

Disponible en [www.hormigonyacero.com](http://www.hormigonyacero.com)

Hormigón y Acero 2019; 70(287):55-65  
<https://doi.org/10.1016/j.hya.2018.04.001>

# Evaluación de métodos para estimar la resistencia característica a compresión del hormigón en estructuras existentes a partir de la extracción y ensayo de testigos

## *Assessment of methods to estimate the characteristic concrete compressive strength in existing structures from core test results*

Alejandro Fernández Domínguez\* y Juan José Howland Albear

Universidad Politécnica de La Habana José Antonio Echevarría, Marianao, La Habana, Cuba

Recibido el 23 de noviembre de 2017; aceptado el 2 de abril de 2018

---

### RESUMEN

Este trabajo está motivado por la ausencia en las normativas cubanas de un método para estimar la resistencia característica a compresión del hormigón en estructuras existentes a partir de la extracción de testigos. Se establece el estado del arte sobre el tema y se utilizan los resultados de ensayos a compresión de testigos extraídos de 15 estructuras existentes de hormigón armado, para evaluar los diversos métodos encontrados en la literatura. Los resultados evidencian una gran variación en los valores determinados por los diferentes métodos encontrados. Finalmente se efectúa la comparación entre dichos valores, se cuantifican las diferencias promedio entre los valores calculados por los diferentes métodos y se emiten criterios sobre la sensibilidad de sus resultados ante las características del lote de hormigón.

© 2019 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L.L. Todos los derechos reservados.

PALABRAS CLAVE: Resistencia característica a compresión del hormigón; Testigos

### ABSTRACT

This paper is motivated because of the absence in Cuban standards of a method to estimate the characteristic concrete compressive strength in existing structures from core test results. The state of the art on the subject is established and the results of core compressive strengths of 15 reinforced concrete structures were used to assess the different methods found on the literature. The results show a large dispersion on the values obtained by the different methods. Finally a comparison of these values it's made, the average differences between the methods are quantified and a criteria about the sensitivity of the methods to the concrete batch characteristics is defined.

© 2019 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L.L. All rights reserved.

KEYWORDS: Characteristic concrete compressive strength; Concrete cores

---

---

\* Autor para correspondencia.

Correos electrónicos: [afernandezd@civil.cujae.edu.cu](mailto:afernandezd@civil.cujae.edu.cu) (A. Fernández Domínguez), [jhalbear@civil.cujae.edu.cu](mailto:jhalbear@civil.cujae.edu.cu) (J.J. Howland Albear).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.hya.2017.07.001>

0439-5689/© 2019 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L.L. Todos los derechos reservados.

## INTRODUCCIÓN

Analizar la seguridad estructural de una obra construida es mucho más complejo que en el caso de una estructura por construir, pues requiere inspecciones, ensayos y sólidos conocimientos sobre seguridad estructural [1].

En el caso de estructuras de hormigón armado, diversas razones pueden motivar el análisis de la seguridad de una estructura ya construida, y son referidas ampliamente en algunas normas relevantes como la BS 6089:2010 [2] y la BS EN 12504-1:2009 [3], así como en la literatura consultada [1].

Uno de los parámetros indispensables a evaluar en una estructura existente de hormigón armado cuya seguridad está siendo analizada es la resistencia característica a compresión del hormigón.

En una estructura construida la resistencia característica a compresión se estima a partir de la extracción y ensayo de testigos, complementada con el empleo de ensayos no destructivos como la esclerometría y el ultrasonido, que contribuyen a identificar los diferentes lotes de hormigón que pueden estar presentes en una estructura y a minimizar la cantidad de testigos a extraer.

En muchas de las normativas que abordan el tema [2,4-9], la resistencia característica a compresión del hormigón basada en la extracción de testigos es determinada de forma diferente en dependencia del motivo de la evaluación. Se presentan dos casos fundamentales: a) cuando se obtienen bajos resultados en las probetas, y b) cuando se trata de estructuras en explotación, ya sea que presentan patologías o que van a sufrir algún cambio de uso que signifique aumento de cargas, entre otras.

En Cuba existen tres normativas que rigen la evaluación de estructuras existentes de hormigón: la NC 318:2015 [10], la NC 724:2015 [11] y la NC 1109:2015 [12], todas de reciente actualización. La primera incluye lo referente al proceso de extracción de testigos, la segunda aborda los aspectos sobre el ensayo a compresión de los mismos, mientras la tercera especifica lo referente al empleo del método combinado (testigos, esclerometría y ultrasonido) para obtener un mayor tamaño de muestra. Ninguna de las tres incluye la determinación de valores característicos de resistencia a compresión, lo que obliga a los especialistas en Cuba a trabajar con valores medios cuando evalúan estructuras construidas, con el consecuente riesgo de la seguridad estructural.

Sin embargo, diversas normativas y códigos internacionales como ACI 214.4-10 [6], ACI 562-13 [8], BS EN 13791:2007 [9], BS 6089:2010 [2] y EN 1990:2002 [13] sí presentan diferentes métodos con este fin. Algunos de estos métodos han sido tratados en la literatura, evaluando y comparando sus resultados.

Steenbergen y Vervuurt [14] en 2012 comparan los valores de resistencia característica que se obtienen al emplear los métodos de la BS EN 13791:2007 [9] y la EN 1990:2002 [13], además de un método propuesto por los autores, que es una modificación de este último. El estudio se realiza en 70 losas de hormigón armado, de las que se habían extraído testigos. Los resultados arrojan que los valores obtenidos al aplicar la BS EN 13791:2007 [9] son como promedio un 15% superiores a los calculados al emplear la propuesta de método de los autores, siendo en algunos casos las diferencias de hasta un 30%.

Pucinotti [15], en 2013, toma probetas y extrae testigos de 25 lotes de hormigón pertenecientes tanto a elementos estruc-

turales ejecutados a nivel de laboratorio como pertenecientes a estructuras construidas. Empleando los resultados del ensayo a compresión de los testigos, compara los valores de resistencia característica calculados según los métodos de la EN 1990:2002 [13] y la BS EN 13791:2007 [9], además de un método propuesto por el autor como una modificación de este último. Los resultados mostraron que los valores calculados por la BS EN 13791:2007 [9] eran como promedio un 22% superiores a los calculados por la EN 1990:2002 [13] y en algunos casos las diferencias alcanzaron el 40%. Además, los valores calculados por los tres métodos mencionados son comparados con los valores de resistencia característica determinados a partir de la resistencia a compresión de las probetas. Como resultado de esta última comparación, se afirma que los valores obtenidos del método propuesto por el autor mostraron las menores diferencias con respecto a estos últimos, mientras que los métodos de la BS EN 13791:2007 [9] y la EN 1990:2002 [13] arrojaron valores mucho mayores y mucho menores, respectivamente.

Cristofaro et al. [16] emplean en su investigación los resultados de una campaña de evaluación de edificaciones existentes de hormigón armado para la prevención de riesgo sísmico en la región de Toscana, Italia, a través de ensayos destructivos (extracción de testigos) y no destructivos. Los autores determinaron, en 81 de las edificaciones evaluadas, los valores de resistencia característica a compresión empleando los métodos de la BS EN 13791:2007 [9] y la EN 1990:2002 [13]. Los resultados obtenidos manifiestan una superioridad en los valores obtenidos según la primera de un 50% como promedio sobre los calculados al aplicar la última.

En 2017, Cristofaro et al. [17] utilizan un caso de estudio de donde se extrajeron 232 testigos para comparar los valores de resistencia característica obtenidos al aplicar los métodos de las normativas BS EN 13791:2007 [9], EN 1990:2002 [13] y los propuestos por Pucinotti [15] y Steenbergen y Vervuurt [14] y comprándolo con la resistencia de diseño del hormigón y con la resistencia determinada a partir de las probetas tomadas durante el control de calidad. Los resultados evidenciaron diferencias entre los valores de resistencia característica determinados por las normativas referidas de 6 MPa como promedio. Al mismo tiempo, ambos valores resultaron conservadores respecto a los valores de resistencia obtenidos durante el control de calidad, un 18% en el caso de la EN 1990:2002 [13] y un 38% en el caso de la BS EN 13791:2007 [9].

