791:2007 [34] el ensayo de un testigo con un diámetro nominal de al menos 100 mm y no mayor de 150 mm, y con una relación entre la altura y el diámetro igual a 2,0 proporciona un valor de resistencia a compresión equivalente a la resistencia de una probeta cilíndrica de 150 mm por 300 mm fabricada y curada en las mismas condiciones.

Reportes de la Concrete Society [35] en 1987 indican que la diferencia entre los valores de resistencia para testigos con diámetros 100 mm y 150 mm es despreciable [6]. Helene [36] sin embargo, considera que las diferencias introducidas por las variaciones de diámetro no son significativas en la mayoría de los casos; mientras que ni la BS EN 12504-1:2009 [9] ni la NBR 7680-1:2015 [5] presentan un factor por este concepto. Aunque esta última sí tiene en cuenta el efecto del diámetro en la resistencia del testigo, pero de otra forma, tema que se aborda en el próximo epígrafe.

Resulta difícil con frecuencia obtener testigos de 50 mm de diámetro que no hayan sido afectados por el proceso de extracción o que no contenga algún defecto que afecte el resultado [6]. En las normativas [5-9, 15] se recomienda el uso de testigos de 100 mm de diámetro como mínimo, y permiten el empleo de diámetros menores, hasta 50 mm, siempre que se tenga en cuenta la mayor variabilidad en el resultado. Una forma de hacerlo es extraer el doble de los testigos necesarios, como exige la NBR 7680-1:2015 [5].

En la actualidad se realizan investigaciones [30, 31] para avalar el uso de testigos con diámetros inferiores a 50 mm.

La tabla 4 muestra los valores del factor de diámetro establecidos en ACI 214.4-10 [6] y que son muy recurrentes en la literatura [20, 21, 24-29, 32, 37]. Los factores para diámetros entre 50 mm y 150 mm que no aparecen en la tabla pueden ser interpolados [23].

Tabla 4. Factor de diámetro $F_{diá}$ [6]

Diámetro (mm)	$F_{diá}$
50	1,06
100	1
150	0,98

En 2014, Khoury *et al.* [33] concluyen que el factor de corrección por el efecto del diámetro se determine empleando la ecuación 6, la cual arroja valores similares a los del ACI 214.4-10, como se muestra en la tabla 5.

$$F_{diá} = 1,507 - 0,11 \ln(d) \quad (6)$$

Tabla 5. Factor de diámetro según ACI 214.4-10 [6] y Khoury [33]

		Diámetro (mm)		
		50	100	150
$F_{diá}$	ACI 214,4-10 [6]	1,06	1	0,98
	Khoury [33]	1,08	1	0,96

Por su parte, la NC 724:2015 [10] presenta en su anexo D con carácter informativo los valores que aparecen en la tabla 7, como un factor de corrección debido a las dimensiones del testigo. Dichos valores fueron encontrados en la EH-91[38] y referidos por Pérez Sánchez [17]. Como puede observarse, los mismos se ofrecen para testigos de diámetros diferentes manteniendo la esbeltez igual a 2.

Tabla 6. Factor que considera las dimensiones del testigo [15, 17]

Dimensiones (cm)	20x40	15x30	10x20	5x10
Factor de corrección	1,03	1	0,97	0,9

Si se observan los valores de las tablas 5 y 6, se evidencian de inmediato contradicciones. Anteriormente se hacía referencia al efecto volumen, teoría que explica como testigos o probetas de hormigón con mayores diámetros o mayores volúmenes presentan menores valores de resistencia a compresión. Esta teoría resulta totalmente válida si se trata de probetas, pero en el caso de los testigos, el daño que experimenta durante el proceso de extracción es tal, que provoca un efecto totalmente contrario, o sea pérdidas de resistencias a compresión mientras menor es el diámetro del testigo. En esta última afirmación se basan los valores de la tabla 6.

Por todo lo antes expuesto, los autores opinan que la NC 724:2015 [10] debe eliminar los valores de la tabla 6. Más detalles sobre el tema son abordados en el siguiente apartado.

