

Propiedades mecánicas del concreto para viviendas de bajo costo

Mechanical Properties of Concrete for Low-Cost Housing

Carrillo Julián

*Departamento de Ingeniería Civil
Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Bogotá, Colombia
Correo: wjcarrillo@gmail.com*

Alcocer Sergio M.

*Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM
Correo: salcocer@ii.unam.mx*

Aperador William

*Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Bogotá, Colombia
Correo: wiliam.aperador@unimilitar.edu.co*

Información del artículo: recibido: marzo de 2012, aceptado: julio de 2012

Resumen

La resistencia a cortante de muros de concreto y los nuevos materiales y técnicas de construcción han posicionado a la vivienda industrializada de concreto como una opción eficiente para proporcionar seguridad ante eventos sísmicos, para incentivar la conservación del medio ambiente y para promover la reducción de los costos de construcción, operación y mantenimiento. Con el propósito de desarrollar ayudas de diseño que promuevan la utilización de diferentes tipos de concreto, se llevó a cabo un estudio experimental para caracterizar las propiedades mecánicas de los concretos de peso normal, peso ligero y autocompactable. El programa experimental incluyó el ensayo de 603 especímenes en forma de cilindros y vigas. En el estudio se determinaron las propiedades mecánicas de los tres tipos de concreto sometidos a esfuerzos de compresión, tensión y flexión. A partir de las tendencias de los resultados experimentales, se proponen correlaciones numéricas para estimar las propiedades mecánicas básicas de los concretos, tales como módulo de elasticidad, resistencia a tensión indirecta y resistencia a flexión. Adicionalmente, en el estudio se proponen recomendaciones respecto a la resistencia mínima a compresión del concreto para vivienda y a la edad de descimbrado de los muros. Las recomendaciones de este estudio se podrían implantar fácilmente en un reglamento para construcción de vivienda de baja altura y de bajo costo.

Descriptor:

- vivienda de bajo costo
- propiedades mecánicas
- módulo de elasticidad
- resistencia a tensión indirecta
- resistencia a flexión
- concreto ligero
- concreto autocompactable
- diseño sismorresistente

Abstract

Both shear strength of concrete walls and the new materials and construction techniques have positioned to industrialized concrete housing as a proficient option for providing safety under seismic events, for stimulating environmental conservation and for promoting the reduction of cost of construction, operation and maintenance. Aimed at developing design aids that promote the use of different types of concrete, an experimental study for describing the mechanical properties of normal-weight, light-weight and self-consolidating concretes was carried out. The experimental program included testing of 603 cylinder- and beam-type specimens. Mechanical properties of three types of concrete under compressive, tensile and flexural stresses were evaluated in this study. Based on trends of experimental results, numerical correlations for estimating basic mechanical properties of concretes, such as modulus of elasticity, tension splitting strength and flexural strength, are proposed. Recommendations regarding both the minimum compressive strength of concrete for housing and the time for removing the formwork are also proposed. Recommendations of this study may be easily implemented in a building code for low-rise and low-cost housing.

Keywords:

- economic housing
- mechanical properties
- modulus of elasticity
- splitting tensile strength
- flexural strength
- lightweight concrete
- self-consolidating concrete
- earthquake-resistant design

Introducción

En los últimos años, en países como México, Perú y Chile se ha emprendido un intenso esfuerzo para incrementar la oferta de vivienda de baja altura (uno o dos niveles) y de bajo costo. Por ejemplo, con el propósito de ofrecer una solución a la creciente demanda de vivienda, en México se planea construir aproximadamente 800,000 viviendas en promedio por año. Cuando se emplea el proceso tradicional de construcción con mampostería, se dificulta llegar a las metas anuales debido principalmente a la escasez de mano de obra y a la lentitud del proceso de construcción. Por tanto, los procesos de construcción industrializada son considerados cada vez más como una opción técnica y económicamente viable. En el caso de la vivienda, actualmente se utiliza la construcción industrializada de viviendas de bajo costo con muros de concreto, como complemento a la construcción de la vivienda tradicional de mampostería. Los muros de concreto son delgados, con cuantías de refuerzo bajas y son colados in situ. Algunas de las ventajas que se obtienen con la construcción industrializada son: la aceleración de la producción de vivienda, la reducción de la mano de obra, el equilibrio en los niveles de calidad de construcción, la construcción sostenible, además de la oferta económica accesible (Sánchez, 2010).

La creciente demanda de viviendas industrializadas ha impulsado el desarrollo de nuevos materiales y técnicas para la construcción de viviendas de bajo costo. La entrada al mercado de estos nuevos materiales y técnicas es una opción para construir de manera diferente.

Por ejemplo, el concreto ligero ofrece propiedades térmicas que promueven ahorro de energía para el usuario, adecuadas propiedades acústicas y de resistencia al fuego, así como la reducción de cargas muertas en las estructuras. Adicionalmente, el concreto autocompactable mejora el acabado de los terminados aparentes y reduce los costos asociados a la colocación, ya que no se requiere mano de obra excesiva ni vibradores para compactar el concreto (CEMEX, 2012). En general, la vivienda industrializada a base de muros delgados de concreto es una opción eficiente para proporcionar seguridad ante eventos sísmicos (Carrillo y Alcocer, 2011), incentivar la conservación del medio ambiente y promover la reducción de los costos de construcción, operación y mantenimiento (Carrillo y Alcocer, 2012).

Con el propósito de desarrollar ayudas de diseño que promuevan la utilización de diferentes tipos de concreto en la vivienda industrializada de bajo costo, se llevó a cabo un estudio experimental para caracterizar las propiedades mecánicas de los concretos de peso normal, peso ligero y autocompactable. El programa experimental incluyó el ensayo de 603 especímenes en forma de cilindros y vigas. En el estudio se determinaron las propiedades mecánicas de los tres tipos de concreto sometidos a esfuerzos de compresión, tensión y flexión. A partir de las tendencias de los resultados experimentales, se proponen correlaciones numéricas para estimar las propiedades mecánicas básicas de los concretos, tales como módulo de elasticidad, resistencia a tensión indirecta y resistencia a tensión por flexión. Adicionalmente, en el artículo se proponen recomendaciones respecto a la resistencia mínima a compresión

del concreto para vivienda y a la edad de descimbrado de los muros.

Nuevos tipos de concreto para vivienda

Desde hace algunos años se ha detectado un incremento en la construcción de viviendas, tanto en los sectores de interés social como de tipo medio, con muros de concreto. Por otra parte, para mejorar la calidad de las viviendas, se han incorporado al mercado los concretos de peso ligero y autocompactable, como opciones al concreto de peso normal. Independientemente del tipo de concreto, es común en el diseño el empleo de una resistencia a compresión del concreto de 15 MPa (150 kg/cm²) en el cálculo de las viviendas. Los concretos ligero y autocompactable poseen características particulares que pueden hacer más funcional su empleo en el sector vivienda y, tal como lo demuestra Sánchez (2010), se ha detectado un incremento en su empleo. A continuación, se discuten las ventajas de los dos tipos de concreto que en los últimos años se han incorporado al mercado de la construcción de vivienda de bajo costo.

