

PRECISIÓN DE LAS PRUEBAS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO CON ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE DIFERENTES TAMAÑOS

Hosein Taghaddos, Hamid R. Soleymani, y J. D. (Dave) Robson*

La mayoría de las agencias de estandarización permiten que se usen especímenes cilíndricos pequeños (100 x 200 mm [4 x 8 pulg]) en las pruebas de resistencia a compresión del concreto. Sin embargo, algunos ingenieros todavía se muestran escépticos en cuanto a usar cilindros pequeños, ya que ellos creen que los resultados de las pruebas de resistencia a compresión de los cilindros pequeños son demasiado variados. Se han llevado a cabo estudios limitados con relación a la precisión de los cilindros pequeños comparados con los estudios de precisión para los cilindros convencionales (150 x 300 mm [6 x 12 pulg]). Este documento describe los resultados de un programa comparativo de pruebas al concreto realizado por 15 laboratorios en Edmonton, AB, Canadá, en los últimos 10 años. Este estudio intentó desarrollar índices de precisión dentro de un laboratorio (repetibilidad) y entre laboratorios (reproducibilidad) para especímenes de concreto pequeños y convencionales, analizando más de 2700 datos de pruebas de resistencia a compresión del concreto dentro de un rango de resistencias a compresión de 17 a 57 MPa (175 a 588 kg/cm²).

INTRODUCCION

El uso de pequeños cilindros de concreto (100 x 200 mm [4 x 8 pulg]) ofrece varias ventajas en las pruebas de resistencia a compresión, en el control de calidad y en el aseguramiento de la calidad del concreto de cemento hidráulico. Estas ventajas incluyen: almacenamiento y protección más fáciles en los sitios de construcción, baños de curado más pequeños y un espacio reducido para el almacenamiento, manejo más fácil, y una máquina de menor capacidad para la resistencia a compresión, para probar los especímenes (Detwiller et al. 2006).

El ASTM C31/C31M-09 permite cilindros convencionales (150 x 300 mm [6 x 12 pulg]), así como también pequeños cilindros para las pruebas de resistencia a compresión del concreto. El ACI 318-08 permite usar cilindros pequeños o cilindros convencionales; sin embargo, si se usan cilindros pequeños, se requiere de un cilindro adicional (tres en vez de dos) para representar un resultado de pruebas. En Canadá, el uso de dos pequeños cilindros, o bien dos cilindros convencionales, era normal hasta

*Hosein Taghaddos, Candidato a Doctor en Ciencias por la Hole School of Construction Engineering en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental en la Universidad de Alberta, Edmonton, AB, Canadá. Obtuvo su Licenciatura y Maestría en la Universidad de Teherán, Irán.

Hamid R. Soleymani, Ingeniero en Pavimentos y Materiales, ERA Engineering Consultants Ltd., Edmonton, AB, Canadá. Miembro adjunto, Facultad del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Alberta. Doctorado en Universidad de Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canadá.

J.D. (Dave) Robson, Especialista Principal, ERA Engineering Consultants Ltd., Edmonton, AB, Canadá. Recibió su Licenciatura en la Universidad de Toronto, Toronto, ON, Canadá. Expresidente del Capítulo Alberta del ACI, y actualmente miembro del Comité 229, Materiales de Baja Resistencia Controlada, del ACI. Publicado en ACI Materials Journal, V. 107, No. 5, September-October 2010.

el año 2000. Las indicaciones más recientes emitidas por la Asociación Canadiense de Normas (CSA A23.1-00, -04, -09) exigen usar un mínimo de dos especímenes cilíndricos pequeños para las pruebas de resistencia a compresión del concreto cuando se satisfacen las limitaciones de tamaño y agregados en CSA A23.2-3C. Sin embargo, los especímenes cilíndricos convencionales deben ser usados para tamaños de agregados que sean mayores que 28 mm (1.25 pulg), o en situaciones específicas tales como pruebas de resistencia autógenas o en concreto sin revenimiento.

Una desventaja percibida al usar especímenes de concreto más pequeños en la resistencia a compresión del concreto, es la precisión de sus resultados de prueba. Algunos ingenieros aún se muestran escépticos de usar cilindros pequeños debido a su mayor variabilidad en las pruebas y a la falta de índices de precisión, si se compara con los cilindros convencionales.

De acuerdo con ASTM E177-08, los índices de precisión en las pruebas de materiales incluyen el límite de una sigma (1s) y el límite de la diferencia de dos sigmas (d2s), o el límite de 95%. El límite de un sigma es el índice de precisión fundamental y denota la desviación estándar (SD: standard deviation) de los resultados obtenidos de un estudio interlaboratorio. En algunos casos, la SD se divide por el promedio y se expresa como el coeficiente de variación (COV: coefficient of variation). El límite d2s o 95% indica que la "máxima diferencia aceptable entre dos resultados que no sería excedida en el largo plazo en el 95% de los casos". Estos índices de precisión pueden ser calculados para condiciones dentro de un laboratorio o entre dos laboratorios.

Los índices de precisión existentes en el ASTM y CSA están basados en algunos estudios de

investigación limitados. Los actuales índices de precisión para la resistencia a compresión del concreto curado bajo condiciones de campo o de laboratorio, tal como se define en CSA A23.2-3C, se presentan en la Tabla 1, con base en ASTM C39/C39M-09a y CSA A23.2-9C. Son los índices de precisión de ASTM para especímenes cilíndricos de 150 x 300 mm (2 x 12 pulg) derivados de los datos de muestras de referencia del concreto del Laboratorio de Referencia del Cemento y del Concreto (CCRL: Concrete and Cement Reference Laboratory) para condiciones de laboratorio, y una colección de 1265 reportes de pruebas de 225 laboratorios comerciales de pruebas en 1978. El ASTM enfatiza que el Subcomité C09.61 del ASTM reexaminará los recientes datos del programa y los datos de campo de las muestras de referencia del concreto del CCRL, para ver si estos valores son representativos de la práctica actual, y si pueden extenderse para cubrir un rango más amplio de resistencias y de tamaños de los especímenes (ASTM C39/C39M-09). El ACI 318-08 aconseja tener precaución al usar especímenes pequeños y exige un cilindro de prueba pequeño adicional debido a su mayor variabilidad.