A partir de todo lo expuesto anteriormente, puede afirmarse que la determinación de un valor de resistencia característica a compresión en estructuras construidas de hormigón constituye una problemática de investigación mundial.

Por tanto, en esta investigación se plantea como objetivo principal comparar los valores de resistencia característica obtenidos al aplicar los métodos que aparecen en las normativas europeas BS EN 13791:2007 [9], BS 6089:2010 [2] y EN 1990:2002 [13] y las norteamericanas ACI 214.4-10 [6] y ACI 562-13 [8] a casos de estudio. Los casos de estudios son 15 edificaciones construidas en La Habana y regiones aledañas durante el siglo xx, de las que se han extraído testigos en las últimas dos décadas. En primer lugar se describen los detalles principales asociados a cada uno de los métodos abordados. Luego se determinan los valores de resistencia característica a compresión en cada uno de los lotes bajo estudio. Finalmente, se comparan los resultados, se cuantifican las diferencias promedio entre los

valores calculados por los distintos métodos y se emiten criterios sobre la sensibilidad de los métodos a las características del lote de hormigón, dígame tamaño de muestra, resistencia media a compresión y dispersión en los valores.

### MÉTODOS PARA ESTIMAR LA RESISTENCIA CARACTERÍSTICA A COMPRESIÓN EN ESTRUCTURAS CONSTRUIDAS A PARTIR DE LA EXTRACCIÓN Y ENSAYO DE TESTIGOS.

En este apartado se exponen los aspectos fundamentales de los métodos encontrados en normativas europeas y norteamericanas para estimar la resistencia característica a compresión del hormigón en estructuras existentes a partir de la extracción y ensayo de testigos, y específicamente para el caso de estructuras existentes que son evaluadas ya sea por un cambio de uso que signifique aumento de cargas o por la presencia de patologías en la estructura.

Es importante acotar que, a diferencia de las normativas europeas, donde se emplea el término «resistencia característica a compresión del hormigón en la estructura», en las normativas del *American Concrete Institute* (ACI) que son abordadas en el documento [6,8] se refieren a esta como «resistencia equivalente».

A pesar de que la forma de introducir la seguridad difiere entre estos dos enfoques, ambas se refieren a un valor estimado de resistencia a compresión con un enfoque estadístico. Por tanto, con el objetivo de lograr un mejor entendimiento de este artículo, se emplea el término resistencia característica a compresión *in situ* para referirse a la resistencia característica a compresión en estructuras existentes y se denota por  $f_{ck, is}$ . De la misma forma, la resistencia media a compresión en estructuras existentes es referida como resistencia media a compresión *in situ* y se denotará como  $f_{cm, is}$ .

#### Métodos del ACI 214.4-10

El ACI 214.4-10 [6] «Guía para la obtención de testigos y la interpretación de resultados de resistencia a compresión» presenta dos métodos para estimar el valor de  $f_{ck, is}$ : el método del factor de tolerancia y método alternativo. Para el empleo de cualquiera de estos es necesario previamente determinar el valor de resistencia a compresión corregido de cada testigo ( $f_{test, corr}$ ) (ecuación 1) aplicando los factores de corrección  $F_{h/d}$

(por la esbeltez del testigo),  $F_{dia}$  (por el diámetro),  $F_{hum}$  (por el contenido de humedad) y  $F_{dañ}$  (por el daño por extracción) de la tabla 1 al valor de resistencia a compresión de cada testigo ( $f_{test}$ ). Posteriormente se estima la cantidad de lotes de hormigón presentes en la estructura y además se eliminan testigos con valores anómalos de resistencia a compresión en cada uno. Luego se procede a determinar el valor de la resistencia media a compresión corregida para cada lote ( $f_{cm, is}$ ) (ecuación 2), así como su desviación estándar (S) (ecuación 3) y la desviación de los factores de corrección empleados para calcular  $f_{test, corr}$  ( $S_a$ ) (ecuación 4).

$$f_{test, corr} = F_{h/d} F_{dia} F_{hum} F_{dañ} f_{test} \quad (1)$$

$$f_{cm, is} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{test, corr} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\sum \frac{(f_{ci} - f_{test, corr})^2}{(n-1)}} \quad (3)$$

$$S_a = f_{cm, is} \sqrt{V_{h/d}^2 + V_{dia}^2 + V_{hum}^2 + V_{dañ}^2} \quad (4)$$

Siendo n el número de testigos de cada lote. Los valores de  $V_{h/d}$ ,  $V_{dia}$ ,  $V_{hum}$  y  $V_{dañ}$  aparecen en la última columna de la propia tabla 1 y corresponden a cada uno de los factores de corrección que exige la misma; estos solo deben incluirse en la ecuación 4 si el valor de su respectivo factor es distinto de la unidad. Si los testigos presentan diferentes relaciones de altura/diámetro ( $h/d$ ) se aconseja de manera conservadora emplear el valor de  $V_{h/d}$  correspondiente al testigo de menor  $h/d$ .

#### Método del factor de tolerancia

El método del factor de tolerancia fue propuesto por Hindo y Bergerstorm [19] en 1985 y establece que la resistencia característica a compresión se estima con el empleo de la ecuación 5.

$$f_{ck, is} = f_{cm, is} - \sqrt{(KS)^2 + (ZS_a)^2} \quad (5)$$

Donde los valores de K y Z se determinan a partir de las tablas 9.2 y 9.3 del ACI 214.4-10 [6] en dependencia del nivel de con-

TABLA 1

Factores de corrección a la resistencia a compresión de testigos según el ACI 214.4-10 [6] (tabla 91 de ACI 214.4-10)

Factor de corrección	Caso específico	Valor medio	Coefficiente de variación V(%)
$F_{h/d}$	Tratamiento de la ASTM C42/C42M [18]	$1 - (0,13 - af_{test}) (2 - h/d)^2$	$2,5 (2 \frac{h}{d})^2$
	Sumergido 48 h	$1 - (0,117 - af_{test}) (2 - h/d)^2$	$2,5 (2 \frac{h}{d})^2$
	Secado al aire**	$1 - (0,144 - af_{test}) (2 - h/d)^2$	$2,5 (2 \frac{h}{d})^2$
$F_{dia}$	2 in. (50 mm)	1,06	11,8
	4 in. (100 mm)	1,00	0,0
	6 in. (150 mm)	0,98	1,8
$F_{hum}$	Tratamiento de la ASTM C42/C42M [18]	1,00	2,5
	Sumergido 48 h	1,09	2,5
$F_{dañ}$		1,06	2,5

\* La ASTM C42/C42M-04(4) establece un tratamiento del testigo después de extraído y hasta ser ensayado.

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

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

fianza asumido y el número de testigos ( $n$ ). Según los autores de este método, pueden ser empleados niveles de confianza del 75% para estructuras ordinarias, del 90% para edificios importantes y del 95% para elementos cruciales de plantas nucleares.

### Método alternativo

El método alternativo fue introducido por Bartlett y MacGregor [20] en 1995. Estos investigadores planteaban que el método del factor de tolerancia resultaba demasiado conservador en la práctica, ya que los ensayos de testigos sobreestimaban la verdadera variabilidad del hormigón *in situ*; es decir, el valor de  $f_{ck, is}$  calculado por la ecuación 4 resultaba muy bajo porque el valor de la desviación estándar ( $S$ ) empleado era muy alto. Además, planteaban que la precisión inherente a este método resultaba significativamente mayor que las especificaciones empleadas en los métodos actuales de diseño.