Factor de daño por extracción ($F_{dañ}$)

Este factor tiene en cuenta el daño que sufre el hormigón del testigo durante el proceso de su extracción, que puede manifestarse como: microfisuras, ondulaciones en la superficie y el hecho de que durante el proceso los áridos pueden ser cortados y fraccionados. Como se apuntó con anterioridad, los daños son mayores mientras menor es el diámetro del testigo.

Este factor adquiere mucha mayor importancia cuando la extracción de los testigos se hace con equipamientos viejos, mal conservados, mal fijados en el momento de la extracción o por operarios mal calificados [39].

El ACI 214.4-10 [6] propone un valor único de 1,06 que es empleado por varios investigadores [13, 19-21], mientras Vieiria [40] propone 1,07 en su tesis de doctorado. En otras literaturas se propone un valor de 1,1 asumiendo que la extracción es realizada cuidadosamente por operarios con experiencia [41].

Otro enfoque es el de Masi [42], que hace depender este factor, de la resistencia a compresión del hormigón, pues a medida que esta es menor, mayor es el daño en la extracción; los valores que propone son de 1,2 para $f_{test} < 20\text{MPa}$ y 1,1 para $f_{test} > 20\text{MPa}$ y son ampliamente referidos por otros investigadores [24-29].

Por su parte la NBR 7680-1:2015 [5], hace depender este factor, del diámetro del testigo (tabla 7), enfoque que concuerda con la teoría de Barlett y MacGregor [18], la cual establece un factor de diámetro. La tabla 8 muestra los efectos de aplicar el $F_{dañ}$ y el $F_{diá}$ de ACI 214.4-10 y el $F_{dañ}$ de la tabla 7, como puede observarse las correcciones son muy semejantes.

Tabla 7. Factor de daño por extracción en función del diámetro del testigo [5]

Diámetro del testigo (mm)	≤25	50*	75	100	≥150
$F_{dañ}$	no permitido	0,12	0,09	0,06	0,04

*En este caso deben extraerse el doble de los testigos que para el resto de los diámetros

Tabla 8. Comparación entre enfoque de ACI 214.4-10 [6] y NBR 7680-1:2015 [5] sobre $F_{diá}$ y $F_{dañ}$

Normativa / Diámetro (mm)	$F_{diá}$			$F_{dañ}$			Efecto combinado (%)		
	50	100	150	50	100	150	50	100	150
NBR 7680-1:2015 [5]	-	-	-	0,12	0,06	0,04	12	6	4
ACI 214.4-10 [6]	1,06	1	0,98	1,06			12,4	6	3,9

Por su parte Khoury *et al.* [33] proponen la ecuación 9, que engloba todos los diferentes enfoques anteriormente expuestos, pues hace depender el $F_{dañ}$ tanto de las dimensiones del testigo como de su resistencia a compresión; donde además α es una constante que depende del tipo de árido que toma el valor 0,06 para árido calizo triturado.

$$F_{dañ} = 2,4 * \frac{(l/d)^{0.006}}{[(d)^{0.1} * (f_{test})^{\alpha}]} \quad (7)$$

Por otra parte, el resto de las normativas referenciadas del tema [7-9,11] incluyendo la cubana [10] no consideran este factor. Los autores consideran que la NC 724 sí debe tenerlo en cuenta. Si bien el enfoque más actualizado es el de la ecuación 9, los resultados de esa investigación no han sido generalizados, además al depender del tipo de árido lo hace de aplicación muy particular.

Por tanto, se recomienda asumir el enfoque de la NBR 7680-1:2015 [5] del cual ha sido demostrado su pertinencia y tiene en cuenta además el efecto del diámetro del testigo, lo que simplifica la aplicación de los factores de corrección.

Además, se cree que debe llevarse a cabo en el país un estudio que permita caracterizar las máquinas extractoras de testigos para establecer factores de correcciones que tengan en cuenta el estado técnico de las mismas.

Factor de humedad (F_h)

Diferentes condiciones de humedad en el testigo en el momento de realizar el ensayo influyen en el valor de la resistencia a compresión del mismo. El factor de humedad (F_h) debe corregir estas diferencias.

El análisis de la literatura arroja que existe incertidumbre en los efectos de la humedad sobre la resistencia a compresión del hormigón [43].