SIGNIFICADO DE LA INVESTIGACION

Debido a que durante mucho tiempo se han usado especímenes cilíndricos convencionales, son más los estudios que han investigado su precisión; sin embargo, estudios limitados han tratado de determinar los índices de precisión para especímenes pequeños de concreto (100 x 200 mm [4 x 8 pulg]). Es esencial llevar a cabo más estudios con varias condiciones para desarrollar índices de precisión más amplios de las pruebas para especímenes cilíndricos pequeños de concreto. El objetivo de este

Tabla 1. Índices de precisión ASTM C39/C39M-05 y CSA A23.2-9C para la resistencia a compresión del concreto

Estándar	Tipo	Tamaño del cilindro, mm (pulg)	Rango de resistencia, MPa (kg/cm ²)	Condición de curado		COV, %	Límite de 95%, %
ASTM	Interlaboratorio	150 x 300 (6 x 12)	15 a 55 140 a 560	Condiciones de curado en laboratorio		2.40	6.6
		100 x 200 (4 x 8)		Condiciones de curado en campo		2.90	8.0
				Condiciones de curado en laboratorio		3.20	9.0
	Entre laboratorios	150 x 300 (6 x 12)	17 a 90 175 a 914	Condiciones no especificadas		5.00	14.00
CSA	Entre laboratorios	150 x 300 (6 x 12)	24 a 53 245 a 541	Condiciones no especificadas	Resistencia a 7 días	3.89	11.0
					Resistencia a 28 días	3.44	9.7

estudio es desarrollar índices de precisión para la resistencia a compresión de pequeños especímenes de concreto, y validar los índices de precisión existentes para especímenes cilíndricos convencionales de concreto. Los resultados de este estudio pueden usarse para su consideración en las normas de ASTM y CSA.

REVISION DE LA LITERATURA

La precisión en la prueba de materiales es un factor importante en el proceso de control de calidad. El ASTM E691-09 define la precisión dentro de un laboratorio (repetibilidad) y la precisión entre laboratorios (reproducibilidad) como sigue:

“La repetibilidad tiene que ver con la variabilidad entre resultados de prueba independientes obtenidos dentro de un solo laboratorio en el periodo de tiempo más corto posible por un solo operador, con un conjunto específico de aparatos de prueba, usando especímenes de prueba (o unidades de prueba) tomados al azar de una cantidad única de material homogéneo obtenido o preparado para el Estudio de Interlaboratorio (ILS: Inter Laboratory Study). La reproducibilidad tiene que ver con la variabilidad entre resultados de una prueba única, obtenidos en diferentes laboratorios, cada uno de los cuales ha aplicado el método de prueba a los especímenes de prueba (o unidades de prueba) tomados al azar, de una cantidad única de material homogéneo obtenido o preparado para el ILS”.

Las declaraciones de precisión de la resistencia a compresión del concreto se basan en la variación medida en laboratorios individuales de los cilindros compañeros cuando todos los otros factores afectantes dentro del laboratorio, tales como el operador o el equipo, no cambian. La precisión entre dos laboratorios es la estimación cuantitativa de la variación de los resultados de prueba de varios laboratorios que son obtenidos según las operaciones ordinarias de cada laboratorio. Se espera que los índices de precisión entre laboratorios sean más grandes que los índices de precisión dentro de un laboratorio, debido al involucramiento de diferentes operadores y aparatos en los laboratorios de prueba (ASTM C670). El método para calcular la precisión dentro de un laboratorio y entre laboratorios se explica brevemente en el Apéndice A, con base en ASTM E691-09 y C802-09a.

Varios estudios han propuesto índices de precisión dentro de un laboratorio y entre laboratorios para cilindros de 150 x 300 mm (6 x 12 pulg) (Gray 1990, Kennedy et al. 1995). Para cilindros de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg), Lobo (2005, 2006, 2007) reportó los índices de precisión entre un laboratorio y entre laboratorios para las condiciones de curado del laboratorio. Detwiler et al. (2006) sugirieron índices de precisión para cilindros de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg) curados bajo condiciones de campo. Debido a los datos limitados, Detwiler et al. (2006) sugirieron llevar a cabo programas de prueba adicionales para confirmar los resultados del estudio. Los resul-

Tabla 2. COVs para cilindros de concreto de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg) y 150 x 300 (6 x 12 pulg) curados bajo condiciones de campo y de laboratorio (Detwiler et al. 2006; Lobo 2005, 2006, 2007)

Condición de curado del estudio	Resistencia del concreto	Rango de resistencia, MPa (kg/cm ²)	COV			
			100 x 200 mm (4 x 8 pulg)		150 x 300 mm (6 x 12 pulg)	
			Interlaboratorio	Entre laboratorios	Interlaboratorio	Entre laboratorios
Detwiler et al. (2006) Condiciones de campo	Baja	<52 (527)	-	4.07	Se probó un cilindro de 150 x 300 mm (6 x 12 pulg)	
	Mediana	>52 (527)	-	5.66		
	Promedio		2.86	4.71		
Lobo (2005) Condiciones de laboratorio	Baja	<30 (302)	2.9	5.5	2.2	4
	Mediana	>47 (478)	2.5	5.4	2.7	5.3
Lobo (2006) Condiciones de laboratorio	Baja	<40 (407)	3.3	6.7	2	4.9
	Mediana	>45 (457)	4.1	6.6	2.5	5.5
Lobo (2007) Condiciones de laboratorio	Baja	<41 (414)	3.2	6.1	3	6.2
	Mediana	>44 (449)	2.7	7.1	2.6	5.2
Promedio de los resultados de Lobo			3.1	6.2	2.5	5.2

tados de los estudios de Lobo (2005, 2006, 2007) y Detwiler et al. (2006) se resumen en la Tabla 2.