El método alternativo, por su parte, se aplica en dos pasos. Primero se determina, el límite inferior estimado para el valor de  $f_{cm, is}$  a partir de la ecuación 6.

$$(\bar{f}_c)_{CL} = f_{cm, is} - \sqrt{\frac{(TS)^2}{n}} + (ZS_a)^2 \quad (5)$$

Donde  $T$  representa el efecto de  $n$  en la incertidumbre del valor de  $f_{cm, is}$  y se determina a partir de la tabla 9.4 de ACI 214.4-10 [6] en función del nivel de confianza establecido y de  $n$ , mientras el resto de las variables son las mismas definidas con anterioridad. Los autores del método sugieren que un 90% de confianza es probablemente conservador para uso general. Luego la  $f_{ck, is}$  se estima empleando la ecuación 7.

$$f_{ck, is} = C(\bar{f}_c)_{CL} \quad (7)$$

Donde  $C$  es un factor que considera la variabilidad de la resistencia a compresión dentro de una misma estructura y depende del número de amasadas, del número de elementos y del tipo de construcción en cuestión y se escoge de la tabla 9.5 de [6].

### Método del ACI 562-13

La normativa ACI 562-13 [8], «Especificaciones para la evaluación, reparación y rehabilitación de edificios de hormigón», establece que en la evaluación de la seguridad en estructuras construidas de hormigón armado, la  $f_{ck, is}$  se estima a partir de la ecuación 8.

$$f_{ck, is} = 0,09 f_{cm, is} \left[ 1 - 1,28 \sqrt{\frac{(K_c V)^2}{n} + 0,0015} \right] \quad (8)$$

Donde  $V$  es el coeficiente de variación de las resistencias de los testigos y  $k_c$  es el coeficiente modificador del coeficiente de variación que se determina de la tabla 6.4.3 de [8].

Este método también se encuentra especificado en la *Canadian Highway Bridge Design Code CAN/CSA S6-06* [21] y se basa en el método alternativo propuesto por Bartlett y MacGregor [20] en 1995 que se especifica en el ACI 214.4-10 [6].

### Método de la BS EN 13791:2007

Según se establece en la BS EN 13791:2007 [9], luego de ensayados los testigos el resultado de resistencia a compresión de cada uno debe ser corregido aplicando los factores de corrección exigidos en la BS EN 12504-1:2009 [3]. Luego, empleando los valores obtenidos de  $f_{test, corr}$  se determina la  $f_{cm, is}$  y finalmente  $f_{ck, is}$ .

Con este fin, la BS EN 13791:2007 [9] presenta los enfoques A y B, el primero para ser usado cuando se tiene una muestra de 15 o más testigos y el segundo cuando la muestra tiene entre 3 y 14 testigos. A continuación se describen los dos enfoques:

#### Enfoque A

El valor de  $f_{ck, is}$  estimado de la región de ensayo debe ser el menor valor entre los que se obtienen de las ecuaciones 9 y 10.

$$f_{ck, is} = f_{cm, is} - k_2 S \quad (9)$$

$$f_{ck, is} = f_{is, mínimo} + 4 \quad (10)$$

Donde  $s$  es el mayor valor entre la desviación estándar de los resultados de los ensayos ( $S$ ) y 2 MPa, y  $k_2$  se indica en las disposiciones nacionales, o si no se da ningún valor, se toma como 1,48, y  $f_{is, mínimo}$  es el resultado mínimo del ensayo de resistencia a compresión.

#### Enfoque B

El valor de  $f_{ck, is}$  debe ser el menor valor entre los que se obtienen de las ecuaciones 11 y 12.

$$f_{ck, is} = f_{cm, is} - k \quad (11)$$

$$f_{ck, is} = f_{is, mínimo} + 4 \quad (12)$$

Donde  $k$  depende del tamaño de la muestra ( $n$ ) y se obtiene de la tabla 2.

Finalmente, el valor de  $f_{ck, is}$  obtenido por cualquiera de los dos enfoques anteriores debe dividirse por 0,85, lo que significa un incremento del 18%. El valor obtenido pudiera entonces ser mayor que el valor de  $f_{cm}$  determinado en probetas del mismo hormigón, lo que resultaría sin dudas inseguro. [14]

TABLA 2

Valor de  $k$  asociado con un número pequeño de resultados de ensayos [9]

$n$	$k$
de 10 a 14	5
de 7 a 9	6
de 3 a 6	7

### Método de la BS 6089:2010

La norma británica BS 6089:2010 [2] declara que los dos enfoques que propone la BS EN 13791:2007 [9] abordados en 2.3.1 y 2.3.2 no son aplicables para determinar la resistencia característica de una estructura existente sobre la cual no hay conocimiento previo. En su lugar propone el empleo de un método más conservador basado en principios estadísticos establecidos, como la  $t$  de Student.

La normativa propone que  $f_{ck, is}$  sea el menor valor entre los que se obtienen de las ecuaciones 13 y 14.

$$f_{ck, is} = f_{cm, is} - t_{0,05} S \quad (13)$$

$$f_{ck, is} = f_{is, mínimo} + 4 \quad (14)$$

Donde  $t_{0,05}$  es el valor del estadígrafo t para  $n-1$  grados de libertad y un nivel de confianza del 95%.

### Método de la EN 1990:2003

De acuerdo a Steenbergen y Vervuurt [14], el Eurocódigo EN 1990:2002 [22] establece principios y requerimientos para la seguridad, el servicio y la durabilidad de las estructuras. Para lograrlo, describe las bases para el diseño y la verificación de las mismas y las premisas acerca de la seguridad estructural.

Específicamente en el caso de estructuras existentes, EN 1990:2002 [13] refiere en su anexo D un método para estimar  $f_{ck, is}$  basado en la resistencia de testigos extraídos de la estructura.

Dicha resistencia característica se estima asumiendo una distribución logarítmica-normal de la resistencia a compresión según la ecuación 15.

$$f_{ck, is} = \exp \left\{ f_{cm, is}(Y) - t_{n-1, p=0,05} s(Y) \sqrt{1 + \frac{1}{n}} \right\} \quad (15)$$

Donde  $f_{cm, is}(Y)$  es la media del logaritmo natural de los valores medidos de resistencia a compresión;  $s(Y)$  es la desviación estándar de los logaritmos naturales de los valores medidos de resistencia a compresión, y  $t_{n-1, p=0,05}$  es el valor del estadígrafo t de Student para un grado de confianza del 95% y  $n-1$  grados de libertad.

Según Steenbergen y Vervuurt [14], el factor  $\sqrt{1 + \frac{1}{n}}$  tiene en cuenta la incertidumbre en el valor medio y el valor de  $t_{n-1, p=0,05}$  tiene en cuenta la incertidumbre en la desviación estándar.

Es importante acotar que en la EN 1990: 2002 [22] no se hace referencia al empleo de factores de corrección a los valores individuales de resistencia a compresión de los testigos.

### Conclusiones parciales

Lo expuesto en el apartado 2.1 evidencia la gran diversidad de métodos manejados internacionalmente para determinar la resistencia característica a compresión de una estructura construida a partir de la extracción y ensayo de testigos. Esto hace injustificable el hecho de que las normativas cubanas no cuenten con método alguno.

La mayor diferencia detectada entre los métodos radica en el nivel de confianza exigido por las normativas norteamericanas [6,8] y las normativas europeas [2,13]. Estas últimas exigen un 95% de nivel de confianza mientras que las primeras plantean que incluso un 90% resulta conservador. Este elemento puede influir en la magnitud de los valores de  $f_{ck, is}$ .

Por otro lado, todos los métodos tienen en común que consideran de una forma u otra las mismas variables: el tamaño de muestra ( $n$ ) y alguna medida de la dispersión de los valores de  $f_{testr}$ , ya sea la desviación estándar ( $S$ ) o el coeficiente de variación ( $V$ ).

### Casos de estudio

Los métodos para estimar la resistencia característica compresión en estructuras construidas, abordados en 2.1, son evaluados en 15 edificaciones de hormigón armado construidas en La Habana y sus cercanías a lo largo del siglo XX; algunos datos asociados a las mismas se recogen en la tabla 3. Dichos datos fueron obtenidos a partir de informes de estudios de diagnóstico realizados en estas estructuras por dos entidades de La Habana: la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) y el Centro de Investigación y Desarrollo de la Construcción (CIDC). El anexo A contiene la totalidad de los datos asociados a los testigos extraídos en los estudios de diagnóstico referidos.