Pérez Sánchez [17] plantea que el agua filtrada en el espécimen puede actuar como lubricante entre las partes sólidas del hormigón además de provocar el ablandamiento de las mismas [17]. El ACI 214.4-10 [6] refiere que el humedecimiento de los testigos provoca que el hormigón de la superficie de este se hinche, y la oposición del interior del testigo a este hinchamiento hace que aparezcan tensiones de equilibrio que provocan la reducción de la resistencia a compresión; mientras que de forma inversa, el secado de la superficie del testigo provoca retracción, que al estar restringida, produce una distribución residual de tensiones favorable que incrementa su resistencia. Por su parte, Chen *et al.* [43] también concluye que con el aumento del grado de saturación del testigo su resistencia a compresión decrece; pero que sin embargo cerca de su máximo grado de saturación experimenta un incremento.

Las diferentes normativas establecen los procesos de acondicionamiento al que deben ser sometidos los testigos antes de ser ensayados y en algunos casos establecen factores de corrección.

La NC 318:2015 [15] y la ISO 1920-6 [7] permiten que los testigos se ensayen saturados o secos (según la solicitud del cliente), luego de ser sumergidos en agua saturada en hidrato de cal o dejados al ambiente de laboratorio respectivamente, durante un tiempo de 40 h en ambos casos. La BS 12504-1:2009 [9] solo contempla el acondicionamiento del testigo sumergido. Ninguna de estas tres normativas establece un factor de corrección de humedad.

El ACI 214.4-10 [6] en su lugar reconoce que los testigos pueden ser ensayados en tres condiciones:

a) Siguiendo los procedimientos establecidos en la ASTM C42/C42M-04 [8] que de manera general consisten en mantener al testigo aislado del ambiente para que preserve su grado de humedad original y así minimizar el efecto que producen sobre la resistencia los gradientes de humedad que se introducidos por el humedecimiento del testigo en los procesos de extracción y preparación.

b) Después de sumergido 48 h en agua.

c) Secado al aire durante 7 días.

Para cada una de estas condiciones establece un factor de corrección (tabla 9) los que han sido empleados por algunos investigadores [20, 37]. Khoury *et al.* [33] también recomienda 1,09 para testigos sumergidos, pero 0,96 para testigos secos.

Tabla 9. Factor de humedad F_h , según ACI 214.4-10 [6]

Condición	Factor (F_h)
Tratamiento estandarizado ASTM C42/C42M-04 [8]	1
Sumergido 48 horas	1,09
Secado al aire*	0,98

* Secado durante al aire durante 7 días a temperatura ambiente y humedad relativa menor de 60 %.

Por su parte, la NBR 7680-1:2015 [5] plantea que si los testigos son extraídos de estructuras que van a estar en contacto con el agua deben ensayarse saturados, luego de ser sumergidos 72 h en un tanque de curado; mientras que en caso contrario, deben ensayarse secos luego de estar al menos 72 h en ambiente de laboratorio; aplicándose factores de corrección $F_h = 0$ y $F_h = -0,04$ respectivamente. Pérez Sánchez [17] plantea un enfoque similar solo que establece un $F_h = 0,87$ para testigos secos. Resulta evidente que existen diferencias en los enfoques del ACI 214.4-10 [6] y la NBR 7680-1:2015 [5].

El ACI 214.4-10 [6] considera que el tratamiento de la ASTM C42/C42M -04 [8] da lugar a una resistencia a compresión del testigo que representa la resistencia real del hormigón en la estructura y que los otros dos tipos de tratamientos introducen diferencias respecto a la realidad.

Por su parte la NBR 7680-1:2015 [5] considera que si el testigo es ensayado en estado saturado no debe modificarse su resistencia a compresión pues en ese mismo estado son ensayadas la probetas, en cambio si se ensayan secos se exige que se disminuya el valor obtenido en un 4 %, mientras en el ACI 214.4-10 [6] y según Pérez Sánchez [17] las disminuciones son del 13 %.

Sin duda este tema debe ser investigado con mayor profundidad, dada la diversidad de criterios que existen. Además, debe tenerse claro que es lo que se busca al aplicar los factores de corrección, hacer equivaler el valor de resistencia a compresión del testigo al de una probeta del mismo hormigón u obtener un valor de resistencia compresión que represente la resistencia de la estructura. Hasta tanto no se tenga mayor claridad sobre el tema, se cree que no debe considerarse un factor de corrección por este concepto en la NC 724.