Un estudio más amplio por Day (1994) investigó cerca de 8000 resultados de pruebas de resistencia a compresión del concreto de varias mezclas de concreto que fueron recolectadas de 20 experimentos diferentes. Se llegó a la conclusión de que la resistencia a compresión de los especímenes de concreto, de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg), con moldes de plástico o de acero, fue 5% más grande que los especímenes de concreto de 150 x 300 mm (6 x 12 pulg). También se llegó a la conclusión de que en un promedio total, los COVs de la resistencia del concreto dentro de un laboratorio, para especímenes de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg) y 150 x 300 mm (6 x 12 pulg), eran casi equivalentes.

Nasser y Al-Manaseer (1987) demostraron que si se usan tres muestras para especímenes tanto de 150 x 300 mm (6 x 12 pulg) como de 75 x 150 mm (3 x 6 pulg), el COV interlaboratorio de la resistencia a 28 días típicamente se incrementa del 3.7% al 8.5% para especímenes de concreto de 150 x 300 mm (6 x 12 pulg), para los especímenes de concreto de 75 x 150 mm (3 x 6 pulg). Ellos sugirieron usar un número más grande de especímenes de concreto de 75 x 150 mm (3 x 6 pulg) para alcanzar la misma precisión que los especímenes de concreto de 150 x 300 mm (6 x 12 pulg).

Detwiler et al. (2009) compararon los COVs interlaboratorio de muestras de concreto de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg) cuando se probaron dos o tres muestras. Para dos niveles de resistencia a compresión (34.5 MPa [351.8 kg/cm²] y 34.5 MPa [351.8 kg/cm²]), los resultados de las pruebas COVs interlaboratorio de tres cilindros fueron de 2.5% y 2.6% respectivamente, mientras que los resultados de las pruebas COVs interlaboratorio para dos cilindros, fueron de 2.1% para ambos niveles de resistencia. Ellos concluyeron que no hay una diferencia significativa entre las pruebas de dos o tres cilindros de muestras de concreto de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg).

ALCANCE Y OBJETIVOS

Se analizaron más de 2700 resultados de pruebas de resistencia a compresión del concreto de los estudios interlaboratorio controlados, recolectados durante una década en Edmonton, AB, Canadá. Este estudio fue la base para desarrollar índices de precisión para cilindros de pruebas al concreto de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg) y para validar los índices de precisión existentes para especímenes de concreto de 150 x 300 mm (6 x 12 pulg).

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este estudio se basó en un amplio programa de pruebas comparativas al concreto en Edmonton en 1994 a 2003, administrado por la Asociación de Concreto Premezclado de Alberta (ARMCA). El propósito del programa de pruebas comparativas al concreto ILS de la ARMCA, conocido como el "programa ARMCA" en este documento, fue medir la uniformidad de los laboratorios participantes al medir la resistencia a compresión del concreto.

Todas las mezclas de concreto se hicieron con las mismas fuentes de agregado. El agregado era grava silícea de río con un tamaño máximo nominal de 20 mm (3/4 pulg). La granulometría de los agregados gruesos satisfacía CSA A23.1-09. Se usó un cemento portland de uso general (GU: general use) para todas las mezclas de concreto.

En este programa, las revolturas de concreto para las pruebas fueron entregadas por cuatro productores de concreto premezclado y cada año se colaron un gran número de cilindros. Después de 20±4 horas de curado especial a temperaturas ambientales de 15 a 25 °C (59 a 77°F), cada laboratorio participante recibió un conjunto de especímenes cilíndricos al azar (3, 5 o 7).

Las pruebas estándar de curado y compresión se realizaron de acuerdo con CSA A23.2-3C y A23-2-9C. El programa ARMCA incluía 33 programas de pruebas ILS durante 10 años, mientras que cada año participaban de 8 a 15 laboratorios. En este experimento se probaron un total de 2745 cilindros, abarcando 1486 cilindros convencionales con un rango de resistencia a compresión de 19 a 57 MPa (193.3 kg/cm² a 580 kg/cm²) y 1239 cilindros pequeños con un rango de resistencia a compresión de 17 a 54 MPa (175.7 kg/cm² a 548.4 kg/cm²). En 1995, 1997, 1998 y 1999, no se probaron cilindros de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg), y en 2002 y 2003 no se probaron cilindros de 150 por 300 mm (6 x 12 pulg).

El programa ARMCA se llevó a cabo de manera anónima; consecuentemente, no se registró información con respecto a los métodos de curado (cuartos húmedos, o baño de agua), métodos de cabeceado (azufre, no adherido, o extremos esmerilados) y el tipo de máquinas de pruebas de resistencia a compresión usados en cada laboratorio. Por lo tanto, no fue posible estudiar los efectos de estos factores; sin embargo, un estudio ha demostrado (Gray 1990) que la influencia de estos parámetros sobre la resistencia a compresión del concreto no es significativa.

