

CONTENIDO

Artículos

1. Universidad, sistemas educativos y carreras académicas: un enfoque sistémico..... 13-36
Herrera, Rodolfo.
2. Sistema y lo sistémico en el pensamiento contemporáneo 37-52
Herrera, Rodolfo.
3. Propiedades a compresión de la mampostería de bloques de concreto..... 53-70
Navas, Alejandro.
4. Capacidad estructural de juntas T de perfiles de acero laminado en frío 71-86
Romanjek, Marija.
5. Control adaptivo utilizando programación dinámica heurística..... 87-102
Gólcher, Luis.
6. Análisis de la capacidad de drenado de celulosa de bagazo de caña..... 103-113
Aguilar, Noé.

Notas técnicas

1. Evaluación de los modelos utilizados en los estudios del control PID..... 117-129
Alfaro, Víctor.
2. Cálculo para Costa Rica de la aceleración de la gravedad y su incertidumbre aplicando el método de Monte Carlo a la Fórmula Internacional de la Gravedad..... 131-138
Paniagua, Carlos.
3. Traducción del resumen de la octava edición del SI brochure 139-143
Paniagua, Carlos.

Análisis y comentarios

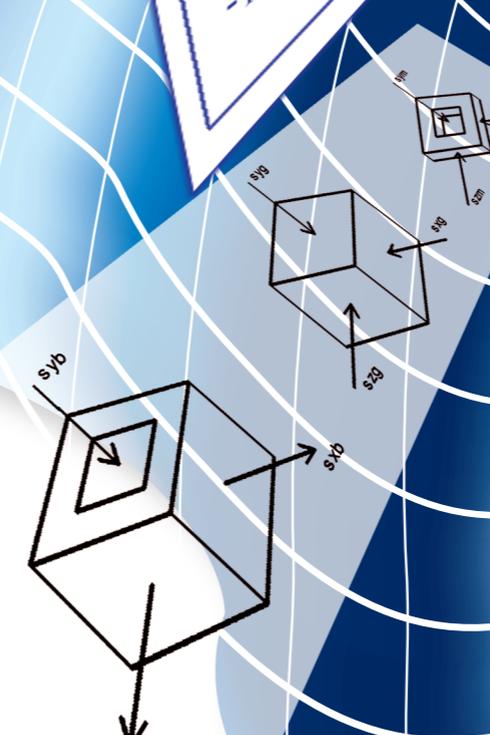
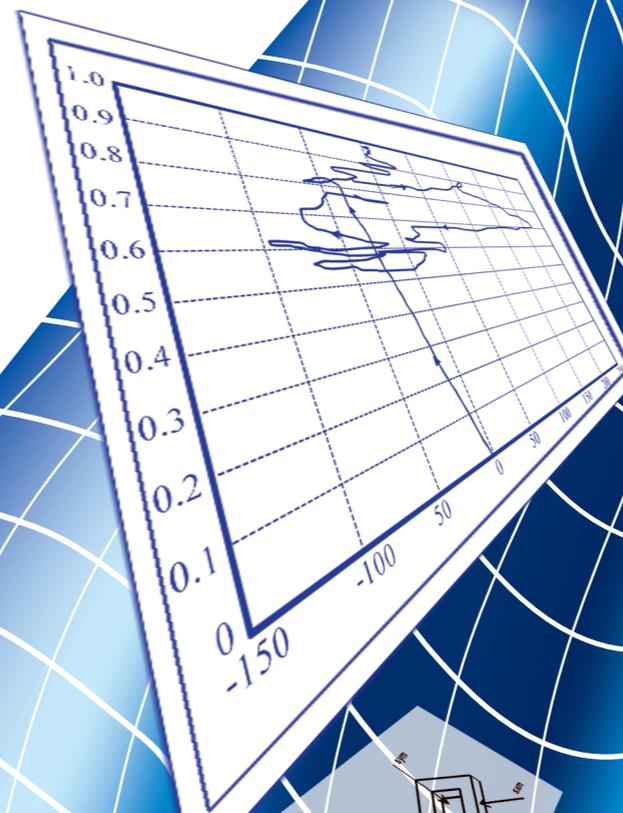
1. Reseña del libro La modernización entre cafetales. San José, Costa Rica, 1880:1930 147-149
Sanou, Ofelia.