Factor de presencia de acero de refuerzo (F_a)

La presencia de barras de acero de refuerzo en un testigo influye en el valor de resistencia a compresión del mismo. Si la barra de acero está en la dirección del eje longitudinal del testigo, el valor de resistencia a compresión obtenido será mayor. Si la barra en cambio se encuentra en otra posición el efecto sería el inverso, pudiendo llegar a ser la reducción de la resistencia a compresión del testigo en más de un 5 % [44].

Tanto el ACI 214.4-10 [6], la ASTM C 42 / C42M 2004 como la AASHTO-T24(2009) [11] prohíben el ensayo de testigos con acero de refuerzo en su interior. La NBR 7680-1:2015 [5] permite el ensayo de testigos que contengan barras de acero en dirección ortogonal, variando de 80° a 100°, si estas tienen un diámetro máximo de 10 mm. Además, exigen que no sean ensayados testigos con barras cruzadas en el tercio medio de la altura del testigo, o que presenten falta de adherencia entre el acero o el hormigón.

Por su parte la NC 724:2015, la ISO 1920-6:2015 [5] y la BS EN 12504-1:2009 [9] también permiten el ensayo de testigos con acero de refuerzo embebido, siempre que el mismo no esté en la dirección longitudinal del testigo. Para corregir las diferencias que provoca este fenómeno en la resistencia a compresión del testigo la ISO1920-6:2015 [5] y la BS EN 12504-1:2009 [9] establecen un factor de corrección que se determina según la ecuación 7, mientras que la normativa cubana no hace alusión al respecto.

$$F_a = \left[1 + 1,5 \times \sum_i \left(\frac{\phi_{bi}}{\phi_{bt}} \times \frac{r_i}{l} \right) \right] \quad (8)$$

donde:

F_a : Factor de presencia de acero de refuerzo.

ϕ_{bi} : Diámetro de la barra.

ϕ_{bt} : Diámetro del testigo.

r : Distancia del eje de la barra al extremo más cercano del testigo.

i : Número de barras embebidas.

l : Longitud del testigo.

Como puede notarse en (7) la pérdida de resistencia en los testigos disminuye con la disminución de la esbeltez del mismo [45]. Esta ecuación ha sido cuestionada por varios investigadores: en 1989, Loo *et al.* [45] determinaron que no era válida para testigos con esbelteces entre 1 y 1,2; por su parte en 2014, Condeço [46] concluyó que los resultados obtenidos al aplicarla no estaban del lado de la seguridad. Khoury *et al.* [33] declara que (7) no tiene en cuenta el deterioro de la adherencia entre el acero y el hormigón y propone para determinar el factor de corrección por presencia de barras de acero la ecuación 8, que depende además de la resistencia a compresión del testigo.

$$F_a = \left[1 + 1,5 \times \frac{\sum (\phi_{bi} \cdot r_i + \phi_{bi} \cdot (r/10))}{\phi_{bt} \cdot l} \right] * \frac{1,13}{f_{test}^{0,015}} \quad (9)$$

Otro enfoque es el propuesto por Barlet & MacGregor en 1994 [18], asumido también por la FEMA 724 [47] y que se observa en la tabla 10, mientras Masi [29] propone un factor de corrección que varía entre 1,03 para barras de pequeño diámetro (10 mm) y 1,13 para diámetros mayores (20 mm).

Tabla 10. Factores de corrección de resistencia para testigos simples que presentan acero de refuerzo [23]

Numero de barras de refuerzo presentes en el testigo	Factor de corrección
1	1,08
2	1,13

Es evidente la diversidad de criterios acerca del factor de corrección asociado a la presencia de acero de refuerzo en el testigo. Los criterios simplificados de [18, 29] solo consideran una variable del problema, cantidad y diámetro de las barras respectivamente, mientras las ecuaciones 7 y 8 presentan un enfoque más completo. Si bien (8) tiene en cuenta la resistencia a compresión del testigo en el valor de F_a , su influencia es mínima, además de que (8) se encuentre en varias normativas, influye en que se crea que esta última es la ecuación que debe aparecer en una actualización de la NC 724, con carácter obligatorio.