Concreto ligero

Según NTC-C (2004), el concreto ligero es un concreto con peso volumétrico en estado fresco menor o igual que 19 kN/m³ (1900 kg/m³). De esta manera, la utilización de este concreto permite reducir las cargas muertas en las estructuras y, por tanto, las fuerzas sísmicas se reducen. En cuanto a las propiedades térmicas, el concreto ligero tiene bajo coeficiente de conductividad térmica en comparación con los concretos de peso normal y autocompactable, lo que permite un ahorro de energía para el usuario final, ya que la vivienda se aísla de manera más eficiente contra los cambios de temperatura. En cuanto a la facilidad de colocación, la alta trabajabilidad del concreto ligero favorece las operaciones de colocación y elimina la utilización de vibradores, por tanto, reduce los costos de construcción. Adicionalmente, este tipo de concreto ofrece adecuadas propiedades acústicas y de resistencia al fuego.

Usualmente, el tamaño máximo del agregado que se utiliza en el concreto ligero es de 10 mm. Este concreto se dosifica para proporcionar revenimientos que varían entre 14 y 18 cm y, por tanto, el concreto es apto para ser bombeable. En este concreto es difícil obtener resistencias a compresión mayores que 20 MPa (200 kg/cm²), sin que se alteren sus propiedades de rigidez y peso volumétrico, ya que en la medida que se incrementa la resistencia, sistemáticamente se incrementan el peso

volumétrico y el módulo de elasticidad. Para una resistencia de 15 MPa (150 kg/cm²), el costo del concreto de peso ligero es alrededor de 5% mayor que el costo del concreto de peso normal (CEMEX, 2012).

Concreto autocompactable

El concreto autocompactable mejora el acabado de los terminados aparentes y reduce los costos asociados a la colocación, ya que no se requiere de mano de obra excesiva ni de vibradores para compactar el concreto. La alta trabajabilidad del concreto autocompactable permite obtener una fluidez de hasta 65 cm, conforme a la prueba de extensibilidad, y reduce los problemas de segregación. En cuanto al peso volumétrico, éste es similar al de un concreto de peso normal. Regularmente, el tamaño máximo del agregado es de 13 mm. Cuando se emplea este tipo de concreto, es posible lograr resistencias a compresión que varían entre 10 y 50 MPa (100 y 500 kg/cm²). Los módulos de elasticidad y de ruptura no difieren significativamente de los calculados para un concreto de peso normal. Para una resistencia de 15 MPa (150 kg/cm²), el costo del concreto autocompactable es alrededor de 8% mayor que el costo del concreto de peso normal (CEMEX, 2012).

Estudio sobre muros de concreto

Con el propósito de incrementar y mejorar la oferta tecnológica de las viviendas de interés social construidas con muros de concreto, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM se desarrolló un extenso programa de investigación experimental y analítico, donde se estudió el comportamiento de muros con refuerzo convencional (barras corrugadas y malla de alambre soldado). El objetivo general de la investigación fue proponer criterios de análisis y diseño sismorresistente aplicables a muros de concreto para viviendas de baja altura y de bajo costo. El programa experimental incluyó 39 ensayos cuasi-estáticos y dinámicos de muros con diferente relación de aspecto y sistemas de muros con aberturas (Flores *et al.*, 2007; Sánchez, 2010, Carrillo y Alcocer, 2012a). Las variables de estudio se obtuvieron de las empleadas con más frecuencia en la práctica del diseño y construcción de viviendas de concreto en algunos países de Latinoamérica. En la tabla 1 se describen las variables de estudio y en la tabla 2 se muestra la lista de los muros de concreto.

A partir del análisis de la información experimental y analítica, en el estudio se comprobó que las cuantías mínimas de refuerzo a cortante estipuladas en los reglamentos para diseño sísmico de viviendas de baja altura son conservadoras o muy conservadoras, especialmen-

Tabla 1. Descripción de las variables del estudio sobre muros

Variable	Descripción
Relación de aspecto, altura/longitud (h_w/l_w)	cuadrados ($h_w/l_w=1$), robustos ($h_w/l_w=0.5$), esbeltos ($h_w/l_w=2$) y muros con aberturas (puerta y ventana). El espesor (t_w) y la altura libre nominal (h_w) de todos los muros (en escala natural) fue igual a 100 mm y 2.4 m, respectivamente.
Tipo de concreto	de peso normal, peso ligero y autocompactable, con resistencia nominal a compresión, $f_c' = 15$ MPa.
Cuantía de refuerzo a cortante en el alma (vertical y horizontal)	100% ρ_{min} (0.25%), 50% ρ_{min} (0.125%), 0 = sin refuerzo en el alma. El porcentaje de la cuantía se expresó como fracción de la cuantía mínima (ρ_{min}) estipulada en los reglamentos de diseño NTC-C (2004) y ACI-318 (2011). En todos los muros se proporcionó suficiente refuerzo en los extremos para prevenir falla por flexión
Tipo de refuerzo a cortante en el alma	barras corrugadas de acero con esfuerzo de fluencia nominal, $f_y = 412$ MPa y malla de alambre soldado con esfuerzo de fluencia nominal, $f_y = 491$ MPa
Tipo de ensayo	cuasi-estático monótono, cuasi-estático cíclico-reversible y dinámico en mesa vibradora

te para estructuras situadas en algunas zonas de amenaza sísmica baja o moderada (Carrillo y Alcocer, 2012a). Con base en lo anterior, Carrillo y Alcocer (2011) proponen recomendaciones de acuerdo con la capacidad y la demanda de las viviendas. Por ejemplo, en algunas zonas se propuso prescindir o disminuir el refuerzo a cortante en el alma del muro, a cambio de utilizar requisitos específicos por cambios volumétricos y/o refuerzo por integridad estructural, así como parámetros particulares para diseño sísmico.

Programa experimental

Con el propósito de caracterizar las propiedades mecánicas de los tipos de concreto que se utilizan para la construcción de muros para vivienda de bajo costo, el programa experimental incluyó el ensayo de 603 especímenes; 486 en forma de cilindros y 117 en forma de vigas.

Características básicas del concreto

Los tres tipos de concreto utilizados en este estudio (peso normal, peso ligero y autocompactable), fueron

premezclados y proporcionados por el Grupo CEMEX. Las características especificadas de los tres tipos de concreto utilizados se muestran en la tabla 3. Infortunadamente, por disposiciones del proveedor, no fue posible conocer la proporción de agregados, agua y cemento en las mezclas.