Trabajos de Graduación 2007

- Lista de proyectos de graduación de grado y posgrado del año 2007 de la Facultad de Ingeniería 153-170

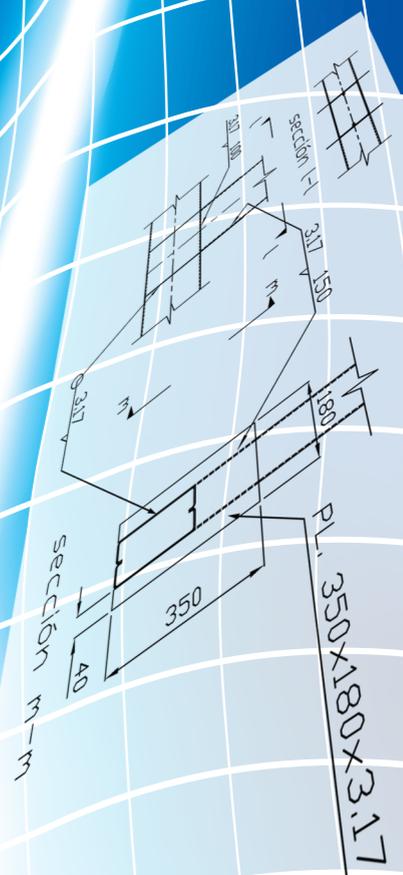
Normas

- Normas para la presentación de artículos a la Revista Ingeniería..... 173-180



INGENIERÍA

UCR



PROPIEDADES A COMPRESIÓN DE LA MAMPOSTERÍA DE BLOQUES DE CONCRETO

Alejandro Navas Carro

Resumen

En este artículo se presenta un estudio sobre el efecto de la resistencia de los bloques, el mortero de pega y el concreto de relleno sobre la resistencia a la compresión de la mampostería de bloques de concreto. Se presenta también la relación existente entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión de la mampostería.

Con base en resultados obtenidos por investigaciones realizadas sobre el tema a nivel nacional, se encontraron expresiones generales que ayudan a modelar el comportamiento de la mampostería ante cargas de compresión. Una vez obtenidas estas relaciones, se compararon con las relaciones propuestas por códigos nacionales e internacionales. Como resultado de mayor interés, se encontró que la resistencia a compresión de los bloques es el factor de mayor importancia en la resistencia a compresión de la mampostería de concreto; además, se concluyó que el Código Sísmico de Costa Rica 2002, CSCR-02 (Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica [CPCSCR], (2002), es conservador en sus recomendaciones en cuanto a la mampostería de concreto se refiere.

Palabras clave: mampostería, bloques de concreto, resistencia a compresión, pruebas de compresión, prismas de mampostería, códigos de construcción.

Summary

This article presents a study about the effect of the strength of the concrete masonry units, the mortar and the concrete infill on the compressive strength of concrete block masonry. The relation existing between the modulus of elasticity and the compressive strength of masonry is also presented.

Based on results obtained by investigations made on the subject at national level, general expressions were obtained to help model the behavior of masonry when being subjected to compressive loads. Once these relationships were obtained, they were compared with the relations proposed by national and international codes. As a main result, it was found that the compressive strength of concrete masonry units is the factor of greatest importance on the compressive strength of concrete block masonry; furthermore, it was concluded that the Costa Rican Seismic Code of 2002, CSCR-02 (Permanent Commission of Study and Revision of the Costa Rican Seismic Code [CPCSCR], 2002), is conservative in its recommendations regarding concrete masonry.

Key words: masonry, concrete blocks, compressive strength, compression tests, masonry prisms, building codes.

Recibido: 29 de setiembre del 2007 • **Aprobado:** 11 de marzo del 2008

1. INTRODUCCIÓN

La mampostería es un sistema constructivo de elementos estructurales y no estructurales que utiliza como base pequeñas unidades de construcción, tales como bloques o ladrillos, unidas entre sí con o sin mortero, concreto de relleno u otro método de unión aceptado

(Internacional Code Council [ICC], 2000). Entre los tipos de mampostería se pueden distinguir dos: integral y confinada. La mampostería integral consiste únicamente en paredes de mampostería reforzada; la mampostería confinada consiste en paños de mampostería confinados por vigas medianeras y columnas de concreto.

Cuadro 1. Factores de corrección para la resistencia en prismas.

Relación de esbeltez	1,3	1,5	2	2,5	3	4	5
Factor de corrección	0,75	0,86	1,0	1,04	1,07	1,15	1,22

Fuente: (ASTM C1314-03b).