La elección de estas 15 estructuras como casos de estudio fue realizada de manera aleatoria de un total de alrededor de 200 informes de estudios de diagnóstico consultados en los archivos de las dos empresas antes mencionadas.

Para llevar a cabo la evaluación de cada uno de los métodos abordados y dados los diferentes criterios que existen sobre la aplicación de los factores de corrección a la resistencia de testigos, se decidió para todos los casos determinar el valor de  $f_{test, corr}$  aplicando la ecuación 1, que emplea los factores de corrección establecidos en el ACI 214.4-10 [6] (tabla 1); de esa forma todos los métodos parten de los mismos valores de resistencia a compresión de testigos corregidos ( $f_{test, corr}$ ) y por tanto se aprecia de mejor manera su aplicación al determinar los valores de  $f_{ck, is}$ . Es importante aclarar que los factores  $F_{h/d}$  y  $F_{hum}$  aplicados son los correspondientes a la condición del testigo sumergido 48 h antes del ensayo, por coincidir con las especificaciones al respecto de las normas cubanas NC 54-122:1986 [23] y NC 318:2003 [24], vigentes durante los años en que fueron realizados los estudios de diagnóstico sobre las estructuras casos de estudio. En el anexo A pueden encontrarse los detalles sobre la obtención de los valores de  $f_{test, corr}$  de cada testigo.

### Identificación de lotes y búsqueda de valores anómalos

Luego de obtener el valor de resistencia a compresión corregido de cada testigo ( $f_{test, corr}$ ) aplicando los factores de corrección del ACI 214.4-10 [6], se procedió a identificar la cantidad de lotes dentro de cada una de las estructuras y eliminar del análisis aquellos testigos cuyos valores de resistencia a compresión resultaron atípicos.

Este proceso se llevó a cabo según los criterios del ACI 214.4-10 [6] en su apéndice A2. Primeramente los testigos se agruparon de acuerdo al tipo de elemento estructural del cual fueron extraídos; luego se realizaron pruebas de comparación múltiple, primero dentro de cada uno de los grupos formados y luego entre ellos, para demostrar cuáles de los testigos podían ser considerados como muestras de un mismo lote de hormigón.

Las pruebas de comparación múltiple se realizaron en el asistente estadístico Statgraphics. La tabla ANOVA y la prueba de Fisher se emplearon para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las medias de cada subgrupo formado. Luego, en los casos positivos se empleó la prueba de rangos múltiples siguiendo el método de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher con un nivel de confianza del 95,0%, para determinar cuáles de los subgrupos eran diferentes.

TABLA 3

Datos más importantes de las 15 obras casos de estudios

Nº	Obra	Año de construcción	Año de estudio	Elementos ensayados	Cantidad de testigos extraídos
1	Almacén de hemoderivados	1943	2004	Columna, Viga, Losa	12
2	Calle N No. 336	1945	2002	Viga, Columna	9
3	Almacenes Cubanacán	1970	1999	Columna, Viga, Losa	19
4	Plaza de la Revolución José Martí	1954	2006	Losa	4
5	Casa de Dulce María Loynaz	1928	2002	Losa	4
6	Hotel Herradura	1956	2000	Viga, Losa	13
7	Edificio Malecón y F	1967	2002	Muro	10
8	Muelle 8 del Mariel	1979	2001	Viga	9
9	Edificio 7 ma y 116	1964	2000	Columna, Viga	12
10	Dirección Municipal del PCC Cárdenas	1977	2002	Losa	3
11	Edificio Pentágono	1956	1998	Columna	8
12	Basamento del Edificio de la UNAICC	1927	2001	Columna, Viga	6
13	Instituto Nacional de Oncología y Radiobiología	1945	2004	Losa	12
14	Calixto García (Edificio Joaquín Albarrán)	1914	2005	Losa	20
15	Hospital Pedro Borrás	1935	2007	Columna, Viga	15

Una vez concluido el análisis, se llegó a las siguientes conclusiones:

- a) Solo la obra 14 no se ajustó a una distribución normal, sino a una distribución logarítmica-normal, que de acuerdo a criterio expuestos en ACI 214.4-10 [6], es característica de obras con pobre control de ejecución.
- b) En todas las obras los testigos pertenecían al mismo lote de hormigón, a excepción de las obras 1, 3 y 15, las cuales presentaron dos lotes cada una, quedando finalmente 18 lotes de hormigón.
- c) Específicamente en el caso de la obra 1, la prueba de rangos múltiples (tabla 4) arrojó que los testigos de las losas podían ser incluidos en el mismo lote que los testigos de las columnas o de las vigas, pero estos dos últimos no eran homogéneos entre sí. Por tanto, se decidió asumir 2 lotes, agrupando a los testigos de las losas y columnas, con el objetivo de aumentar en lo posible la cantidad de testigos en cada lote.

TABLA 4

Pruebas de rangos múltiples. Procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Nivel de confianza: 95,0%

Grupos	Cantidad de testigos	Media	Grupos homogéneos
Columnas	3	13,4	X
Losa	3	16,3	X X
Viga	6	20,4	X X

Nota: Las X en la misma columna indican homogeneidad entre grupos.

Posteriormente, cada uno de los 18 lotes fue sometido a una búsqueda de valores atípicos empleando también el asistente estadístico Statgraphics, mediante las pruebas de Grubbs y Dixon con un nivel de confianza del 99%. En este proceso no fue detectado valor anómalo alguno. En la tabla 5 se resumen las principales características de los 18 lotes formados.

### Resultados y discusión

#### Estimación de $f_{ck, is}$ aplicando los diferentes métodos abordados en 2.1

Una vez definidos los lotes de hormigón que conformaban la muestra, se determinaron los valores de  $f_{ck, is}$  para cada uno de esos lotes empleando los métodos descritos en 2.1. Algunos detalles sobre la aplicación de estos métodos a los casos de estudio se abordan a continuación.

En los métodos establecidos en el ACI 214.4-10 [6] (ver 2.1.1) se empleó un grado de confiabilidad del 90%, como sugieren Bartlett y MacGregor [20].

En la tabla 5 se muestran los valores de  $f_{ck, is}$  obtenidos, además de los valores de  $f_{cm, is}$  y  $S$  correspondientes a cada lote. Como puede notarse, en el lote 10 no aparece valor alguno de  $f_{ck, is}$  para el método ACI 562-13 [8], esto se debe a que dicho método no puede ser empleado para tamaños de muestras inferiores a 4. En el caso del lote 5 no se muestra valor alguno para el método de la BS EN 13791:2007 [9], pues el valor calculado de  $f_{ck, is}$  resultó negativo.

#### Comparación entre métodos

La tabla 5 evidencia la gran variabilidad con que los diferentes métodos abordados en el apartado 2 estiman el valor de  $f_{ck, is}$  para un mismo lote de hormigón. Aun observando cuidadosamente, no puede encontrarse un patrón en los valores de  $f_{ck, is}$  asociado a ninguna de las variables de los métodos ( $n$ ,  $S$  o  $f_{cm, is}$ ). En la última fila de la propia tabla se calcularon los rangos del valor de  $f_{ck, is}$  para cada lote, que no es más que la diferencia entre el mayor y menor valor de  $f_{ck, is}$  calculado por los métodos. Obsérvese como en tres lotes las diferencias alcanzan valores por encima de 12 MPa, mientras que en otros tres son inferiores a 3 MPa, otra evidencia de la variabilidad en los valores de  $f_{ck, is}$  calculados por los diferentes métodos para un mismo lote de hormigón.