Factor de dirección de extracción (F_{dir})

La resistencia de un testigo también depende de la dirección en que es extraído del elemento estructural. Todas las normativas sobre extracción de testigos [5-11] establecen que estos deben ser extraídos en dirección perpendicular a la superficie de la estructura. Un testigo extraído en dirección paralela a la dirección de hormigonado, por ejemplo, en losas, va a presentar una resistencia semejante a la de una probeta del mismo hormigón; en cambio, un testigo extraído en dirección perpendicular a la del hormigonado, como en el caso de columnas, vigas y muros, va a presentar resistencias menores.

Producto de la exudación inherente del hormigón, se crean canales internos en la dirección del hormigonado, los cuales constituyen una zona de débil. Cuando son ensayados testigos de columnas, vigas o muros, dichos canales quedan en dirección ortogonal al eje longitudinal del testigo, provocando la falla a menores cargas.

Este fenómeno ha sido cuantificado por diferentes investigadores (tabla 11) algunos de los cuales no encontraron diferencias en la resistencia a compresión asociadas a este concepto. Por su parte el ACI 214.4-10 [6] aunque admite la necesidad de corregir la resistencia del testigo por este fenómeno, no establece un valor, sino que recomienda al investigador la determinación del mismo en cada caso. La UNE EN-13791-2009 [34] plantea que las diferencias pueden llegar hasta un 8 % al igual que Koury *et al.* [33], mientras que Grubbs [23] obtuvo diferencias de un 4 %.

En el caso de la normativa cubana [10], este es uno de los factores que aparece con carácter informativo con un valor de 1,05; valor que ha sido encontrado en la literatura [17, 44] y que concuerda con el valor establecido en la NBR 7680-1:2015 [5]. Por lo tanto, se considera que este factor, en una actualización de la NC 724, debe ser considerado con carácter normativo, manteniendo su valor actual.

Tabla 11. Factor de dirección de extracción (F_{dir}) para testigos extraídos en dirección perpendicular al hormigonado [36]

Investigador	F_{dir}
Petersons (1971)	1,12
Grahan, Neville (1969)	1,08
Ortiz & Díaz (1973)	1,01 a 1,06
Liniers (1974)	1,05
Meininger (1977)	1,07
Concrete Society	1,08
Kasai & Matui (1979)	1,04
Munday & Dhir (1984)	1,05 a 1,11
Bloem (1968)	1

CONCLUSIONES

Como resultado de esta revisión bibliográfica los autores proponen que el valor de resistencia a compresión obtenido del ensayo de un testigo (f_{test}) sea corregido aplicando la ecuación 10:

$$f_{test_{corr}} = F_{h/d} * F_{dir} * F_{dañ} * F_a * f_{test} \quad (10)$$

donde:

$f_{test_{corr}}$: Resistencia a compresión corregida del testigo.

$F_{h/d}$: $1 - (0,117 - 4,3 \times 10^{-4} * f_{c_{test}})(2 - h/d)^2$.

F_{dir} : 1,05.

$F_{dañ}$: Toma los valores de la tabla 7.

F_a : Determina según la ecuación 7.

RECOMENDACIONES

Se recomienda al Comité Técnico de Normalización de Hormigón revisar la NC 724:2015 [10] en lo referido a los factores de corrección a la resistencia a compresión de un testigo y se sugiere aplicar los factores corrección propuestos en 3.

Se recomienda realizar investigaciones acerca del factor de humedad F_h , específicamente sobre las diferencias que pueden existir en las resistencias a compresión de una probeta, ensayada luego de 27 días de estar sumergida respecto a la de un testigo, ensayado luego de 2 días bajo esa misma condición.

Se recomienda llevar a cabo un estudio de caracterización de las diferentes máquinas extractoras de testigos con las que cuentan las instituciones del país, para establecer el factor de daño por extracción ($F_{dañ}$) de cada una, que se cree puede resultar mayor que el propuesto en 3.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al doctor ingeniero Paulo Helene de Brasil, por haber iniciado a los autores de este artículo en el tema en su ciclo de conferencias en 2015 el Universidad Técnica de La Habana José Antonio Echevarría, y por haber colaborado con esta investigación.