Tipo y cantidad de especímenes de concreto

En este estudio, los especímenes del concreto fueron del tipo de cilindros de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura, para obtener índices de resistencia a compresión, módulo de elasticidad y resistencia a tensión indirecta, por medio de ensayos de compresión simple, módulo de elasticidad y compresión diametral, respectivamente. Adicionalmente, se obtuvieron vigas de 600 mm de longitud y 150 mm de alto y de ancho, para obtener el índice de resistencia a tensión por flexión (o módulo de rotura).

El muestreo del concreto se realizó simultáneamente con el colado de los muros (tabla 2) y, por tanto, se obtuvieron especímenes para las tres fases del colado de los muros (hasta la mitad del muro, hasta el extremo superior del muro y hasta la losa superior). En la tabla 4

Característica especificada	Concreto de peso normal	Concreto autocompactable	Concreto de peso ligero
Tipo / Clase (NTC-C, 2004)	Peso Normal / 2	Peso Normal / 2	Peso Ligero / 2
Resistencia a compresión, f_c' , MPa	15	15	15
Tamaño máximo del agregado, mm	10	10	10
Tipo de agregado	Andesita	Andesita	Andesita
Manejabilidad: especificada / medida, mm	R = 180 / 210	E = 600 / 650	R = 140 / 145
Peso específico en estado endurecido, γ_{concr} , kN/m ³	22.7 – 23.5	22.7 – 23.5	11.2 – 18.1

Tabla 3. Características especificadas de los tipos de concreto

R = revenimiento, E = extensibilidad

Tabla 2. Lista de especímenes de concreto incluidos en el estudio sobre muros

Núm.	Muro	h_w/h_w	Tipo de concreto	Refuerzo a cortante en alma		Tipo de ensayo	
				% ρ_{min}	Tipo		
1	MCN0M	1.00	Peso normal	0	Barras	Cuasi-estático monótono	
2	MCN50M	1.00	Peso normal	50	Barras		
3	MCN100M	1.00	Peso normal	100	Barras		
4	MCL0M	1.00	Peso ligero	0	Barras		
5	MCL50M	1.00	Peso ligero	50	Barras		
6	MCL100M	1.00	Peso ligero	100	Barras		
7	MCA0M	1.00	Autocompactable	0	Barras		
8	MCA100M	1.00	Autocompactable	100	Barras		
9	MCN50C	1.00	Peso normal	50	Barras	Cuasi-estático cíclico-reversible	
10	MCN100C	1.00	Peso normal	100	Barras		
11	MCA50C	1.00	Autocompactable	50	Barras		
12	MCA100C	1.00	Autocompactable	100	Barras		
13	MCL50C	1.00	Peso ligero	50	Barras		
14	MCL100C	1.00	Peso ligero	100	Barras		
15	MCA50C-R (11)	1.00	Autocompactable	50	Barras		
16	MCL50C-R (13)	1.00	Peso ligero	50	Barras		
17	MRN100C	0.50	Peso normal	100	Barras		
18	MEN100C	2.00	Peso normal	100	Barras		
19	MRN50C	0.50	Peso normal	50	Barras		
20	MEN50C	2.00	Peso normal	50	Barras		
21	MRL100C	0.50	Peso ligero	100	Barras		
22	MRN50mC	0.50	Peso normal	50	Malla		
23	MCN50mC	1.00	Peso normal	50	Malla		
24	MEN50mC	2.00	Peso normal	50	Malla		
25	MRL50mC	0.50	Peso ligero	50	Malla		
26	MCL50mC	1.00	Peso ligero	50	Malla		
27	MEL50mC	2.00	Peso ligero	50	Malla		
28	MVN100C	0.63 (1)	Peso normal	100	Barras		
29	MVN50mC	0.63 (1)	Peso normal	50	Malla		
30	MCN50C-2 (9)	1.00	Peso normal	50	Barras		
31	MCA50C-2 (11)	1.00	Autocompactable	50	Barras		
32	MCL50C-2 (13)	1.00	Peso ligero	50	Barras		
33	MCL100C-2 (14)	1.00	Peso ligero	100	Barras		
34	MCNB50mC	1.00	Peso normal	50	Malla		
35	MRNB50mC	0.50	Normal	50	Malla		
36	MCN50mD	1.00	Peso normal	50	Malla		Dinámico (mesa vibradora)
37	MCN100D	1.00	Peso normal	100	Barras		
38	MCL50mD	1.00	Peso ligero	50	Malla		
39	MCL100D	1.00	Peso ligero	100	Barras		
40	MVN50mD	0.63 (2)	Peso normal	50	Malla		
41	MVN100D	0.63 (2)	Peso normal	100	Barras		

se presenta la cantidad de especímenes obtenidos y los tipos de ensayo realizados a los tres tipos de concreto: peso normal, peso ligero y autocompactable. En cada mezcla de concreto se obtuvieron 9 especímenes para medir la resistencia a compresión a edades de 7, 14 y 28 días (3 especímenes para cada edad). Adicionalmente, para caracterizar las propiedades mecánicas de cada muro se obtuvieron 9 especímenes en forma de cilindros (resistencia a compresión, módulo de elasticidad y resistencia a tensión indirecta) y 3 especímenes en forma de vigas (resistencia a flexión). En la tabla 4 se observa que el estudio incluyó el ensayo de 486 especímenes en forma de cilindro y 117 especímenes en forma de vigas. Los ensayos se realizaron siguiendo los lineamientos especificados en las normas mexicanas correspondientes, las cuales son equivalentes a las normas ASTM.

Los especímenes de concreto se descimbraron dos días después del colado. Debido a que en la práctica actual de construcción del tipo de viviendas estudiadas no se hace ningún tratamiento posterior al colado de los elementos, no se aplicó ningún proceso de curado a los muros y a los especímenes de concreto. De esta manera, se buscó representar fielmente las condiciones reales de este tipo de elementos.

Configuración y procedimiento de ensayos

Resistencia a compresión

Para obtener índices de resistencia a compresión de los concretos (f_c), los cilindros se ensayaron bajo carga axial monótona a velocidad igual a 245 kN/min (25 tf/min), siguiendo los lineamientos de la Norma NMX-C-083 (2002). Los cilindros fueron cabeceados con azufre para garantizar una superficie de contacto plana y nivelada. En la figura 1a se muestran los detalles del ensayo de cilindros en compresión.