Tabla 3. Ejemplo de resultados de pruebas del programa ARMCA en 2003

Fecha	No. de Laboratorio	Resistencia medida (MPa) de cilindros de 100 x 200 mm					Parámetros estadísticos			Controles de externos	
		No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	\bar{x}	s	d	$h= d/S_z$	$k= s/s_r$
2003/1	1	22.3	22.9	22.9	23.1	23.8	23.0	0.539	-0.67	OK	OK
	2	24.3	24.7	24.7	24.9	26.4	25.0	0.812	1.33	OK	OK
	3	21.9	22.5	23.0	23.7	23.9	23.0	0.831	-0.67	OK	OK
	4	24.5	25.1	25.1	25.2	25.8	25.1	0.462	1.47	OK	OK
	5	22.6	22.6	23.0	23.1	23.2	22.9	0.283	-0.77	OK	OK
	6	23.2	26.3	23.4	23.9	24.1	23.6	0.396	-0.09	OK	OK
	7	20.6	21.3	22.6	23.4	25.0	22.6	1.738	-1.09	OK	2.47
	8	24.5	24.6	24.6	24.6	25.1	24.7	0.239	1.01	OK	OK
	9	20.4	20.5	20.5	24.5	20.9	20.6	0.195	-3.11	-2.49	OK
	10	23.4	24.1	24.7	24.7	25.3	24.4	0.72	0.77	OK	OK
	11	23.7	23.7	24.3	24.6	25.6	24.4	0.785	0.71	OK	OK
	12	23.1	23.8	23.8	24.1	24.2	23.8	0.43	0.13	OK	OK
	13	24.4	24.4	25.3	25.3	25.5	25.0	0.536	1.31	OK	OK
	14	22.8	23.4	23.4	23.5	23.7	23.3	0.343	-0.326	OK	OK
			S_R	n	p	\bar{X}	S_r	S_z	critico h	critico k	
			1.3977	5	14	23.67	0.7037	1.2479	1.85	2.44	
2003/2	1	36.2	37.0	37.3	37.6	37.6	37.1	0.581	0.672	OK	OK
	2	34.7	35.0	35.4	35.8	35.8	35.3	0.488	-1.128	OK	OK
	3	31.9	32.2	32.5	32.6	33.2	32.5	0.487	-3.988	-1.91	OK
	4	39.4	39.6	40.4	40.8	41.4	40.3	0.832	3.852	1.85	OK
	5	34.8	36.4	36.5	37.4	38.8	36.8	1.467	0.312	OK	OK
	6	34.5	34.7	35.5	35.5	36.4	35.3	0.756	-1.148	OK	OK
	7	33.7	34.8	34.8	34.9	35.1	34.7	0.55	-1.808	OK	OK
	8	38.0	38.8	39.6	39.7	40.9	39.4	1.084	2.932	OK	OK
	9	35.7	35.8	35.9	36.0	36.2	35.9	0.192	-0.548	OK	OK
	10	34.3	35.2	35.4	36.1	37.3	35.7	1.119	-0.808	OK	OK
	11	35.8	35.8	36.1	36.4	36.6	36.1	0.358	-0.328	OK	OK
	12	37.1	38.1	38.1	38.9	41.5	38.7	1.67	2.272	OK	OK
	13	35.8	36.0	36.3	36.3	36.5	36.2	0.277	-0.288	OK	OK
			S_R	n	p	\bar{X}	S_r	S_z	critico h	critico k	
			2.2254	5	13	36.47	0.8766	2.0827	1.84	2.41	
2003/3	1	30.9	31.0	31.2	31.3	31.4	31.2	0.207	0.862	OK	OK
	2	28.1	28.2	28.4	28.7	28.8	28.4	0.305	-1.858	OK	OK
	3	29.2	29.7	29.7	29.9	30.4	29.8	0.432	-0.518	OK	OK
	4	28.1	28.1	28.3	28.7	29.2	28.5	0.471	-1.818	OK	OK
	5	30.7	31.2	31.2	32.0	32.1	31.4	0.594	1.142	OK	OK
	6	28.4	28.8	30.1	31.2	31.5	30.0	1.387	-0.298	OK	OK
	7	31.1	31.5	31.5	31.8	32.1	31.6	0.374	1.302	OK	OK
	8	29.5	29.6	29.9	30.1	30.5	29.9	0.402	-0.378	OK	OK
	9	30.9	31.1	31.1	31.5	32.1	31.3	0.477	1.042	OK	OK
	10	31.4	31.6	31.6	31.9	31.9	31.7	0.217	1.382	OK	OK
	11	28.5	28.8	28.8	29.1	29.1	28.9	0.251	-1.438	OK	OK
	12	30.1	30.3	30.3	31.6	32.1	30.9	0.907	0.582	OK	OK
			S_R	n	p	\bar{X}	S_r	S_z	critico h	critico k	
			1.3329	5	12	30.3	0.5976	1.2211	1.84	2.38	
2003/4	1	30.5	31.8	31.8	32.1	32.3	31.7	0.704	0.338	OK	OK
	2	30.0	30.4	31.0	31.3	31.4	30.8	0.602	-0.542	OK	OK
	3	31.4	32.0	32.0	32.0	32.2	31.9	0.303	0.558	OK	OK
	4	30.2	31.4	31.5	32.3	33.0	31.7	1.052	0.318	OK	OK
	5	29.9	30.2	30.4	30.7	30.8	30.4	0.367	-0.962	OK	OK
	6	30.5	30.8	31.1	31.5	31.8	31.1	0.522	-0.222	OK	OK
	7	30.6	30.8	30.9	31.1	31.3	30.9	0.27	-0.422	OK	OK
	8	30.6	30.9	31.3	31.8	32.6	31.4	0.789	0.078	OK	OK
	9	32.5	32.6	32.7	32.9	33.5	32.8	0.397	1.478	2.1	OK
	10	31.3	31.5	31.6	31.7	31.9	31.6	0.224	0.238	OK	OK
	11	30.2	30.2	30.7	30.7	30.7	30.5	0.274	-0.862	OK	OK
			S_R	n	p	\bar{X}	S_r	S_z	critico h	critico k	
			0.8642	5	11	31.4	0.5595	0.7045	1.83	2.34	

Nota: un MPa= 9.3750 Kg/cm²

Tabla 4. Resumen de los resultados de valores alejados de las pruebas en el programa ARMCA

Tamaño de cilindro mm (pulg)	Número de cilindros	Valores alejados				Todos los valores alejados		
		Interlaboratorio, k		Entre laboratorios, h		Número	%	
		Número	%	Número	%			
100 x 200 (4 x 8)	1254	3	1.3	Total	18	7.7	19	8.2
				Alejados bajos	13	5.6		
				Alejados altos	5	2.1		
150 x 300 (6 x 12)	1481	5	1.6	Total	21	6.6	24	7.6
				Alejados bajos	16	5.1		
				Alejados altos	5	1.6		

IDENTIFICANDO LOS DATOS VALORES ALEJADOS

Los datos de valores alejados al conjunto de datos fueron identificados y eliminados en este estudio, de acuerdo con el procedimiento bosquejado en ASTM E691-09. Esta norma define los índices críticos de precisión para identificar datos de valores alejados de los laboratorios de prueba. Los valores críticos para la consistencia entre laboratorios (h) dependen del número de laboratorios (p) que participaron en el ILS, mientras que el valor crítico para la consistencia interlaboratorio (k) depende tanto del número de laboratorios (p) como del número de réplicas de los resultados de pruebas (n). El ASTM E691-09 sugiere los valores críticos para h y k en el nivel significativo del 0.5% con base en el número de laboratorios participantes y el número de réplicas.