REFERENCIAS

1. Organization IS. Testing of Concrete – Part 4: Strenght of Hardened Concrete. ISO 1920-4:2005. ISO/IEC Office. Geneva, Switzerland. 2005.
2. Materials ASFT. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM C39/C39M-05. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO, USA. 2005.
3. Técnicas ABdN. Concreto- Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos. NBR 5739:2007/2007.
4. Normalización OND. Ensayos del Hormigón - Resistencia a compresión del hormigón en estado endurecido (ISO 1920-4:2005, MOD). NC 724:2009. La Habana, Cuba. 2009.
5. Técnicas ABDN. Concreto – Extração, Preparo, Ensaio e Análise de Testemunhos de Estruturas de Concreto – Parte 1: Resistência à Compressão. NBR 7680-1:2015. Rio de Janeiro, Brasil. 2015.
6. Institute AC. Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results. ACI 214R-10. Farmington Hills, MI, USA2010.
7. Organization IS. Testing of Concrete- Part 6: Sampling, Preparing and Testing of Concrete Cores. ISO 1920-6:2004 ISO/IEC Office. Geneva, Switzerland2014.
8. Materials ASfT. Test for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete. ASTM C 42/C 42M-04. ASTM International,100 Barr Harbor Drive, PO, USA. 2004.
9. Institute BS. BS EN 12504-1:2009 Testing Concrete in Strutures Part 1: Cored Specimens - Taking, Examining and Testing in Compression. 2009.
10. Normalización OND. Norma Cubana NC 724:2015. Ensayos del Hormigón — Resistencia del Hormigón en Estado Endurecido (ISO 1920-4:2005, MOD). 2015.
11. Aashto T-24. Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete. 2009.
12. Rojas Henao LM, Fernández Gómez JA, López J, editors. Estimación de la resistencia in situ de un HAC mediante la resistencia de probetas testigo. 3er. Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante. Avances y oportunidad. Diciembre 2012. Madrid.
13. Rojas Henao LM, Fernández Gómez JA, López Agüi J. Factores de corrección para predecir la resistencia a compresión in-situ de un hormigón autocompactante. *Materiales de construcción*. 2013, 63(312):497-514.
14. Rojas Henao LM, Fernández Gómez JA, López JC, editors. Influencia de algunas variables en el ensayo a compresión de probetas testigo en un hormigón autocompactante. 2do. Congreso Ibérico sobre Hormigón Autocompactante. 2010. Guimarães.
15. Normalización OND. Norma Cubana NC 318:2015. Hormigon endurecido extraccion y preparacion de testigos cilindricos.
16. Técnicas ABDN. Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. NBR 7680:2007. Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
17. Pérez Sánchez M. Relación entre la resistencia a compresión de probetas-testigo y probetas normalizadas. *Materiales de construcción*. 1998,48(249):45-53.
18. Bartlett FM, MacGregor JG. Assessment of Concrete Strength in Existing Structures: University of Alberta, Department of Civil Engineering. 1994.
19. Pereira N, Romão X, Delgado R. Statistically-Based Survey Plans to Estimate the Concrete Strength in Existing Buildings.
20. Gelfi P, Ponzio F, Mossucca A, Di Cesare A, Nigro D, Dolce M, Moroni C, editors. Seismic Assessment of the R/C Buildings: the Case Study of Di. Coma. Centre after the L'Aquila (Italy) 2009, seismic sequence. 9th Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Society. 2011.
21. Akcay B. Variation of in-Place Concrete Core Strength in Structures from Istanbul Area: Statistical Analysis of Concrete Core Data. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 200,16(5):507-10.
22. Carroll AC. Effect of Core Geometry and Size on Concrete Compressive Strength: Auburn University. 2014.
23. Grubbs AR. Evaluation of In-Place Concrete Strength by Core Testing: Auburn University. 2015.
24. Masi A, Vona M. Prove Distruttive e non Distruttive su Materiali ed Elementi Strutturali di Edifici esistenti in Cemento Armato. *Atti del XII Convegno Nazionale dell'AIpND*. 2007.