Módulo de elasticidad

Para determinar el módulo de elasticidad de los concretos (E_c), los cilindros fueron instrumentados con dos transductores de desplazamiento vertical a lo largo de su altura (figura 1b). Los cilindros fueron cargados con una serie de precargas para asegurar una distribución uniforme de esfuerzos durante el ensayo y el buen funcionamiento de los transductores. La velocidad de aplicación de la carga durante los ensayos fue igual a 147 kN/min (15 tf/min). Los valores del módulo de elasticidad fueron calculados a partir de las curvas esfuerzo-

Tabla 4. Tipos y cantidad de especímenes de concreto

Tipo concreto	Núm. Muro (tabla 2)	f_c (edad, días)				E_c	f_t	f_r	Tipo de espécimen	
		7	14	28	≥ 36				Cilindros	Vigas
Peso normal	1, 2, 3	3	3	3	9	9	9	9	36	9
	9, 10	3	3	3	6	6	6	6	27	6
	17, 18, 19, 20	3	3	3	12	12	12	12	45	12
	22, 23, 24, 30	3	3	3	12	12	12	12	45	12
	28, 29	3	3	3	6	6	6	6	27	6
	34, 35	3	3	3	6	6	6	6	27	6
	36, 37, 40, 41	3	3	3	12	12	12	12	45	12
Peso ligero	4, 5, 6	3	3	3	9	9	9	9	36	9
	13, 14	3	3	3	6	6	6	6	27	6
	21, 25, 33	3	3	3	9	9	9	9	36	9
	26, 27, 32	3	3	3	9	9	9	9	36	9
	38, 39	3	3	3	6	6	6	6	27	6
Autocompactable	31	3	3	3	3	3	3	3	18	3
	7, 8	3	3	3	6	6	6	6	27	6
	11, 12	3	3	3	6	6	6	6	27	6
Total									486	117

f_c = resistencia a compresión, E_c = módulo de elasticidad, f_t = resistencia a tensión indirecta, f_r = resistencia a flexión

deformación obtenidas durante los ensayos, mediante el módulo secante a 40% de la resistencia, de acuerdo con los lineamientos de la Norma NMX-C-128 (1997); es decir, utilizando la siguiente ecuación

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (1)$$

Los parámetros de la ecuación anterior se muestran gráficamente en la figura 2.

Resistencia a tensión indirecta

Para obtener índices de la resistencia a tensión indirecta o compresión diametral del concreto (f_i), los cilindros se

ensayaron bajo carga diametral monótona (prueba brasileña) a velocidad igual a 69 kN/min (7 tf/min), siguiendo los lineamientos de la Norma NMX-C-163 (1997).

En la figura 3a se muestran los detalles del ensayo de cilindros en compresión diametral.

Resistencia a tensión por flexión

Para obtener datos sobre la resistencia a tensión por flexión del concreto o módulo de ruptura (f_r), se ensayaron vigas bajo carga monótona aplicada en los tercios del claro, a velocidad de 7.4 kN/min (0.75 tf/min), siguiendo los lineamientos de la Norma NMX-C-191 (2004). En la figura 3b se muestran los detalles del ensayo de vigas a flexión.

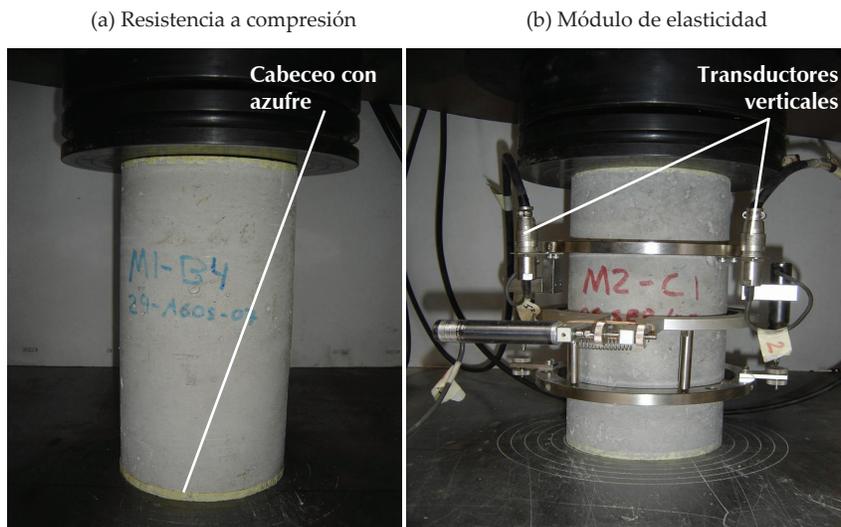


Figura 1. Configuración de ensayos en compresión

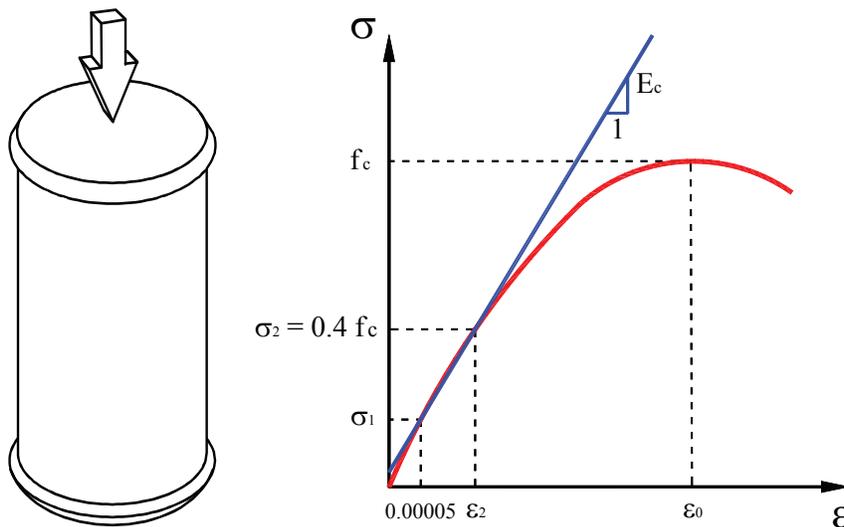
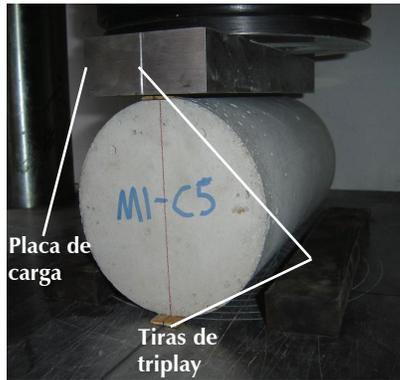


Figura 2. Cálculo del módulo de elasticidad

(a) Resistencia a tensión indirecta



(b) Resistencia a tensión por flexión

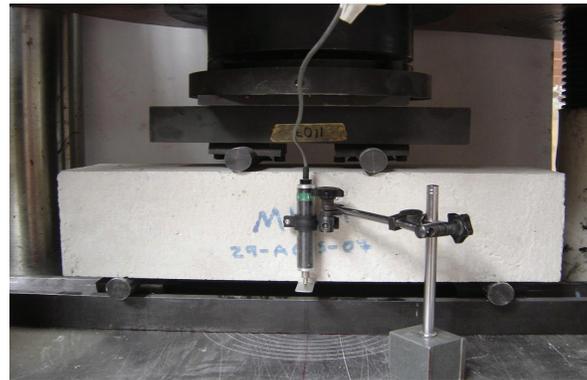


Figura 3. Configuración de ensayos en tensión

Resultados y discusión

Parámetros estadísticos

Para el análisis estadístico de los datos medidos se utilizaron tres parámetros comunes (Benjamin y Cornell, 1970): la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación. La media aritmética, \bar{X} , corresponde al promedio simple del conjunto de datos, expresado en la misma unidad de medida de la variable, y está definida como