**TABLA 5**  
**Valores de  $f_{cm,ts}$  y  $f_{dt,ts}$  para los diferentes lotes según cada uno de los métodos abordados en 2.1. Entre paréntesis: valores de  $(f_{cm,ts} - f_{dt,ts}) / f_{cm,ts}$**

Obra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Prom, de	CV de	
Lote	1,1	1,2	2	3,1	3,2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15,1	
Tamaño de muestra (n)	6	6	9	13	6	4	4	13	10	9	12	3	8	6	20	6	9	$(f_{cm,ts} - f_{dt,ts}) / f_{cm,ts}$
$f_{cm,ts}$ (MPa)	14,87	20,41	12,1	16,4	11	20,2	6,73	26,4	49,6	29,4	7	28,6	11,6	9,1	22,2	16,8	11,3	16,7
Desviación estándar de $f_{avg,ave}$ (MPa)	3,88	4,19	1,84	3,50	1,76	2,61	1,79	7,11	2,49	10,2	1,56	4,29	1,99	2,64	5,95	9,00	2,61	3,93
$f_{dt,ts}$ (MPa)	7,63	12,57	8,75	10,54	7,55	14,56	2,91	14,96	43,28	11,75	4,38	17,50	8,12	4,15	12,35	3,01	6,40	10,00
Método del factor de tolerancia	(0,49)	(0,38)	(0,28)	(0,36)	(0,31)	(0,28)	(0,57)	(0,43)	(0,13)	(0,60)	(0,37)	(0,39)	(0,30)	(0,54)	(0,44)	(0,82)	(0,43)	(0,40)
Método alternativo	10,33	14,72	8,83	11,88	7,87	14,87	4,35	19,52	37,11	19,77	5,04	19,21	8,74	6,18	15,89	11,37	8,00	12,26
ACI 562-13	(0,33)	(0,28)	(0,27)	(0,28)	(0,29)	(0,26)	(0,35)	(0,26)	(0,25)	(0,33)	(0,28)	(0,33)	(0,25)	(0,32)	(0,28)	(0,32)	(0,29)	(0,27)
BS EN	8,14	10,61	10,6	13,09	8,10	9,17	4,16	20,46	42,87	13,56	6,37	9,41	6,51	17,83	14,18	7,45	11,91	0,29
13791:2007	(0,45)	(0,48)	(0,12)	(0,20)	(0,26)	(0,55)	(0,38)	(0,23)	(0,14)	(0,54)	(0,09)	(0,19)	(0,28)	(0,20)	(0,16)	(0,34)	(0,29)	
BS 6089:2010	7,87	13,41	6,10	11,39	4,02	13,15	17,92	44,63	21,37	1,99	21,59	5,60	2,09	17,18	3,52	4,27	10,73	0,37
EN 1990:2002	(0,38)	(0,23)	(0,41)	(0,18)	(0,57)	(0,23)	(0,20)	(0,10)	(0,14)	(0,67)	(0,11)	(0,43)	(0,73)	(0,09)	(0,75)	(0,55)	(0,25)	
3,28	7,05	11,97	8,68	10,15	7,38	14,01	2,52	13,77	45,07	10,41	4,19	16,37	7,83	3,76	11,49	1,28	6,02	0,45
(MPa)	(0,53)	(0,53)	(0,28)	(0,38)	(0,33)	(0,30)	(0,63)	(0,48)	(0,09)	(0,65)	(0,40)	(0,43)	(0,33)	(0,59)	(0,48)	(0,92)	(0,47)	(0,44)
	8,19	12,72	9,18	10,00	7,59	13,75	3,32	15,06	41,53	13,19	4,10	15,46	7,67	4,42	13,11	6,11	6,85	9,73
	(0,45)	(0,38)	(0,24)	(0,39)	(0,31)	(0,32)	(0,51)	(0,43)	(0,16)	(0,55)	(0,41)	(0,33)	(0,34)	(0,51)	(0,41)	(0,64)	(0,39)	(0,42)
	5,16	3,42	3,41	3,37	6,31	1,83	7,31	15,40	14,73	4,03	9,94	2,81	4,06	8,72	12,90	2,98	3,20	

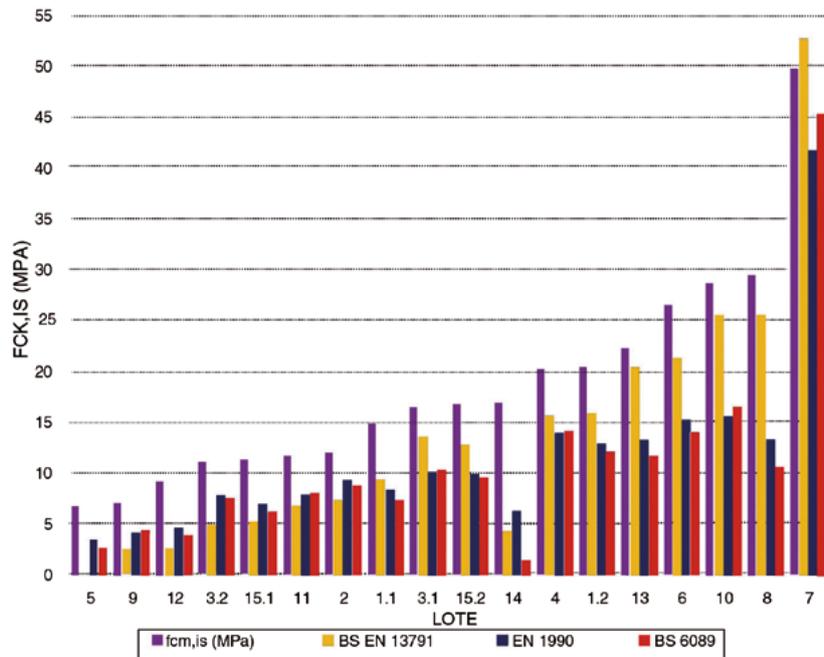


Figura 1. Comparación de los valores de  $f_{ck, is}$  calculados según las normativas europeas [2,9,13].

En la figura 1 se grafican para cada lote los valores correspondientes de  $f_{cm, is}$  y de  $f_{ck, is}$  calculados según los métodos de las normativas europeas [2,9,13]. En la misma, donde los lotes fueron organizados en orden ascendente del valor de  $f_{cm, is}$ , puede notarse como en todos aquellos lotes donde la  $f_{cm, is}$  es mayor de 15 MPa (del 8 al 18), excepto en el lote 11, el valor calculado según la BS EN 13791:2007 [9] es superior al calculado según la EN 1990:2002 [13] como promedio un 26% y alcanza valores máximos de hasta 48%. Estos resultados están en concordancia con los reportados por Pucinotti [15] en 2013.

Sin embargo, en el resto de los lotes (1 al 7), que casi en su totalidad presentan valores de  $f_{cm, is}$  por debajo de 12 MPa, el comportamiento es el inverso, o sea los valores calculados según la BS EN 13791:2007 [9] resultan más conservadores que los calculados según la EN 1990:2002 [13]. No obstante, se considera que este hecho no entra en contradicción con la afirmación hecha en el párrafo anterior ni con los resultados de Pucinotti [15], pues en esta última investigación ninguno de los lotes de hormigón analizados presentaba valores de  $f_{cm, is}$  inferiores a los 15 MPa, como en este caso. Estos resultados indican que los métodos de las normativas europeas tienen comportamientos diferentes para valores bajos y altos de  $f_{cm, is}$ .

Al mismo tiempo, observando la figura 1 se pueden constatar dos afirmaciones hechas por Steenberg y Vervuurt [14]: primero al respecto de que los valores calculados según la BS 6089:2010 [2] están mucho más acordes a los que se obtienen al aplicar la EN 1990:2002 [13], y segundo, que en algunos casos, como lo confirma el lote 18, los valores de  $f_{cm, is}$  calculados según la BS EN 13791:2007 [9] pueden ser superiores al valor de  $f_{cm, is}$  del lote, lo que está totalmente en contra de la seguridad estructural.