La Tabla 3 muestra un ejemplo de los resultados de pruebas de resistencia a compresión del concreto de la ARMCA recolectados en 2003, que ilustra el cálculo de las desviaciones estándar y los parámetros de consistencia interlaboratorio y entre laboratorios, de acuerdo con el Apéndice A. Los valores h y k de los programas ARMCA fueron calculados y comparados con los valores críticos presentados en ASTM E691-09 para identificar los datos de valores alejados.

La Tabla 4 resume la información respecto a los datos de valores alejados de prueba en el programa ARMCA. Para ambos tamaños de cilindros, el número de valores alejados con una resistencia a compresión menor al promedio (alejados bajos) fueron más que el doble de los valores alejados con una resistencia a compresión mayor que el promedio (alejados altos). Esto significa que la mayoría de los valores alejados, que muestran una diferencia significativa respecto a la media, estuvieron por

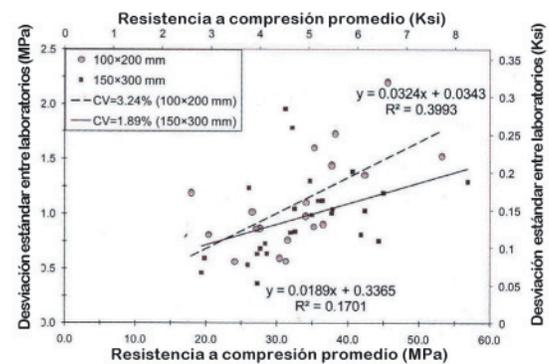


Figura 1. Resultados de las pruebas de SD interlaboratorio versus la resistencia a compresión, del programa ARMCA

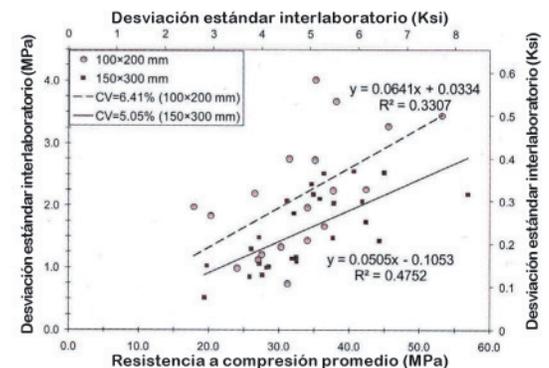


Figura 2. Resultados de las pruebas de SD entre laboratorios versus resistencia a compresión, del programa ARMCA

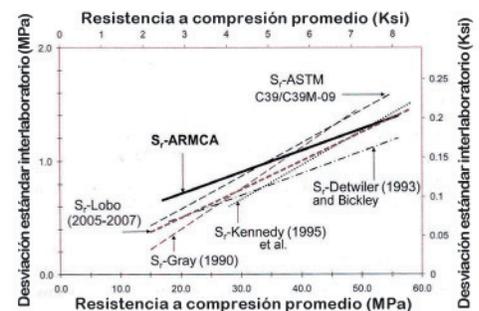


Figura 3. Resultados de SD interlaboratorio versus resistencia a compresión para cilindros de 150 x 300 (6 x 12 pulg), de ARMCA y otros estudios

**Tabla 5 Resumen de las desviaciones estándar interlaboratorio
y entre laboratorios para cilindros de 100 x 200 (4 x 8 pulg) y 150 x 300 (6 x 12 pulg)
del programa de ARMCA**

ILS	Fecha	cilindros de 100 x 200 (4 x 8 pulg)					cilindros de 150 x 300 (6 x 12 pulg)				
		No. de repli- cas	No. de labs.	Promedio	Interla- borato- rio SD	Entre labora- torios SD	No. de repli- cas	No. de labs.	Promedio	Interlabora- torio SD	Entre labo- ratorios SD
				X,MPa	Sr,MPa	SRMPs			X,MPa	Sr,MPa	SRMPa
1	2003/1	5	12	24.02	0.5680	0.9886	No. de cilindros probados de 150 x 300 (6 x 12 pulg)				
2	2003/2	5	11	36.48	0.9076	1.6703					
3	2003/3	5	12	30.30	0.5976	1.3329					
4	2003/4	5	10	31.21	0.5731	0.7398					
5	2002/2	5	11	35.13	0.8884	2.7377					
6	2002/3	5	10	34.03	0.9823	1.9691					
7	2002/4	5	11	34.09	1.1090	1.4388					
8	2001/1	5	13	26.52	1.0220	2.1991	5	11	28.32	0.7286	0.9952
9	2001/2	5	9	31.49	0.7644	2.7579	5	10	35.78	1.1196	2.1076
10	2001/3	5	12	20.30	0.8132	1.8334	5	11	27.20	0.6325	1.4807
11	2001/4	5	10	53.25	1.5309	3.4561	5	12	31.89	0.8314	1.1369
12	1999/1	No. de cilindros probados de 100 x 200 (4 x 8 pulg)					5	11	32.11	1.7849	1.8702
13	1999/2						5	10	26.04	1.2361	1.2964
14	1999/3						5	11	28.57	0.6366	1.0097
15	1999/4						5	8	25.86	0.5323	0.8476
16	1998/2						5	10	32.48	1.0477	1.1625
17	1998/3	No. de cilindros probados de 100 x 200 (4 x 8 pulg)					5	9	40.64	1.3838	2.5529
18	1997/1						5	10	32.53	0.8393	1.0983
19	1997/2						5	10	31.17	1.9563	2.0735
20	1997/3						5	10	34.63	1.3012	2.3462
21	1997/4						5	9	42.37	1.0316	1.7338
22	1996/1	7	10	17.86	1.1916	1.9816	3	10	19.38	0.4612	0.5154
23	1996/2	7	10	38.17	1.7337	3.6806	3	10	37.83	1.0444	2.0368
24	1996/3	7	11	27.58	0.8704	1.2064	3	12	27.62	0.6850	0.8741
25	1996/4	7	12	42.41	1.3597	2.2663	3	12	41.84	1.8108	2.0641
26	1995/1	No. de cilindros probados de 100 x 200 (4 x 8 pulg)					5	15	19.78	0.5935	1.0235
27	1995/2						5	11	56.90	1.2953	2.1826
28	1995/3						5	12	36.38	1.1218	2.5161
29	1995/4						5	14	44.32	0.7538	1.4270
30	1994/1	5	12	27.05	0.8671	1.1238	5	14	27.23	0.3650	1.0566
31	1994/2	5	11	45.55	2.2052	3.2819	5	13	44.98	1.1933	2.5319
32	1994/3	5	14	35.22	1.6078	4.0178	5	14	34.90	0.9925	2.1784
33	1994/4	5	13	37.70	1.4441	2.2443	5	13	37.69	1.0077	1.4756