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2)$$

donde X_i es i -ésimo dato y n es el número de datos. La desviación estándar, S , es una medida de dispersión de los datos con respecto de su media aritmética, expresada en la misma unidad de medida de la variable, definida como

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

El coeficiente de variación, CV , permite comparar dispersiones a escalas distintas, ya que elimina la dimensionalidad de las variables al normalizar la desviación estándar con el promedio de la muestra. Es común expresar el coeficiente de variación en porcentaje y, por tanto, éste se define como

$$CV(\%) = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \quad (4)$$

Evolución de la resistencia

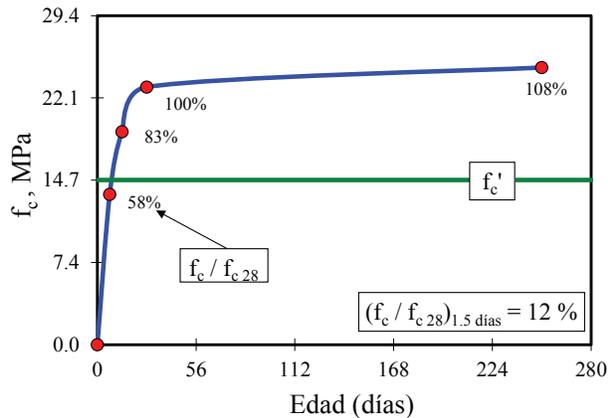
En la figura 4 se presenta la evolución, en el tiempo, de la resistencia a compresión de los concretos de peso normal y peso ligero que se utilizaron en la construcción de los modelos ensayados en mesa vibradora (tabla 2), así como la relación, en porcentaje, de la resistencia a compresión a una determinada edad, con respecto a la resistencia medida a 28 días (f_c / f_{c28}). En la figura también se muestra esquemáticamente la resistencia nominal a compresión del concreto (f'_c), con el fin de observar una de las fuentes de sobrerresistencia que se pueden presentar en las viviendas construidas con estos tipos de concreto. En este caso, la resistencia a compresión medida en el concreto de peso normal y peso ligero, fue 1.68 y 1.43 veces superior, respectivamente, que la resistencia nominal.

Propiedades mecánicas

En las tablas 5 a 7 se presenta el consolidado de las principales propiedades mecánicas promedio de los concretos de peso normal, peso ligero y autocompactable, respectivamente: resistencia a compresión (f_c), resistencia a tensión indirecta (f_t), resistencia a tensión por flexión o módulo de ruptura (f_r) y módulo de elasticidad (E_c). Estas propiedades se determinaron en una fecha cercana al ensayo de los muros, pero la edad del concreto fue siempre mayor a 36 días. En las tablas se observa que a pesar de que la resistencia nominal a compresión del concreto fue igual a 15 MPa (150 kgf/cm²), la dispersión de las resistencias medidas fue alta.

En la figura 5 se muestran las curvas esfuerzo-deformación en compresión de los especímenes de los concretos de peso normal y peso ligero utilizados en los

(a) Concreto de peso normal



(b) Concreto de peso ligero

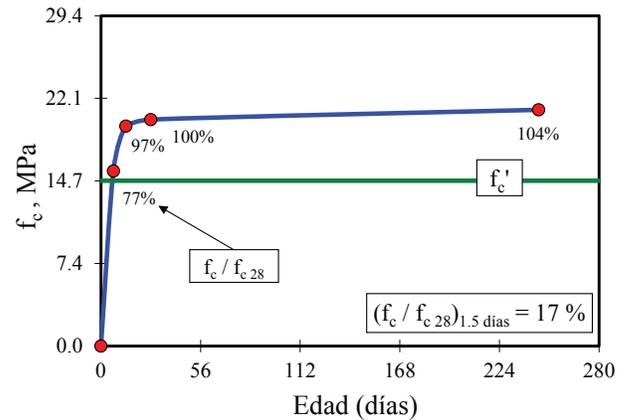


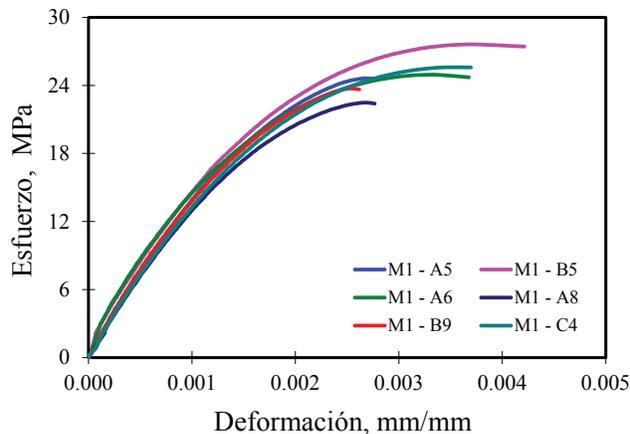
Figura 4. Evolución de la resistencia a compresión

muros ensayados en mesa vibradora. En la figura se observa que no se registró adecuadamente la parte descendente de las curvas. Para los concretos utilizados en los muros ensayados de forma cuasi-estática se observaron tendencias similares.

En las tablas 5 a 7 también se presentan los resultados del peso específico de los cilindros de concreto en estado endurecido (γ_{conc}). Las Normas NTC-C (2004) caracterizan el tipo de concreto solamente en función del peso específico en estado fresco (clase 1, clase 2 de peso normal o clase 2 de peso ligero). Según NTC-C (2004), el peso específico en estado fresco del concreto

clase 1 debe ser mayor que 22 kN/m^3 (2.2 tf/m^3), para el concreto clase 2 de peso normal debe estar comprendido entre 19 kN/m^3 (1.9 tf/m^3) y 22 kN/m^3 (2.2 tf/m^3), y para el concreto clase 2 de peso ligero, debe ser menor que 19 kN/m^3 (1.9 tf/m^3). Aunque en esta investigación sólo se midieron los valores del peso específico en estado endurecido de los concretos utilizados, los datos de las tablas 5 a 7 demuestran que los concretos aquí denominados "peso normal" y "autocompactable" se pueden clasificar como concretos clase 2 de peso normal y, el concreto denominado "peso ligero" como concreto clase 2 de peso ligero.