En el país se utiliza también una combinación entre la mampostería integral y confinada, este sistema constructivo se encuentra ampliamente difundido a nivel nacional; no obstante, las propiedades mecánicas de este no se han establecido plenamente en el país.

En Costa Rica el CSCR-02 (CPCSCR, 2002) es el documento oficial que establece los requisitos para el análisis, diseño y construcción sismorresistente. En el caso específico de la mampostería de concreto, el CSCR-02 (CPCSCR) se basa en las especificaciones de códigos extranjeros tales como el *2000 International Building Code*, IBC (ICC, 2000) y el *American Concrete Institute*, ACI 530-05. La validez de las expresiones allí propuestas para nuestros materiales se ha cuestionado, ya que la mampostería es un material altamente heterogéneo, y presenta gran variabilidad en sus propiedades.

En las instalaciones del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LANAMME, se han realizado cuatro proyectos de investigación (Carvajal, 2000; Cascante, 2001; Navas, 1999; Rodríguez, 1999) sobre las propiedades mecánicas de la mampostería nacional, específicamente, de la mampostería de bloques de concreto. En estos proyectos se han medido y estudiado las propiedades mecánicas de la mampostería con bloques de 12x20x40 cm sin concreto de relleno y de 12x20x40, 15x20x40 y 20x20x40 cm con concreto de relleno.

En otros países se han realizado investigaciones sobre el tema; sin embargo, presentan información valiosa, como ya fue mencionado, su aplicación directa al medio costarricense debe verificarse, especialmente si se toman en cuenta las diferencias de materiales y mano de obra utilizados.

**Figura 1.** Prueba de compresión axial de prismas de mampostería.

Fuente: (El autor).

El objetivo principal de este artículo es estudiar las distintas variables que influyen sobre la resistencia a la compresión de la mampostería, f'_m , basándose, principalmente, en los datos recopilados por los estudios antes mencionados. Se pretende además establecer una relación entre f'_m y su módulo de elasticidad, E_m .

Con lo anterior se pretende encontrar expresiones con una mayor cantidad de datos experimentales, a fin de mejorar su validez. Las

expresiones encontradas serán comparadas con las recomendadas por el CSCR-02 (CPCSCR, 2002), el código ACI 530-05 y el IBC (ICC, 2000), esto con el propósito de determinar si las expresiones propuestas en estos códigos cumplen con el objetivo de ser conservadoras en el medio nacional.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Compresión axial de prismas

La prueba de compresión axial de prismas de mampostería de concreto se realizó según la norma ASTM E447-92b (American Society for Testing and Materials [ASTM], 1994), la cual pretende determinar el valor de f'_m por medio de prismas de bloques. Cada prisma se cargó monotónicamente hasta alcanzar su falla. Además, se instrumentó cada espécimen de tal forma que se pudiera medir la deformación vertical, ϵ_v , para determinar el módulo de elasticidad de la mampostería. (Figura 1).

Los prismas de mampostería deben estar formados por un mínimo de dos bloques apilados uno sobre el otro. Usualmente están constituidos por una unidad de longitud, una unidad de espesor y son de altura variable, normalmente de 1,3 a 5 veces el espesor, según lo establecido por la norma ASTM C1314-03b. Dependiendo de la relación de esbeltez (altura-espesor) utilizada se debe aplicar un factor de corrección a los resultados, de acuerdo con el Cadro 1.

Interpolando linealmente en la tabla anterior, para un prisma con bloque de 12 cm, la relación de esbeltez, h/t , es 3,333 y el factor de corrección es 1,097; para un prisma con bloque de 15 cm, $h/t = 2,667$ y el factor de corrección es 1,047; para un prisma con bloque de 20 cm, $h/t = 2$ y el factor de corrección es 1.

Cabe mencionar que a mayor altura, se obtienen especímenes más representativos, ya que sus modos de falla coinciden mejor con lo observado en muros estructurales (Drysdale & Hamid,

1979, Junio; Drysdale, Hamid & Baker, 1994). Asimismo, al usar mayor cantidad de juntas de mortero se modela mejor el comportamiento que tendrá la mampostería en la estructura. Es importante señalar que el uso de mayor altura, o más juntas, resultaría en un mejor modelo pero poco práctico, debido a la disponibilidad de equipo y lo difícil de manipular especímenes de mayor tamaño.