Nota: 1 MPa= 145 ksi

debajo de la media. Esta observación es consistente con otros estudios, que han demostrado que la mayoría de las anomalías del protocolo de pruebas estándar estuvieron por debajo del promedio de la resistencia a compresión (Plante et al. 2000).

Este proceso dio como resultado la exclusión del 8.2% y 7.6% de los resultados de pruebas de cilindros de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg) y de 150 x 300 mm (6 x 12 pulg), respectivamente, en todos los 33 programas ILS.

Ya que los porcentajes de los datos externos eran casi los mismos para ambos tamaños de cilindros, se puede concluir que el porcentaje de resultados de valores alejados de las pruebas no fue significativamente influenciado por los tamaños de los cilindros en el programa ARMCA.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS DATOS

Después de excluir los valores externos de las pruebas, se calcularon las desviaciones estándar (SDs) interlaboratorio y entre laboratorios para cilindros de concreto pequeños y convencionales. La Tabla 5 presenta un resumen de los cálculos de SDs del programa ARMCA con base en tres, cinco y siete especímenes de prueba en años diferentes.

El análisis de estos resultados reveló que los SDs interlaboratorio y entre laboratorios se incrementan con la resistencia a compresión promedio (Figs. 1 y 2). Se han reportado relaciones similares de otros estudios para condiciones de prueba interlaboratorio y entre laboratorios.

Las ecuaciones de 1 a 4 están basadas en el análisis de los resultados de pruebas de la ARMCA.

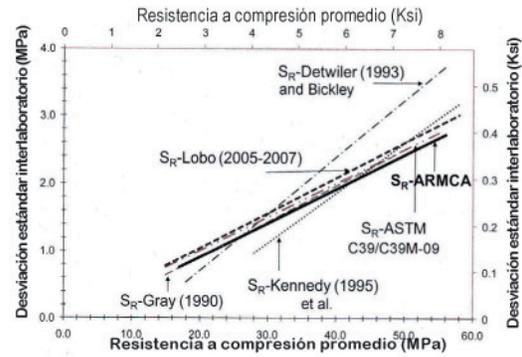


Figura 4. Resultados de SD entre laboratorios versus resistencia a compresión para cilindros de 150 x 300 mm (6 x 12 pulg), de ARMCA y otros estudios

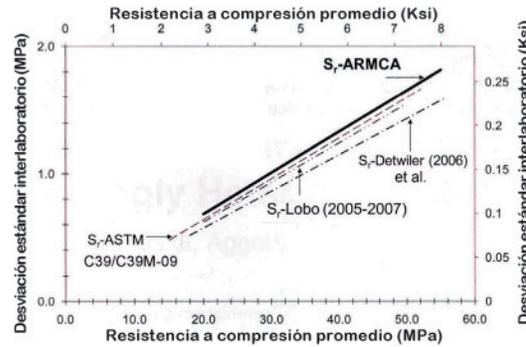


Figura 5. Resultados de SD interlaboratorio versus resistencia a compresión para cilindros de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg), de ARMCA y otros estudios

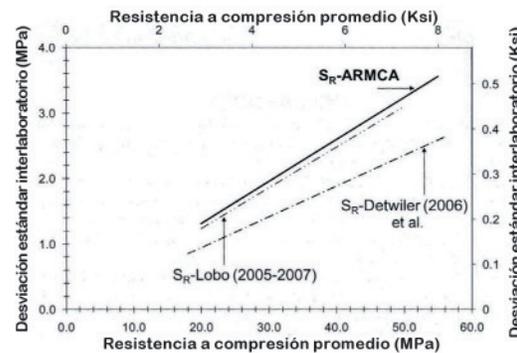


Figura 6. Resultados de SD entre laboratorios versus resistencia a compresión para cilindros de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg), de ARMCA y otros estudios

Tabla 6. COVs interlaboratorio y entre laboratorios del programa ARMCA y otros estudios (condiciones de curado entre paréntesis).

Estudio	COV			
	100 x 200 mm (4 x 8 pulgadas)		150 x 300 mm (6 x 12 pulgadas)	
	Interlaboratorio	Entre laboratorios	Interlaboratorio	Entre laboratorios
ARMCA	3.24 (campo)	6.41 (campo)	1.29 (campo)	5.05 (campo)
ASTMC39/C39M-09a	3.2 (laboratorio)	----	2.9 (campo)	5.0
Gray (1990)	----	----	3.6 (laboratorio)	5.3.(laboratorio)
Detwiler y Bickley (1993)	----	----	1.9	8.4
Kennedy et al (1995)	----	----	3.0	7.4 (campo)
Lobo (2005, 2006, 2007)	3.1 (laboratorio)	6.2 (laboratorio)	2.5 (laboratorio)	5.2 (laboratorio)
Detwiler et al. (2006)	2.86 (campo)	4.71 (campo)	----	----

Tabla 7. COV y rango aceptable interlaboratorio y entre laboratorios propuestos, de las resistencias de dos cilindros curados bajo condiciones de campo