(a) Concreto de peso normal



(b) Concreto de peso ligero

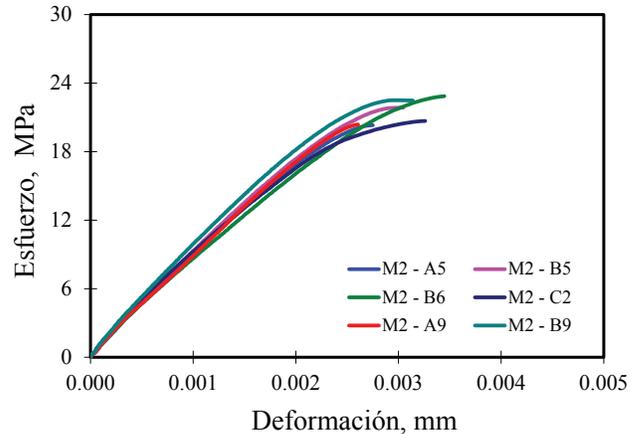


Figura 5. Curvas características esfuerzo-deformación del concreto en compresión

Tabla 5. Propiedades mecánicas del concreto de peso normal

Núm. Muro (tabla 2)	MPa							
	f_c	f_t	f_r	E_c	γ_{conc} (kN/m ³)	$A = f_t / \sqrt{f_c}$	$B = f_r / \sqrt{f_c}$	$C = E_c \sqrt{f_c}$
1, 2, 3	18.8	2.20	2.91	10624	(1)	0.51	0.67	2448
9, 10	17.5	2.00	2.64	8433	(1)	0.48	0.63	2018
17, 18, 19, 20	16.2	1.89	(1)	9752	20.0	0.47	---	2424
22, 23, 24, 30	20.0	2.17	(1)	10289	19.0	0.48	---	2300
28, 29	16.0	1.55	2.32	11511	18.8	0.39	0.58	2879
34, 35	8.9 (2)	0.91	(1)	9334	19.8	(2)	(2)	(2)
36, 37, 40, 41	24.7	2.09	3.75	14757	20.3	0.42	0.75	2968
Media aritmética, \bar{X}					19.6	0.46	0.66	2506
Coeficiente de variación, CV (%)					3.1	8.9	9.6	13.1

⁽¹⁾ Dato no disponible; ⁽²⁾ Resistencia a compresión anormalmente baja: dato no incluido para el cálculo de las constantes

Tabla 6. Propiedades mecánicas del concreto de peso ligero

Núm. Muro (tabla 2)	MPa							
	f_c	f_t	f_r	E_c	γ_{conc} (kN/m ³)	$A = f_t / \sqrt{f_c}$	$B = f_r / \sqrt{f_c}$	$C = E_c \sqrt{f_c}$
4, 5, 6	16.3	1.27	1.78	7306	(1)	0.31	0.44	1811
13, 14	10.8	1.14	1.43	6704	(1)	0.35	0.44	2041
21, 25, 33	5.2 (2)	0.85	(1)	6726	15.2	(2)	(2)	(2)
26, 27, 32	26.0	1.76	2.54	10785	18.3	0.34	0.50	2115
38, 39	21.0	1.44	3.29	9146	16.8	0.31	0.72	1996
Media aritmética, \bar{X}					16.8	0.33	0.52	1991
Coeficiente de variación, CV (%)					7.5	4.7	22.0	5.6

⁽¹⁾ Dato no disponible; ⁽²⁾ Resistencia a compresión anormalmente baja: dato no incluido para el cálculo de las constantes

Tabla 7. Propiedades mecánicas del concreto autocompactable

Núm. Muro (tabla 2)	MPa							
	f_c	f_t	f_r	E_c	γ_{conc} (kN/m ³)	$A = f_t / \sqrt{f_c}$	$B = f_r / \sqrt{f_c}$	$C = E_c \sqrt{f_c}$
31	27.1	1.81	(1)	11775	18.9	0.35	---	2263
7, 8	19.4	1.58	2.48	7056	(1)	0.36	0.56	1601
11, 12	22.0	1.98	2.27	8898	(1)	0.42	0.48	1898
Media aritmética, \bar{X}					18.9	0.38	0.52	1921
Coeficiente de variación, CV (%)					---	8.7	7.6	14.1

⁽¹⁾ Dato no disponible

De acuerdo con la sección 2.2 del Reglamento ACI-318 (2011), el peso específico en estado endurecido del concreto de peso normal debe variar entre 21.4 y 25.1 kN/m³ (2.2 – 2.6 tf/m³). Para el concreto de peso ligero, el ACI-318 (2011) indica que la densidad de equilibrio (secado al horno) debe variar entre 11.2 y 18.1 kN/m³ (1.1 – 1.8 tf/m³). Si se acepta que la densidad de equilibrio es similar a la densidad en estado endurecido, el concreto de peso ligero cumple con el intervalo del peso específico en estado endurecido (11.2 – 18.1 kN/m³) indicado en el Reglamento ACI-318 (2011). Sin embargo, el concreto de peso normal no cumple con el límite de peso específico indicado en ACI-318 (2011).

Ecuaciones propuestas

Para propósitos de diseño es conveniente establecer correlaciones entre la resistencia a compresión del concreto (parámetro básico de diseño) y las demás propiedades mecánicas. Por ejemplo, es común expresar la resistencia a tensión indirecta, el módulo de ruptura y el módulo de elasticidad, en función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión del concreto, es decir:

$$f_t = A\sqrt{f_c}, f_r = B\sqrt{f_c} \text{ y } E_c = C\sqrt{f_c} \quad (5)$$

En este estudio, las constantes A , B y C se calcularon a partir de resultados experimentales. En las tablas 5 a 7 se muestra la media aritmética de las constantes y el coeficiente de variación asociado a los concretos de peso normal, peso ligero y autocompactable, respectivamente. En la tabla 8 se muestran nuevamente los valores de la media aritmética de las constantes, junto con los valores especificados en NTC-C (2004) para concreto clase 2 en viviendas de interés social.

En la tabla 8 se observa que las constantes calculadas con las propiedades mecánicas medidas en el concreto

de peso normal, fueron mayores o iguales que los valores especificados en NTC-C (2004). Sin embargo, la constante que relaciona el módulo de elasticidad medido en el concreto autocompactable fue menor que el valor recomendado para diseño en dicho reglamento. En cuanto al concreto de peso ligero, las constantes asociadas a la resistencia a tensión y el módulo de elasticidad medidos, fueron menores que el valor mínimo especificado para diseño en NTC-C (2004). Por tanto, es necesario implantar controles de calidad más estrictos en la producción del concreto para vivienda, con el propósito de garantizar el cumplimiento de las propiedades mecánicas recomendadas para diseño; especialmente en los concretos de peso ligero y autocompactable.

A pesar que NTC-C (2004) especifica que la resistencia mínima a compresión del concreto para vivienda de interés social debe ser igual a 15 MPa (150 kgf/cm²), dicho reglamento no especifica ecuaciones particulares para estimar las demás propiedades mecánicas. Con fines de diseño reglamentario, en la tabla 8 se presentan los valores propuestos para los tres tipos de concreto utilizados en la investigación. Los valores propuestos corresponden aproximadamente al percentil 5, es decir, 95% de los datos medidos en este estudio, supera el valor recomendado. Las correlaciones se plantearon utilizando un formato que pueda ser fácilmente implantado en los reglamentos de diseño y construcción.