25. D'Amato M, Laterza M, Gigliotti R, editors. Indagini distruttive e non distruttive su edifici in ca esistenti secondo l'OPCM 3274/3431: evidenze sperimentali e significatività dei risultati. 12th Italian Conference on Earthquake Engineering Pisa. 2007.
26. Masi A, Chiauuzzi L. An Experimental Study on the Within-Member Variability of in situ Concrete Strength in RC Building Structures. *Construction and Building Materials*. 2013;47:951-61.
27. Pucinotti R. Valutazione Della Resistenza Caratteristica a Compressione del Calcestruzzo in Situ.
28. Masi A, Digrisolo A, Santarsiero G. Concrete Strength Variability in Italian RC Buildings: Analysis of a Large DataBase of Core Tests. *Applied Mechanics and Materials*. 201,597:283-90.
29. Masi A, Vona M, editors. Estimation of the in-situ Concrete Strength: Provisions of the European and Italian Seismic Codes and Possible Improvements. Workshop Quali Prospettive per l'Eurocodice. 2009.
30. Tuncan M, Arioiz O, Ramyar K, Karasu B. Assessing Concrete Strength by Means of Small Diameter Cores. *Construction and Building Materials*. 2008;22(5):981-8.
31. Celik AO, Kilinc K, Tuncan M, Tuncan A. Distributions of compressive strength obtained from various diameter cores. *ACI Materials Journal*. 2012;109(6).
32. Pucinotti R. Assessment of in situ characteristic concrete strength. *Construction and Building Materials*. 2013;44:63-73.
33. Khoury S, Aliabdo AA-H, Ghazy A. Reliability of Core Test—Critical Assessment and Proposed new Approach. *Alexandria Engineering Journal*. 2014;53(1):169-84.
34. Certificación AEDNY. Evaluación de la resistencia a compresión in-situ en estructuras y elementos prefabricados de hormigón. UNE-EN 13791:2007. Madrid, España. 2007.
35. Society TC. Concrete Core Testing for Strength. Technical Report No 11. London.1987.
36. Helene P. Análise da Resistência à Compressão do Concreto em Estruturas Acabadas com Vistas à Revisão da Segurança Estrutural. *Revista Alconpat*. 2011;1(1):67-92.
37. Fiore A, Porco F, Uva G, Mezzina M. On the Dispersion of Data Collected by in situ Diagnostic of the Existing Concrete. *Construction and Building Materials*. 2013;47:208-17
38. Transporte MOPy. EH-91: Instrucción para el Proyecto y la Ejecución de Obras de Hormigón en Masa o Armado. 1991.
39. Helene P. Contribuição à Análise da Resistência do Concreto em Estruturas Existentes para fins de Avaliação da Segurança. *Construindo*. 2012;4(01).
40. Vieira Filho JO. Avaliação da Resistência à Compressão do Concreto Através de Testemunhos Extraídos: Contribuição à Estimativa do Coeficiente de Correção Devido aos Efeitos do Broqueamento: Universidade de São Paulo. 2007.
41. Masi A, Digrisolo A, Santarsiero G, editors. Experimental Evaluation of Drilling Damage on the Strength of Cores Extracted from RC Buildings. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2013. World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET).
42. Adriano Castagnone DC. Calcolo della Resistenza del Calcestruzzo di Strutture Esistenti STA DATA srl [Internet]. 2008.
43. Chen X, Huang W, Zhou J. Effect of Moisture Content on Compressive and Split Tensile Strength of Concrete. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. 2012;19(6):427-35.
44. Revuelta Crespo D, Gutiérrez Jiménez JP. Estimación de la resistencia a compresión del hormigón mediante el muestreo, extracción y rotura de probetas testigo. 2008.
45. Loo Y, Tan C, Tam C. Effects of Embedded Reinforcement on Measured Sstrength of Concrete Cylinders. *Magazine of Concrete Research*. 1989;41(146):11-8.
46. Condeço RMCG. Estudo da influência da presença de armaduras na resistência à compressão de carotes de betão: Universidade de Évora. escola de ciências e tecnologia. 2014.
47. Agency FEM. NEHRP commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. FEMA 274. Washington, DC.1997.