En la figura 2 se grafican entonces, para cada lote, los valores correspondientes de  $f_{cm, is}$  y de  $f_{ck, is}$  calculados según los métodos de las normativas americanas [6,8]. En la misma, los valores también se han organizado en orden ascendente del valor de  $f_{cm, is}$ . Si se observa cuidadosamente, se puede notar como en todos los casos, a excepción del último lote, el valor de  $f_{ck, is}$  determinado por el método

alternativo del ACI 214.4-10 [6] es superior al método del factor de tolerancia de la misma normativa en un 21% como promedio, alcanzando en algún caso hasta un 74%. Estos resultados están en concordancia con las afirmaciones hechas por Bartlett y MacGregor [20] respecto a que el método del factor de tolerancia resultaba muy conservador. Por otra parte, los valores de  $f_{ck, is}$  calculados según el método del ACI 562-13 [8] presentan valores muy similares a los de obtenidos por el método alternativo, en algunos casos superiores y en otros inferiores, con diferencias promedio menores al 15%. Nótese que en ningún caso el valor de  $f_{ck, is}$  de cada lote supera al de  $f_{cm, is}$  correspondiente.

Para ampliar la comparación, se decidió calcular en qué porcentaje cada uno de los métodos reduce el valor de  $f_{cm, is}$  al calcular el valor de  $f_{ck, is}$  (valores entre paréntesis de la tabla 5).

En la penúltima columna de la tabla 5 se muestran los valores promedio, para cada método, de los porcentajes antes referidos. Nótese que el método del ACI 562-13 [8] y el método alternativo del ACI 214.4-10 [6] presentan reducciones del 29% como promedio del valor de  $f_{cm, is}$  al calcular el valor de  $f_{ck, is}$ , mientras que el método del factor de tolerancia del ACI 214.4-10 [6] presenta un 42%, lo que reafirma que es más conservador que los anteriores.

Por su parte, entre las normativas europeas se confirma que, como promedio, el método de la BS EN 13791 [9] es menos conservador que los métodos de la BS 6089:2010 [2] y la EN 1990:2002 [13].

De manera general, el método alternativo del ACI 214.4-10 [6] y el método del ACI 562-13 [8] son, como promedio, los menos conservadores, mucho menos que el método de la BS EN:13791:2007 [9], al que ya en la normativa BS 6089:2010 [2] y en la literatura [14,15] calificaban de ofrecer valores de  $f_{ck, is}$  en contra de la seguridad estructural. Se confirma la hipótesis lanzada en 2.6 sobre las diferencias que produce en el valor de  $f_{ck, is}$  el nivel de confianza que exigen los métodos de las normas norteamericanas [6,8] y las europeas [2,9,13] analizadas, resultados que concuerdan con los obtenidos por Couto et al. [1]

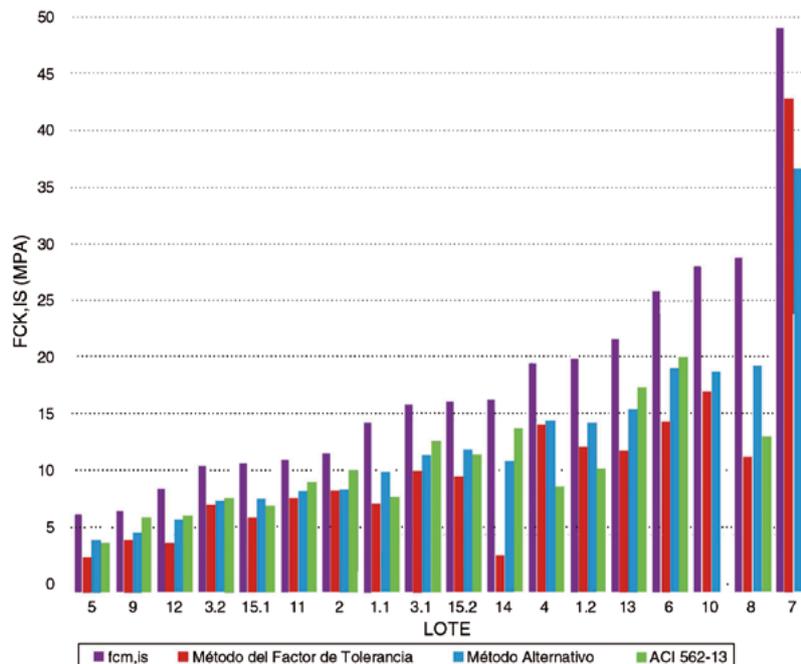


Figura 2. Comparación de los valores de  $f_{ck, is}$  calculados según las normativas norteamericanas [6,8].

Finalmente, en la última columna de la tabla 5 se exponen los valores del coeficiente de variación (CV) de los porcentajes en que cada método reduce la  $f_{cm, is}$  al calcular la  $f_{ck, is}$ . Se considera que estos valores evidencian la sensibilidad de cada uno de los métodos a las características del lote, dígame tamaño de muestra, media o desviación típica. Como se observa, el método alternativo del ACI 214.4-10 [6] presenta un valor de 10,3%, el cual es mucho más bajo que los valores presentados por el resto de los métodos, que oscilan entre el 27,5% y el 60,8%. Se cree que este es un elemento de mucha importancia si se quiere resaltar la calidad de un método sobre otro.

La baja resistencia a compresión que de manera generalizada presentan los casos de estudio es característica de muchas construcciones existentes en Cuba y en La Habana específicamente, donde se cuenta con un amplio patrimonio construido de más de 100 años de existencia. Puede afirmarse que este hecho no influye de forma alguna en los resultados obtenidos, más allá del caso puntual referido donde el método de la BS EN 13791:2007 [9] arrojó un valor negativo de  $f_{ck, is}$  para un lote con 6,73 MPa de  $f_{cm, is}$ .

### Conclusiones

En este trabajo se evaluaron y compararon los valores de  $f_{ck, is}$  que se obtienen al aplicar los métodos de cinco normativas internacionales [2,6,8,9,13] sobre 15 estructuras construidas en el siglo XX en La Habana de las que se extrajeron testigos en las últimas dos décadas.

Resultó evidente la acentuada dispersión que existe entre los valores que se obtienen al aplicar los diferentes métodos normados al estimar la  $f_{ck, is}$  a un mismo lote de hormigón.

Se detectó que el método de la BS EN 13791:2007 [9] presentó problemas en el cálculo de  $f_{ck, is}$  para un valor bajo de  $f_{cm, is}$  de 6,7 MPa, arrojando un valor negativo, mientras que en uno de los casos se obtuvo un valor de  $f_{ck, is}$  superior al valor de  $f_{cm, is}$ , elemento que está totalmente en contra de la segu-

ridad estructural. Por su parte, el método del ACI 562-13 [8] no arrojó valor alguno de  $f_{ck, is}$  para un lote con solo 3 testigos.

Se constató que el método alternativo y el método del ACI 562-13 [8] resultan los menos conservadores, arrojando valores de  $f_{ck, is}$  que reducen como promedio el valor de  $f_{cm, is}$  un 29%. El resto de los métodos presentó un comportamiento bastante similar, con resultados que oscilan alrededor del 40%.

Se evidenció que la diferencia en el nivel de confianza exigido por las normativas americanas [6,8] y europeas —90 y 95%, respectivamente— influye en gran medida en los valores de  $f_{ck, is}$  calculado.

Finalmente, se demostró que los métodos presentan diferente sensibilidad a las características de un lote, dígame tamaño de muestra, media o dispersión en los valores. Destacan el método alternativo del ACI 214.4-10 [6] como el menos sensible, mientras en el otro extremo el método de la BS EN 13791:2007 [9] resulta el más sensible, considerándose este un elemento de peso si se quiere distinguir la calidad de alguno de los métodos evaluados sobre los otros.

### Recomendaciones

Se recomienda realizar una investigación experimental que permita definir cuál de los métodos manejados en la literatura para estimar la resistencia característica a compresión en estructuras construidas a partir de testigos se adecua mejor a las condiciones de Cuba, o, en su lugar, determinar un método propio.

### Agradecimientos

Se agradece a la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) y al Centro de Investigación y Desarrollo de la Construcción (CIDC) por facilitar los informes de diagnósticos de las estructuras que constituyeron los casos de estudio de este trabajo.