Consideraciones para descimbrar

Un aspecto relevante para la construcción de viviendas de concreto es la edad mínima del concreto para descimbrar los muros, ya que esta edad controla los tiempos de construcción y la magnitud de la resistencia nominal a compresión del concreto. Al realizar un descimbrado rápido, se incrementa la posibilidad de que se agrieten los muros o que se presenten descascara-

Tabla 8. Constantes que relacionan las propiedades mecánicas del concreto

Tipo de constante	Tipo de concreto	A (f_t)		B (f_r)		C (E_c)	
		MPa	kgf/cm ²	MPa	kgf/cm ²	MPa	kgf/cm ²
Medidas (promedio)	Peso normal	0.46	1.5	0.66	2.1	2506	8000
	Peso ligero	0.33	1.1	0.52	1.7	1991	6360
	Autocompactable	0.38	1.2	0.52	1.7	1921	6130
NTC-C	Clase 2	0.38	1.2	0.44	1.4	2500	8000
Propuestas para diseño	Peso normal	0.38	1.2	0.56	1.8	2100	6700
	Peso ligero	0.31	1.0	0.44	1.4	1850	5900
	Autocompactable	0.34	1.1	0.47	1.5	1650	5200

mientos del concreto en la superficie terminada de los muros. Un descimbrado lento retrasa los tiempos de construcción (Sánchez, 2010). En NTC-C (2004) no se establece ningún criterio aplicable al descimbrado de los muros. Para verificar la edad mínima del concreto para descimbrar los muros, inicialmente se evaluó el esfuerzo vertical axial de los muros de las viviendas en condiciones de servicio. Carrillo y Alcocer (2012a) han demostrado que el esfuerzo vertical axial de las viviendas en condiciones de servicio, incluyendo carga muerta más carga viva instantánea (según NTC-Cr, 2004), varía entre 0.08 y 0.47 MPa y, su valor promedio es igual a 0.26 MPa (2.6 kgf/cm²). Aunque no se reportaron esfuerzos de tensión, en este estudio se ha supuesto un valor del esfuerzo axial de tensión correspondiente al límite inferior del intervalo del esfuerzo de compresión, es decir, 0.08 MPa (0.8 kgf/cm²).

Esfuerzos de compresión

En la figura 4 se indica que para edad igual a 1.5 días, la resistencia a compresión del concreto de peso normal y peso ligero fue igual a 12 y 17% (~15%), respectivamente, con respecto a la resistencia medida a 28 días. Si la resistencia nominal a compresión del concreto es igual a 20 MPa (200 kgf/cm²), la resistencia a edad igual a 1.5 días será aproximadamente igual a 3.0 MPa (19.6×0.15). Dicha resistencia es aproximadamente 10 veces mayor que el esfuerzo vertical axial de compresión en condiciones de servicio y, al mismo tiempo, es igual al valor mínimo de la resistencia a compresión del concreto que se especifica en la norma francesa NF-P18-504 (1990), para que los muros se puedan descimbrar (3 MPa, 30 kgf/cm²).

Esfuerzos de tensión

Para determinar la resistencia a tensión para concretos de peso normal y peso ligero con f'_c igual a 20 MPa, se utilizaron las constantes promedio (medidas) que se indican en la tabla 8. De esta manera, el valor de la resistencia a tensión para los concretos de peso normal y peso ligero es igual a 2.06 MPa y 1.48 MPa, respectivamente. Para una evolución de la resistencia a tensión del concreto similar a la resistencia a compresión (figura 4), la resistencia a tensión de los concretos de peso normal y peso ligero a edad igual a 1.5 días, será aproximadamente igual a 0.31 MPa (2.06×0.15) y 0.22 MPa (1.48×0.15), respectivamente. Dichas resistencias son aproximadamente 3 veces mayores que el esfuerzo vertical axial de tensión en condiciones de servicio (0.08 MPa). Adicionalmente, en la figura 4 se observa que la

resistencia medida probablemente será mayor que la resistencia nominal. Tomado en cuenta lo anterior, para viviendas con las características aquí estudiadas es posible descimbrar los muros de concreto después de 36 horas (1.5 días) del colado, ya que la resistencia del concreto es suficiente para soportar las solicitaciones impuestas por el peso propio de los muros y por otras cargas que actúan durante la construcción.

Actualmente, es usual que el colado de los muros se realice durante las primeras horas de la mañana para descimbrar por la tarde (12 horas después del colado, 0.5 días aproximadamente). Algunos constructores han optado por utilizar la norma francesa NF-P18-504 (1990), la cual establece una resistencia a compresión del concreto mínima de 3 MPa (30 kgf/cm²) como parámetro para permitir el descimbrado de los muros. En la figura 4 se observa que para edad igual a 0.5 días, la resistencia a compresión del concreto de peso normal y peso ligero fue igual a 4 y 6% (~5%), respectivamente, de acuerdo con la resistencia medida a 28 días. Por tanto, para cumplir con el requisito de la resistencia a compresión de 3 MPa (NF-P18-504, 1990), asociada a un tiempo de descimbrado de los muros de 12 h (0.5 días), sería necesario utilizar un concreto con resistencia nominal a compresión mayor que 50 MPa (500 kgf/cm²), lo cual podría incrementar significativamente el costo de la vivienda.

Limitaciones

Las ecuaciones y recomendaciones propuestas en este estudio pueden aplicarse o utilizarse para calcular las propiedades mecánicas promedio o de diseño (reglamentario) de los concretos empleados en la construcción de viviendas a bajo costo; es decir, concretos de peso normal ($19 \leq \gamma_{conc} \leq 22$ kN/m³), peso ligero ($\gamma_{conc} < 19$ kN/m³) y autocompactable ($19 \leq \gamma_{conc} \leq 22$ kN/m³), con resistencia a compresión del concreto entre 15 y 25 MPa (150 y 250 kgf/cm²). Aunque se reconoce que el valor de las constantes A , B y C se podrían determinar utilizando una muestra con mayor número de datos, los valores propuestos en la tabla 8 son un primer acercamiento a la tendencia de los resultados para los concretos con las características estudiadas.