Tamaño del cilindro, mm (pulg)	Rango de resistencia, MPa (kg/cm ²)	COV		95% limite			
		Interlaboratorio	Entre laboratorios	dos cilindros		tres cilindros	
				Interlaboratorio	Entre laboratorios	Interlaboratorio	Entre laboratorios
100 x 200 mm (4 x 8)	17 a 54 (175 a 548)	3.24	6.41	9.1	17.9	10.7	21.2
150 x 300 mm (16 x 12)	19 a 57 (193 a 580)	1.89	5.05	5.3	14.1	6.2	16.7

Para cilindros de concreto de 150 x 300 mm (6 x 12 pulg)

$$Sr = 0.0189f'c + 0.3365 \text{ para interlaboratorio (1)}$$

$$SR = 0.0505 f'c - 0.1053 \text{ para entre laboratorios (2)}$$

Para cilindros de concreto de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg)

$$Sr = 0.0324 f'c + 0.343 \text{ para interlaboratorio (3)}$$

$$SR = 0.0641 f'c + 0.0334 \text{ para entre laboratorios (4)}$$

en donde Sr y SR son las desviaciones estándar interlaboratorio y entre laboratorios, respectivamente y f'c es igual a la resistencia a compresión promedio en MPa. Las anteriores ecuaciones tienen diferentes valores de intercepción en unidades imperiales (ksi), que se muestran en las Figs. 1 y 2. Las pendientes de las líneas son equivalentes a los COVs.

Una observación de las líneas de tendencia es que las SDs de la precisión de pruebas interlaboratorio para cilindros pequeños y convencionales eran casi similares a los bajos niveles de resistencia a compresión (aproximadamente 25 MPa [255 kg/cm²] y por debajo de eso). Cuando la resistencia a compresión se incrementaba desde 25 MPa (255 kg/cm²), la SD de cilindros pequeños se incrementaba con relación a la SD de los cilindros convencionales. Las SDs entre laboratorios de los cilindros pequeños eran más altas que la SD de cilindros convencionales, y la diferencia era casi la misma para el rango de las pruebas de resistencia a compresión en este estudio.

Las Figuras de 2 a 6 presentan las relaciones lineales entre los resultados de pruebas de resistencia a compresión versus SDs interlaboratorio y entre laboratorios del programa ARMCA, así como también indicaciones con base en la norma ASTM y otros estudios. La Tabla 6 compara los COVs in-

terlaboratorio y entre laboratorios para cilindros convencionales y cilindros pequeños del programa ARMCA y los otros programas ILS, tales como ASTM C39/C39M-09a, Gray (1990), Detwiler y Bickley (1993), Kenney et al. (1995), Detwiler et al. (2006), y Lobo (2005, 2006, 2007).

Para cilindros convencionales, los COVs interlaboratorio y entre laboratorios del programa ARMCA fueron de 1.89% y 5.05%, respectivamente (Figs. 3 y 4). La pendiente de la línea interlaboratorio – COV para cilindros convencionales – fue menor que los valores COV sugeridos en la norma ASTM, Kenney et al. (1995), y Gray (1990), y fue ligeramente menor que los resultados de los valores COV de Lobo en 2005, 2006 y 2007. El COV del programa ARMCA estuvo muy cerca del COD sugerido por Detwiler y Bickley (1993). El COV entre laboratorios para cilindros convencionales fue casi el mismo que el COV entre laboratorios propuesto en ASTM C39/C39M-09a, Gray (1990), y Lobo (2005, 2006 y 2007), pero menos que el COV calculado por Detwiler y Bickley (1993) y Kennedy et al. (1995).

Para cilindros de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg), los COVs interlaboratorio y entre laboratorios del programa ARMCA fueron de 3.24% y 6.41%, respectivamente, en el cual ambos COVs estuvieron ligeramente por encima del promedio de los resultados de Lobo en 2005, 2006 y 2007 para especímenes curados bajo condiciones de laboratorio (Figs. 5 y 6). Sin embargo, los COVs del programa ARMCA fueron más altos que el COV encontrado por Detwiler et al. (2006). Las diferencias entre COVs en diferentes estudios pueden ser atribuidos a varios factores, tales como el tamaño del experimento, la condición inicial de curado y otros factores que no fueron considerados en este estudio.

El otro índice de precisión es el d2s o "límite de 95%", el cual se calcula simplemente multiplicando la SD (1s) o el COV (1s%) apropiado por $2\sqrt{2}$

o 2.8 (ASTM C670-03, ASTM E177-08).

Los índices de precisión de la resistencia a compresión interlaboratorio y entre laboratorios para cilindros pequeños y convencionales, con base en los resultados del programa ARMCA, se proponen en la Tabla 7. La diferencia entre dos resultados de prueba de cilindros pequeños de concreto dentro de un laboratorio no deben diferir en más de 9.1% de su promedio, en aproximadamente 95% de todos los casos.

Algunas normas (por ejemplo ACI 318-08) esperan que se pruebe un cilindro adicional si se usan cilindros pequeños de 100 x 200 (4 x 8 pulg). Si se prueban tres muestras en un laboratorio, la diferencia entre los resultados de pruebas más altos y más bajos de la resistencia a compresión del grupo debe ser menor al 10.7% de su promedio en el 95% de los casos.

Los límites de 95% de los resultados de pruebas a compresión entre laboratorios de dos y tres cilindros, para cilindros pequeños, no deben diferir en más del 17.9% y 21.2% de su promedio, respectivamente. Los límites del 95% de las pruebas de dos cilindros para la resistencia a compresión interlaboratorio y entre laboratorios de los cilindros convencionales fueron determinados como 5.3 y 14.1%; para pruebas de tres cilindros, los límites se estimaron en 6.2% y 16.7%.