Se agradece al Prof. Dr. Paulo Helene por su asesoría.

Anexo A.

Datos asociados al cálculo de  $f_{test,corr}$  para cada testigo

Obra	Testigo	Elemento estructural	$f_{test}$ (MPa)	$F_{h/d}$	$F_{dia}$	$F_{dañ}$	$F_{hum}$	$f_{test,corr}$ (MPa)	Obra	Testigo	Elemento estructural	$f_{test}$ (MPa)	$F_{h/d}$	$F_{dia}$	$F_{dañ}$	$F_{hum}$	$f_{test,corr}$ (MPa)
1	1	Columna	10,5	0,894	1,000	1,06	1	10,0									
	2	Columna	10,3	0,969	1,000	1,06	1	10,6									
	3	Columna	18,6	0,995	1,000	1,06	1	19,6									
	4	Losa	17,8	0,948	1,000	1,06	1	17,9									
	5	Losa	15,6	0,936	1,000	1,06	1	15,5									
	6	Losa	15,9	0,925	1,000	1,06	1	15,6									
	7	Viga	19,6	0,886	1,000	1,06	1	18,4									
	8	Viga	16,4	0,987	1,000	1,06	1	17,1									
	9	Viga	19,3	1,000	1,000	1,06	1	20,4									
	10	Viga	21,6	1,000	1,000	1,06	1	22,9									
	11	Viga	26,3	0,984	1,000	1,06	1	27,4									
	12	Viga	15,3	1,000	1,000	1,06	1	16,2									
2	1	Viga	14,3	1,000	1,036	1,06	1	15,7									
	2	Viga	12,1	0,977	1,036	1,06	1	13,0									
	3	Viga	10,3	1,000	1,036	1,06	1	11,3									
	4	Viga	11,5	0,998	1,036	1,06	1	12,7									
	5	Viga	10,8	0,943	1,036	1,06	1	11,1									
	6	Viga	12,5	0,983	1,036	1,06	1	13,5									
	7	Columna	10,4	0,994	1,036	1,06	1	11,4									
	8	Columna	9,9	1,000	1,036	1,06	1	10,8									
	9	Columna	8,5	1,000	1,036	1,06	1	9,4									
3	1	Columna	12,9	1,000	1,036	1,06	1	14,2									
	2	Columna	12,9	1,000	1,036	1,06	1	14,2									
	3	Columna	13,8	0,990	1,036	1,06	1	15,0									
	4	Columna	20,4	0,991	1,036	1,06	1	22,2									
	5	Columna	16,8	0,988	1,036	1,06	1	18,2									
	6	Columna	11,0	0,988	1,036	1,06	1	12,0									
	7	Viga	18,3	0,917	1,036	1,06	1	18,5									
	8	Viga	14,6	0,993	1,036	1,06	1	15,9									
	9	Viga	14,6	0,993	1,036	1,06	1	15,9									
	10	Viga	12,4	0,999	1,036	1,06	1	13,6									
	11	Viga	16,5	0,993	1,036	1,06	1	18,0									
	12	Viga	11,3	0,982	1,036	1,06	1	12,2									
	13	Viga	21,5	0,982	1,036	1,06	1	23,2									
	14	Losa	13,5	0,876	1,036	1,06	1	13,0									
	15	Losa	9,1	0,874	1,036	1,06	1	8,7									
	16	Losa	11,6	0,875	1,036	1,06	1	11,1									
	17	Losa	8,8	0,937	1,036	1,06	1	9,1									
	18	Losa	12,4	0,915	1,036	1,06	1	12,5									
	19	Losa	11,6	0,924	1,036	1,06	1	11,7									
4	1	Losa	17,3	1,000	1,000	1,06	1	18,4									
	2	Losa	18,3	0,991	1,000	1,06	1	19,2									
	3	Losa	17,9	1,000	1,000	1,06	1	19,0									
	4	Losa	22,7	1,000	1,000	1,06	1	24,0									
5	1	Losa	9,0	0,919	1,000	1,06	1	8,8									
	2	Losa	4,9	0,918	1,000	1,06	1	4,8									
	3	Losa	7,2	0,990	1,000	1,06	1	7,5									
	4	Losa	6,0	0,918	1,000	1,06	1	5,8									
6	1	Viga	26,1	0,970	1,000	1,06	1	26,9									
	2	Viga	30,9	0,971	1,000	1,06	1	31,8									
	3	Viga	13,9	0,948	1,000	1,06	1	13,9									
	4	Viga	24,7	0,989	1,000	1,06	1	25,9									
	5	Viga	19,9	0,989	1,000	1,06	1	20,9									
	6	Viga	25,0	0,989	1,000	1,06	1	26,2									
									7		Losa	25,0	0,939	1,036	1,06	1	25,8
											Losa	30,1	0,905	1,000	1,06	1	28,9
											Losa	24,5	0,881	1,000	1,06	1	22,9
											Losa	19,4	0,895	1,000	1,06	1	18,4
											Losa	27,1	0,882	1,000	1,06	1	25,3
											Losa	43,8	0,889	1,000	1,06	1	41,3
											Losa	36,7	0,886	1,036	1,06	1	35,7
									7	1	Muro	44,5	0,961	1,036	1,06	1	47,0
										2	Muro	49,4	0,974	1,036	1,06	1	52,9
										3	Muro	46,8	0,998	1,036	1,06	1	51,3
										4	Muro	47,8	0,983	1,036	1,06	1	51,6
										5	Muro	45,1	0,965	1,036	1,06	1	47,9
										6	Muro	44,8	0,999	1,036	1,06	1	49,2
										7	Muro	44,5	0,999	1,036	1,06	1	48,8
										8	Muro	48,8	0,998	1,036	1,06	1	53,4
										9	Muro	43,5	0,999	1,036	1,06	1	47,7
										10	Muro	42,5	0,998	1,036	1,06	1	46,6
									8	1	Viga	38,2	1,000	1,036	1,06	1	42,0
										2	Viga	21,8	1,000	1,036	1,06	1	23,9
										3	Viga	43,2	1,000	1,036	1,06	1	47,4
										4	Viga	27,4	0,934	1,036	1,06	1	28,0
										5	Viga	29,7	1,000	1,036	1,06	1	32,6
										6	Viga	15,8	1,000	1,036	1,06	1	17,4
										7	Viga	19,8	1,000	1,036	1,06	1	21,7
										8	Viga	18,1	0,982	1,036	1,06	1	19,5
										9	Viga	29,0	1,000	1,036	1,06	1	31,8
									9	1	Columna	6,7	1,000	1,036	1,06	1	7,3
										2	Columna	5,6	1,000	1,036	1,06	1	6,2
										3	Columna	8,7	1,000	1,036	1,06	1	9,6
										4	Columna	6,0	1,000	1,036	1,06	1	6,6
										5	Columna	7,8	1,000	1,036	1,06	1	8,5
										6	Columna	4,6	1,000	1,036	1,06	1	5,0
										7	Viga	7,4	1,000	1,036	1,06	1	8,1
										8	Viga	4,4	0,968	1,036	1,06	1	4,7
										9	Viga	5,3	1,000	1,036	1,06	1	5,8
										10	Viga	7,6	1,000	1,036	1,06	1	8,3
										11	Viga	7,4	0,997	1,036	1,06	1	8,1
										12	Viga	5,0	1,000	1,036	1,06	1	5,5
									10	1	Losa	27,0	0,968	1,036	1,06	1	28,7
										2	Losa	22,9	0,962	1,036	1,06	1	24,2
										3	Losa	32,0	0,935	1,036	1,06	1	32,8
									11	1	Columna	12,6	0,997	0,990	1,06	1	13,2
										2	Columna	12,9	1,000	0,990	1,06	1	13,6
										3	Columna	10,5	1,000	0,990	1,06	1	11,0
										4	Columna	8,8	1,000	0,990	1,06	1	9,3
										5	Columna	13,4	1,000	0,990	1,06	1	14,0
										6	Columna	11,9	1,000	0,990	1,06	1	12,5
										7	Columna	9,6	1,000	0,990	1,06	1	10,1
										8	Columna	8,6	1,000	0,990	1,06	1	9,1
									12	1	Columna	8,4	0,973	1,000	1,06	1	8,7
										2	Columna	5,3	0,969	1,000	1,06	1	5,4
										3	Columna	8,3	0,874	1,000	1,06	1	7,7
										4	Viga	12,1	0,975	1,000	1,06	1	12,5
										5	Viga	12,4	0,894	1,000	1,06	1	11,8