Drysdale *et al.* (1994), proponen la medición de f'_m mediante prismas de dos mitades de bloques (cortados a lo largo del eje longitudinal) y un bloque entero para formar especímenes con dos juntas de mortero, como se muestra en la Figura 2. Este tipo de especímenes también estuvo regularizado en la norma ASTM E477-92b (ASTM, 1994), sin embargo, en la versión actual, ASTM C1314-03a (ASTM, 2003), se utiliza una sola sisa con dos bloques enteros; este tipo de espécimen es menos representativo, pero más fácil de construir.

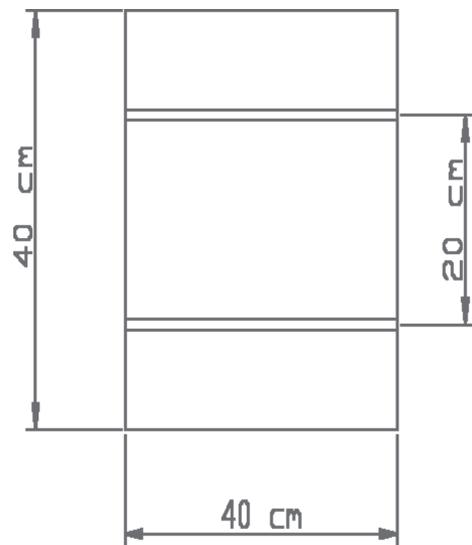


Figura 2. Esquema de prisma de bloques de concreto.

Fuente: (El autor).

La resistencia a compresión y el módulo de elasticidad de la mampostería se calcularon mediante las siguientes ecuaciones:

$$f'_m = \frac{P_u}{A_n} \quad (1)$$

$$E_m = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

Donde:

A_n = área neta (cm²),

E_m = módulo de elasticidad de la mampostería (kg/cm²),

f'_m = resistencia a compresión de la mampostería (kg/cm²),

P_u = carga máxima que soporta el prisma (kg),

σ = esfuerzo dentro del rango elástico (kg/cm²), y

ε = deformación unitaria correspondiente a σ (adimensional).

El criterio seguido para el cálculo de E_m es el propuesto por el código ACI 530-05. En este se especifica que se debe calcular como la pendiente de la región elástica de la curva esfuerzo vs deformación unitaria, tomando como límite inferior el punto correspondiente a un 5 % de la resistencia y como límite superior el correspondiente a un 33 % de la resistencia del prisma.

2.2 Construcción de prismas

Para las cuatro investigaciones mencionadas se fabricaron un total de 180 prismas, 90 sin concreto de relleno y 90 con concreto de relleno. Cada prisma fue elaborado reflejando la mano de obra nacional en las instalaciones del LANAMME.

En el Cuadro 2 se resumen las combinaciones de materiales utilizadas para cada tipo de prisma. Los materiales (concreto de relleno, bloques y mortero) se clasifican como A, B o C, nomenclatura que

Cuadro 2. Combinación de materiales utilizada para cada tipo de prisma.

Tipo	Tipo de prisma	Clase de bloque	Clase de mortero	Clase de concreto de relleno	Número de pruebas	Espesor nominal
SR-1	Sin relleno	A	A	-	10	12
SR-2	Sin relleno	A	B	-	10	12
SR-3	Sin relleno	A	C	-	10	12
SR-4	Sin relleno	C	A	-	10	12
SR-5	Sin relleno	C	B	-	10	12
SR-6	Sin relleno	C	C	-	10	12
SR-7	Sin relleno	D	A	-	10	12
SR-8	Sin relleno	D	B	-	10	12
SR-9	Sin relleno	D	C	-	10	12
CR-1	Con relleno	A	B	A	10	12
CR-2	Con relleno	A	B	C	10	12
CR-3	Con relleno	A	B	D	10	12
CR-4	Con relleno	A	B	A	10	15
CR-5	Con relleno	A	B	B	10	15
CR-6	Con relleno	A	B	C	10	15
CR-7	Con relleno	A	A	A	10	20
CR-8	Con relleno	A	A	B	10	20
CR-9	Con relleno	A	A	C	10	20

Fuente: (El autor).

adoptó el CSCR-02 (CPCSCR, 2002) después de los trabajos de investigación realizados por Carvajal (2000), Cascante (2001), Navas (1999) y Rodríguez (1999). Aquellos materiales clasificados aquí como *D*, no cumplen con los requerimientos mínimos establecidos en el CSCR-02 (CPCSCR).