Conclusiones

Actualmente, la construcción de viviendas con muros de concreto es una de opción integralmente eficiente, ya que satisface los requisitos sismorresistentes y puede ser ambientalmente amigable con el planeta. Para desarrollar ecuaciones que faciliten el proceso de diseño sis-

morresistente de viviendas de bajo costo o viviendas de interés social, en el artículo se han presentado los resultados de un extenso programa experimental que incluyó el ensayo de 486 especímenes de concreto en forma de cilindros y 117 especímenes en forma de vigas. A partir de las tendencias de los resultados experimentales, se propusieron correlaciones numéricas para estimar las propiedades mecánicas de los concretos de peso normal, peso ligero y autocompactable, tales como módulo de elasticidad, resistencia a tensión indirecta o compresión diametral y resistencia a tensión por flexión o módulo de ruptura. Las principales conclusiones de la investigación se presentan a continuación:

- Los resultados del programa experimental demostraron que una de las principales fuentes de sobrerresistencia que se pueden presentar en las viviendas construidas con estos tipos de concreto, está asociada al incremento de resistencia del concreto en comparación con la resistencia nominal, ya que en algunos casos, la resistencia medida fue aproximadamente 1.5 veces superior a la resistencia nominal a compresión del concreto.
- En los concretos de peso ligero y autocompactable, algunas constantes fueron menores que el valor mínimo especificado para diseño por NTC-C (2004). Por tanto, es necesario implantar controles de calidad más estrictos en la producción del concreto para vivienda, para garantizar el cumplimiento de las propiedades mecánicas mínimas para diseño.
- Para mejorar el desempeño del concreto en la vivienda de acuerdo con las metodologías y técnicas de producción disponibles, se recomienda que en NTC-C se incremente la resistencia mínima del concreto de 15 MPa a 20 MPa, y al mismo tiempo, exigir el cumplimiento de los requisitos de durabilidad prescritos en la Norma NMX-C-155 (2004). Adicionalmente, si se utiliza una resistencia a compresión del concreto menor que 20 MPa, la edad a la cual se pueden descimbrar los muros es mayor que 1.5 días.
- Mientras no se cuente con mayor información y a falta de una norma mexicana en la cual se establezcan los tiempos de descimbrado de muros de concreto, se considera oportuno adoptar la norma francesa NF-P18-504 (1990), la cual establece una resistencia a compresión del concreto mínima de 3 MPa (30 kg/cm²), como parámetro para permitir el descimbrado de los muros.
- Las recomendaciones puntuales de este estudio se podrían implantar fácilmente en un reglamento de diseño y construcción, tal como NTC-C (2004). Por ejemplo, las correlaciones numéricas se plantearon

en función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión del concreto, el cual es un parámetro básico de diseño. En tal caso, el valor definitivo de las constantes de las ecuaciones se debe establecer con base en los requisitos de probabilidad de excedencia que se especifican en cada reglamento.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Grupo CEMEX por el apoyo económico de la investigación, así como al personal de los laboratorios del Instituto de Ingeniería de la UNAM, por su valiosa colaboración durante la realización de los ensayos, en especial, al M.I. Leonardo Flores Corona y al Técnico Raymundo Mondragón Colín. El contenido de este artículo representa exclusivamente la opinión de los autores y no refleja la opinión de los patrocinadores y/o colaboradores.

Referencias

- ACI-Comité 318. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-08), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, EUA, 2011.
- Benjamin J. y Cornell C. *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers*, Nueva York, McGraw-Hill, 1970, 684 p.
- Carrillo J. y Alcocer S. Seismic Performance of Concrete Walls for Housing Subjected to Shaking Table Excitations. *Engineering Structures*, volumen 41, 2012a: 98-107.
- Carrillo J. y Alcocer S. Revisión de criterios de sostenibilidad en muros de concreto para viviendas sismorresistentes. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, volumen 13 (número 4), 2012:13-22.
- Carrillo J. y Alcocer S. Comportamiento a cortante de muros de concreto para vivienda. *Ingeniería Sísmica*, volumen 85 (número julio-diciembre), 2011: 103-126.
- CEMEX. Concreto profesional-Ligero celular y Autocompactable [en línea] 2012, [fecha de consulta: mayo]. Disponible en: www.cemexmexico.com.
- Flores L., Alcocer S., Carrillo J., Sánchez A., Uribe R. y Ponce A. Ensayo de muros de concreto con diferente relación de aspecto y bajas cuantías de refuerzo, para uso en vivienda, en: XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero, México, tema XI, artículo 2, 2007.
- NF-P18-504. Norma francesa: Concreto-Puesta en obra de concreto estructural, junio, Francia, 1990.
- NMX-C-083. 2002, Norma Mexicana: Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto, ONNCCE, México, 8 p.
- NMX-C-128. 1997, Norma Mexicana: Concreto sometido a compresión - Determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson, ONNCCE, México, 11 p.

- NMX-C-155. 2004, Norma Mexicana: Especificaciones para concreto hidráulico industrializado, ONNCCE, México, 24 p.
- NMX-C-163. 1997, Norma Mexicana: Determinación la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto, ONNCCE, México, 5 p.
- NMX-C-191. 2004, Norma Mexicana: Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro, ONNCCE, México, 6 p.
- NTC-C. 2004, Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México DF, 101 p.
- NTC-Cr. 2004, Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México DF, 8 p.
- Sánchez A. *Comportamiento sísmico de viviendas construidas con muros de concreto*, Informe Técnico, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, DF, 2010, 475 p.

Este artículo se cita:

Citación estilo Chicago

Carrillo Julián, Sergio M. Alcocer., William Aperador. Propiedades mecánicas del concreto para viviendas de bajo costo. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIV, 02 (2013): 285-298.

Citación estilo ISO 690

Carrillo J., Alcocer S.M., Aperador W. Propiedades mecánicas del concreto para viviendas de bajo costo. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XIV (número 2), abril-junio 2013: 285-298.

Semblanza de autores

Julián Carrillo. Obtuvo los títulos de ingeniero civil en 2002 por la Universidad Militar Nueva Granada, UMNG, Colombia, el de maestro en ingeniería civil (área de estructuras y sísmica) en 2004 por la Universidad de los Andes, Colombia, y el de doctor en ingeniería (área de estructuras) en 2010 por la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. Actualmente es profesor y director del grupo de investigación de estructuras y sísmica de la UMNG. Es miembro de tres comités del American Concrete Institute, ACI: 314, Diseño simplificado de edificios; 369, reparación y rehabilitación sísmica; y 374, diseño sísmico basado en desempeño de edificios de concreto.

Sergio M. Alcocer. Obtuvo los títulos de ingeniero civil en 1986 por la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, y el de doctor en filosofía (área de estructuras) en 1991 por la Universidad de Texas en Austin, EUA. Actualmente es coordinador para innovación y desarrollo, e investigador del Instituto de Ingeniería, de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. Es miembro de tres comités del American Concrete Institute, ACI: 318, reglamento de construcción de concreto estructural; 369, reparación y rehabilitación sísmica; y 374, diseño sísmico basado en desempeño de edificios de concreto.

William Aperador. Obtuvo los títulos de físico en 2003 y el de maestro en metalurgia y ciencia de los materiales en 2006, por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en 2006. Asimismo, el de doctor en ingeniería de los materiales en 2009 por la Universidad del Valle, Colombia. Realizó una pasantía internacional en el centro nacional de investigaciones metalúrgicas (CENIM), en Madrid, España, en el laboratorio de ingeniería de materiales y durabilidad. Actualmente es profesor e investigador del grupo de investigación GMCDP-Volta. Ha sido autor y coautor de más de 80 artículos y ha presentado 40 ponencias internacionales y 38 comunicaciones nacionales.