Obra	Testigo	Elemento estructural	$f_{test}(MPa)$	$F_{h/d}$	$F_{dia}$	$F_{dañ}$	$F_{hum}$	$f_{test,corr}(MPa)$
13	6	Viga	8,3	0,968	1,000	1,06	1	8,5
	1	Losa	32,9	0,965	1,030	1,06	1	34,7
	2	Losa	21,3	0,959	1,030	1,06	1	22,3
	3	Losa	19,5	0,909	1,030	1,06	1	19,3
	4	Losa	15,3	0,955	1,030	1,06	1	16,0
	5	Losa	24,1	0,934	1,030	1,06	1	24,6
	6	Losa	21,3	0,938	1,030	1,06	1	21,9
	7	Losa	13,4	0,927	1,030	1,06	1	13,6
	8	Losa	25,5	0,943	1,030	1,06	1	26,3
	9	Losa	20,9	0,896	1,030	1,06	1	20,4
	10	Losa	30,1	0,905	1,030	1,06	1	29,8
	11	Losa	19,9	0,911	1,030	1,06	1	19,8
14	12	Losa	17,7	0,901	1,030	1,06	1	17,4
	1	Losa	14,8	0,958	1,036	1,06	1	15,6
	2	Losa	14,4	0,963	1,036	1,06	1	15,2
	3	Losa	9,8	0,961	1,036	1,06	1	10,4
	4	Losa	9,3	0,950	1,036	1,06	1	9,7
	5	Losa	37,2	0,975	1,036	1,06	1	39,9
	6	Losa	35,6	0,982	1,036	1,06	1	38,4
	7	Losa	10,6	0,949	1,036	1,06	1	11,1
	8	Losa	10,0	0,977	1,036	1,06	1	10,7
	9	Losa	5,8	0,977	1,036	1,06	1	6,2
	10	Losa	6,9	0,961	1,036	1,06	1	7,3
	11	Losa	11,9	0,941	1,036	1,06	1	12,3
	12	Losa	10,9	0,983	1,036	1,06	1	11,7
13	Losa	15,1	0,974	1,036	1,06	1	16,2	
14	Losa	13,7	0,972	1,036	1,06	1	14,6	
15	Losa	19,0	0,975	1,036	1,06	1	20,3	
16	Losa	20,1	0,984	1,036	1,06	1	21,7	
17	Losa	21,6	0,964	1,036	1,06	1	22,8	
18	Losa	22,3	0,940	1,036	1,06	1	23,0	
19	Losa	13,8	0,932	1,036	1,06	1	14,1	
20	Losa	15,1	0,936	1,036	1,06	1	15,5	
15	1	Columna	8,4	0,921	1,000	1,06	1	8,2
	2	Columna	13,6	0,938	1,000	1,06	1	13,6
	3	Columna	11,0	0,937	1,000	1,06	1	10,9
	4	Columna	9,7	0,923	1,000	1,06	1	9,5
	5	Columna	15,6	0,919	1,000	1,06	1	15,2
	6	Columna	10,4	0,933	1,000	1,06	1	10,3
	7	Viga	16,2	0,953	1,000	1,06	1	16,4
	8	Viga	14,9	0,948	1,000	1,06	1	15,0
	9	Viga	10,5	0,967	1,000	1,06	1	10,8
	10	Viga	15,6	0,962	1,000	1,06	1	15,9
	11	Viga	22,0	0,905	1,000	1,06	1	21,1
	12	Viga	12,3	0,953	1,000	1,06	1	12,5
	13	Viga	15,6	0,964	1,000	1,06	1	15,9
	14	Viga	22,6	0,901	1,000	1,06	1	21,5
	15	Viga	21,5	0,945	1,000	1,06	1	21,5

## Bibliografía

- [1] D. Couto, M. Carvalho, A. Cintra, P. Helene, Estruturas de Concreto Contribuição à Análise da Segurança em Estruturas Existentes, RIEMRevista IBRACON de Estruturas e Materiais 8 (3) (2015).
- [2] Institute BS. BS 6089:2010 Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components — Complementary guidance to that given in BS EN 13791, 2010.
- [3] Institute BS. BS EN 12504-1:2009 Testing Concrete in Structures. Part 1: Cored specimens — Taking, examining and testing in compression, 2009.
- [4] 24, A.T. Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete, 2009.
- [5] Certificación A.E.D.N.Y., UNE-EN 13791:2007. Evaluación de la resistencia a compresión in-situ en estructuras y elementos prefabricados de hormigón, 2007: Madrid, España.
- [6] Institute AC. ACI 214.4R-10 Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results, 2010: Farmington Hills, MI, USA.
- [7] Institute AC. ACI 318-11 Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary, 2011: Farmington Hills, MI, USA.
- [8] Institute AC. ACI 562M-13 Code Requirements for Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Concrete Buildings and Commentary, 2013: Farmington Hills, MI, USA.
- [9] Institute BS. BS EN 13791:2007 Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components, 2007.
- [10] Normalización O.N.D., NC 318:2015 Ensayos al hormigón — Muestreo, preparación y ensayo de testigos de hormigón (ISO 1920-6: 2004, MOD), 2015.
- [11] Normalización O.N.D., NC 724:2015 Ensayos del hormigón — Resistencia del hormigón en estado endurecido (ISO 1920-4:2005, MOD), 2015: Calle E No, 261 Vedado, La Habana, Cuba.
- [12] Normalización O.N.D., NC 1109:2015 Estimación de la resistencia a compresión de los hormigones en las estructuras, 2015: Calle E No, 261 Vedado, La Habana, Cuba.
- [13] Normalización C.E.d., EN 1990:2002 Eurocode 1: Basis of structural design, 2002: Brussels.
- [14] R. Steenbergen, A. Vervuurt, Determining the in situ concrete strength of existing structures for assessing their structural safety, Structural Concrete 13 (1) (2012) 27–31.
- [15] R. Pucinotti, Assessment of in situ characteristic concrete strength, Construction and Building Materials 44 (2013) 63–73.
- [16] M. Cristofaro, M. De Stefano, R. Pucinotti, M. Tanganelli. Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in-situ. 15 Congresso AIPnD, At Trieste, 2013.
- [17] M.T. Cristofaro, R. Nudo, M. Tanganelli, A. D'Ambrisi, M. De Stefano, R. Pucinotti, et al., Issues concerning the assessment of concrete compressive strength in existing buildings: Application to a case study, Structural Concrete (2017).
- [18] Materials A.S.f.T. ASTM C 42/C 42M-04 Test for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete, 2004: ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO, USA.
- [19] K.R. Hindo, W.R. Bergstrom, Statistical evaluation of the in-place compressive strength of concrete, Concrete International (1985).
- [20] F.M. Bartlett, J.G. MacGregor, Equivalent specified concrete strength from core test data, Concrete International 17 (3) (1995) 52–58.
- [21] Association C.S. CAN/CSA-S6-06 Canadian Highway Bridge Design Code, 2006.
- [22] EN 1990. Eurocode. Basis of structural design, 2002.
- [23] Normalización C.E.D. NC 54-122:1986 Materiales y productos de la construcción, hormigón, extracción y preparación de testigos cilíndricos, 1986.
- [24] Normalización O.N.D. NC 318: 2003 Hormigón endurecido, extracción y preparación de testigos cilíndricos, 2003: Calle E No, 261 Vedado, La Habana, Cuba.