Los prismas utilizados en las investigaciones mencionadas son del tipo que se muestra en la Figura 2; por lo tanto, cada prisma tiene 40 cm de alto, 40 cm de largo y espesor variable. Para obtener las dos mitades de bloques necesarias para la fabricación de cada prisma, se procedió a cortar los bloques longitudinalmente por medio de un disco diamantado y una guía para facilitar el corte; el proceso se realizó con los bloques húmedos para evitar que se dañaran.

Los especímenes con concreto de relleno fueron rellenados en dos etapas, con el objetivo de dejar una junta fría a la mitad de la altura del prisma.

Todas las superficies de los especímenes fueron niveladas antes de la prueba mediante el proceso de capeo, con el fin de garantizar una distribución de esfuerzos uniforme.

Todos los especímenes, con y sin concreto de relleno, fueron fallados a una edad de 28 d.

2.3 Instrumentación

Cada prisma se instrumentó con un medidor de deformación (Linear Voltage Differential Transducer, LVDT) a lo largo de su eje vertical para la medición de deformaciones unitarias; esto con el fin de poder determinar el módulo de elasticidad de la mampostería.

Para la aplicación de la carga axial se utilizó una máquina universal de cabeza móvil y placas de acero de 2,54 cm de espesor entre la máquina universal y los prismas.

3. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Resistencia a compresión de la mampostería de concreto

Existen muchos factores, tanto geométricos como de resistencia, que afectan la resistencia a compresión de los prismas de mampostería; a continuación se exponen algunos de los más importantes. Se presentan datos nacionales, obtenidos por las investigaciones de Carvajal (2000), Cascante (2001), Navas (1999) y Rodríguez (1999).

Cuadro 3. Resistencia a compresión de los prismas de mampostería sin concreto de relleno de acuerdo con el tipo de mortero y resistencia del bloque utilizado.

	f'_b con base en área neta (kg/cm ²)	f'_b con base en área bruta (kg/cm ²)	Clase de bloque según CSCR-02 ⁽¹⁾	f'_m (kg/cm ²)
Mortero A	166	96	A	160
	76	46	C	82
	61	36	D	66
Mortero B	166	96	A	141
	76	46	C	82
	61	36	D	69
Mortero C	166	96	A	99
	76	46	C	70
	61	36	D	69

Fuente: (Navas, 1999).

3.1.1 Resistencia a compresión del bloque, f'_b

En el Cuadro 3 se presentan los resultados obtenidos por Navas (1999) de f'_m para tres resistencias de bloque utilizadas en prismas sin concreto de relleno, agrupadas según el tipo de mortero utilizado; en las Figuras 3 y 4 se muestran las relaciones obtenidas a partir de estos datos.

Como se muestra en la Figura 4, la resistencia a compresión de la mampostería depende directamente de la resistencia a la compresión de los bloques; al aumentar f'_b también aumenta f'_m . El coeficiente de correlación obtenido indica que el 78% de la variación en f'_m está explicada por variaciones en f'_b . Esto se debe a que el bloque es el elemento que se encarga de confinar a los demás materiales (mortero y concreto de relleno); por lo tanto, su resistencia, tanto a esfuerzos de compresión como de tracción es determinante para la resistencia de la mampostería (Figura 5). Esto concuerda con Hamid & Drysdale (1979), en cuanto a que el factor más importante para f'_m es la resistencia del bloque.

Al depender directamente la resistencia a la compresión de la mampostería de la resistencia a compresión del bloque, es posible afirmar que el CSCR-02 (CPCSCR, 2002) es conservador en sus acotaciones al recomendar valores de f'_m (100 kg/cm² para la clase A, 70 kg/cm² para la clase B y 60 kg/cm² para la clase C), cuando no existen ensayos de prismas.

3.1.2 Resistencia a compresión del mortero de pega, $f'_{mortero}$

En el Cuadro 4 se exponen los resultados hallados por Navas (1999) de f'_m para tres resistencias de mortero utilizadas en prismas sin concreto de relleno, agrupadas según el tipo de bloque utilizado; en las Figuras 6 y 7 se muestran las relaciones obtenidas a partir de estos datos.

En el Cuadro 4, se puede observar que cuando se utilizaron bloques de buena calidad (clase A), el valor de f'_m estuvo siempre limitado por f'_b , aun cuando se utilizaron morteros clase A, con resistencias mayores a las de los bloques.