CONCLUSIONES

En este estudio se analizaron más de 2700 resultados de pruebas de resistencia a compresión del concreto de un programa de 10 años de la ARMCA en Edmonton. Con base en los resultados de pruebas para especímenes de concreto que iban de 17 a 57 MPa (175.7 a 580 kg/cm²), en aproximadamente 95% de todos los casos, los resultados de los datos de la resistencia a compresión para dos cilindros de concreto de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg) difieren en menos del 9.1% para condiciones interlaboratorio y en menos del 17.9% para condiciones entre laboratorio. Los rangos aceptables entre los resultados de las pruebas de resistencia de dos cilindros de concreto de 150 x 300 mm (6 x 12 pulg) para condiciones interlaboratorio y entre laboratorios, se obtuvieron como 5.3% y 14.1%, respectivamente. Los índices de precisión del programa ARMCA se compararon con los índices de precisión sugeridos por la norma ASTM y otros estudios en esta área. Con una expansión en la utilización de cilindros de concreto para pruebas, de 100 x 200 mm (4 x 8 pulg), pueden usarse los resultados de

este estudio y otros experimentos similares para su consideración en las normas de la ASTM y la CSA.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean reconocer y agradecer a los laboratorios participantes de la Asociación de Concreto Premezclado de Alberta (ARMCA).

REFERENCIAS

ACI Committee 318, 2008, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 473 pp.

ASTM C311C31M-09, 2009, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens," ASTM International, West Conshohocken, PA, 6 pp.

ASTM C39/C39M-09a, 2009, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," ASTM International, West Conshohocken, PA, 7 pp.

ASTM C670-03, 2003, "Standard Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials," ASTM International, West Conshohocken, PA, 9 pp.

ASTM C802-09a, 2009, "Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Test Program to Determine the Precision of Test Methods for Construction Materials," ASTM International, West Conshohocken, PA, 18 pp.

ASTM E177-08, 2008, "Standard Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods," ASTM International, West Conshohocken, PA, 12 pp.

ASTM E691-09, 2009, "Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method," ASTM International, West Conshohocken, PA, 23 pp.

CSA A23.1-00, 2000, "Concrete Materials and Methods of Concrete Construction," Canadian Standards Association, Mississauga, ON, Canada, 362 pp.

CSA A23.1-04, 2004, "Concrete Materials and Methods of Concrete Construction," Canadian Standards Association, Mississauga, ON, Canada, 476 pp.

CSA A23.1-09, 2009, "Concrete Materials and Methods of Concrete Construction," Canadian Standards Association, Mississauga, ON, Canada, 582 pp.

CSA A23.2-3C, 2009, "Making and Curing Concrete Compressive and Flexural Test Specimens," Canadian Standards Association, Mississauga, ON, Canada, pp. 441-449.

CSA A23.2-9C, 2009, "Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," Canadian Standards Association, Mississauga, ON, Canada, pp. 472-485.

Day, R.L., 1994, "Strength Measurement of Concrete Using Different Cylinder Sizes: A Statistical Analysis," Cement, Concrete and Aggregates, V. 16, No. 1, June, pp. 21-30.

Detwiler, R.J., and Bickley, J.A., 1993, "An Analysis of Interlaboratory Test Program Results," New Concrete

te Technology: Roben E. Philleo Symposium, SP-141, T. C. Liu and G. C. Hoff, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills; MI, pp. 103-115.

Detwiler, R J.; Swor, T. E.; and Thomas, W., 2006, "Acceptance Testing Using 4 x 8 in. Cylinders-A Step Toward a Precision Statement Within Laboratory ASTM C39;" Concrete International, V. 28, No.1, Jan., pp. 81-88.

Detwiler, R J.; Thomas, w.; Stangebye, T.; and Urahn, M., 2009, "Variability of 4 x 8 in. Cylinders Tests-Are Three Cylinders Really Necessary?" Concrete International, V. 31, No. 5, May, pp. 57-61.

Gray, R. J., 1990, "Results of an Interlaboratory Concrete Testing Program: Part 1," Cement, Concrete, and Aggregates, V. 12, No. 1, Summer, pp. 12-23.

Kennedy, S.; Detwiler, R; Bickley, J.; and Thomas, M., 1995, "Results of an Interlaboratory Test Program: Compressive Strength of Concrete," Cement, Concrete, and Aggregates, V. 17, No.T, June, pp. 3-10.

Lobo, c., 2005, 2006, and 2007, "Report of the 2005 Strength Testing Round Robin Program in DC Metropolitan Area," Co-sponsored by Washington Area Council of Engineering Laboratories (WACEL) and National Ready Mixed Concrete Producers Technical Committee (RMCPTC), May, June, and June (Reports received from C. Lobo).

Nasser, K. W., and Al-Manaseer, A. A., 1987, "It's Time for a Change from 6 x 12- lo 3 x 6-Inch Cylinders," ACI Materials Journal, V. 84, No. 3, May-June, pp. 213-216.

Plante, M.; Cameron, G.; and Tagnit-Hamou, A., 2000, "Influences of Curing Conditions on Concrete Specimens at Construction Sites," ACI Materials Journal, V. 97, No. 2, Mar-Apr., pp. 120-126.

APENDICE

CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE PRECISIÓN

Como en la práctica común en estadística, el promedio de celdas (lab), el promedio de los promedios de celdas, la desviación estándar de las celdas s y la desviación de celdas d, se calculan por medio de las ecuaciones (1) a (4)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (A1)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^p \bar{x}_i}{p} \quad (A2)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (A3)$$

$$d = \bar{x} - \bar{X} \quad (A4)$$

en donde x representa los resultados de las pruebas individuales, n es el número de pruebas por celda, y p es el número de laboratorios participantes.

De acuerdo con ASTM E691-09 y C802-09a, la SD de los promedios de celdas, la SD interlaboratorio, y la SD entre laboratorios, se calculan con las ecuaciones de (5) a (7)

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n s_i^2}{p}} \quad (A5)$$

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{p-1}} \quad (A6)$$

$$s_R = \max(\sqrt{(s_{\bar{x}})^2 + (s_r)^2(n-1)/n}, s_r) \quad (A7)$$

Los parámetros de consistencia entre laboratorios e interlaboratorio también se definen en las ecuaciones (8) y (9).

$$h = d/s_{\bar{x}} \quad (A8)$$

$$k = s/s_r \quad (A9)$$