Al utilizar bloques de resistencia baja (clases C y D), el utilizar morteros con alta resistencia logró apenas un leve aumento del valor de f'_m con respecto a f'_b . Lo anterior ratifica que la manera más eficiente de aumentar la resistencia a compresión de la mampostería, es aumentando la resistencia a compresión de los bloques.

En la Figura 6 se puede observar que para bloques clase A, el mortero utilizado influye directamente sobre f'_m , mientras que para bloques clase C y D, $f'_{mortero}$ prácticamente no influye sobre el valor de f'_m . Para los prismas contruidos con bloque A, un aumento en $f'_{mortero}$ de 136% produce un aumento en f'_m de 62%; para los prismas contruidos con bloque C, el mismo aumento en $f'_{mortero}$ produce un aumento en f'_m de apenas un 17%; para los prismas hechos con bloque muy pobre (clase D), el mismo aumento en $f'_{mortero}$ no produce variación alguna en el valor de f'_m . De lo anterior es posible observar que cuando la resistencia de los bloques es inferior a la de los morteros, carece de importancia utilizar resistencias altas en estos últimos.

Lo anterior se debe a que cuando la resistencia del bloque es baja, la falla está gobernada por f'_b , de manera que indiferentemente de cuál sea la resistencia del mortero, la falla se iniciará en el bloque.

En la Figura 7 se puede observar que al disminuir la resistencia de los morteros, la resistencia de los prismas es también menor; esto se debe a que los morteros de baja resistencia sufren una mayor deformación transversal (por tener un menor módulo de elasticidad que los bloques) e inducen mayores esfuerzos de tracción en la interfase de contacto entre los dos materiales (Drysdale *et al.*, 1994). Se observa también la pobre correlación existente ($R^2 = 0,094$) entre f'_m y $f'_{mortero}$; lo anterior indica que únicamente el 9,4% de la variación en f'_m está explicada por variaciones en $f'_{mortero}$.

En cuanto a la mampostería con concreto de relleno, aunque no se cuenta con suficientes datos nacionales, de un estudio realizado por Khalaf (1996) se concluye que aumentar $f'_{mortero}$ tiene un efecto insignificante sobre el valor de f'_m .

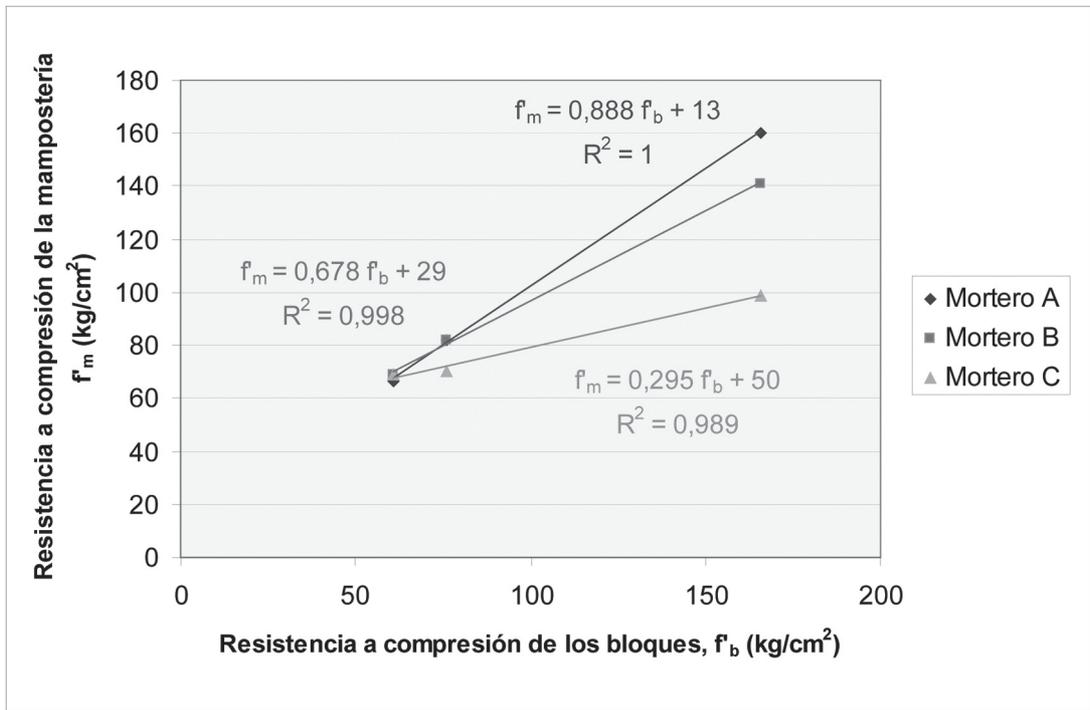


Figura 3. Resistencia a compresión de los prismas de mampostería sin concreto de relleno vs resistencia a compresión de los bloques según el tipo de mortero utilizado.

Fuente: (Navas, 1999).

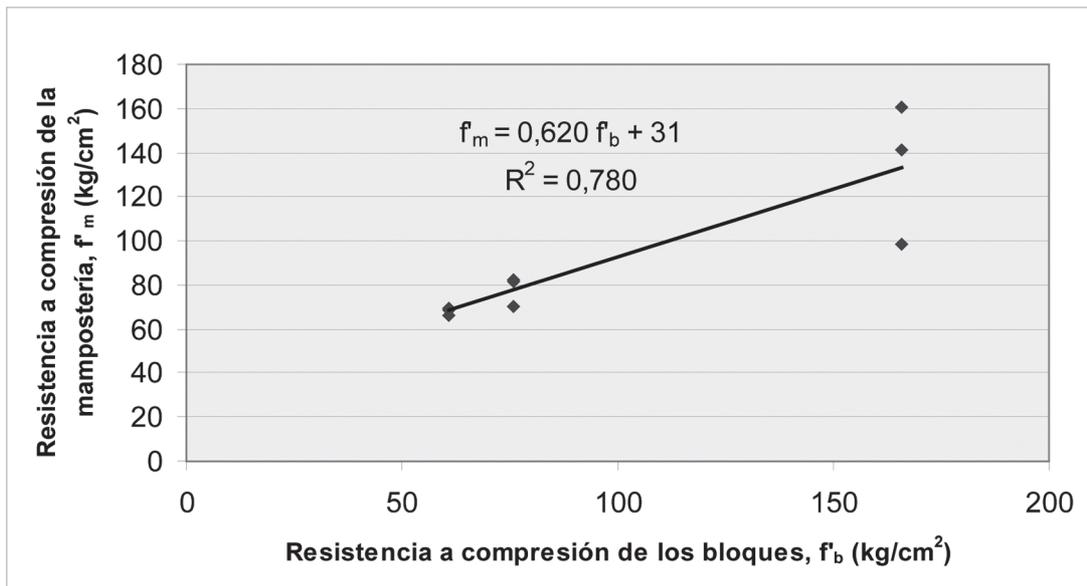


Figura 4. Relación general entre la resistencia a compresión de los prismas de mampostería sin concreto de relleno y la resistencia a compresión de los bloques.

Fuente: (Carvajal, 2000; Cascante, 2001; Navas, 1999; Rodríguez, 1999).

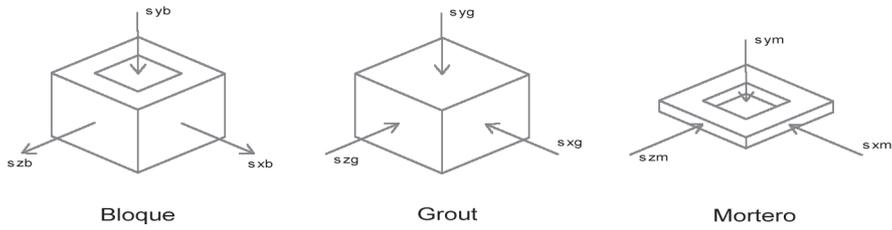


Figura 5. Esfuerzos bajo carga axial en prismas de mampostería.⁽²⁾

Fuente: (El autor).

Cuadro 4. Resistencia a compresión de los prismas de mampostería sin concreto de relleno de acuerdo con el tipo de bloque y resistencia del mortero utilizado.

	$f'_{mortero}$ (kg/cm ²)	f'_m (kg/cm ²)
	177	160
Bloque A (166 kg/cm ²)	140	141
	75	99
	177	82
Bloque C (76 kg/cm ²)	140	82
	75	70
	177	66
Bloque D ⁽³⁾ (61 kg/cm ²)	140	69
	75	69

Fuente: (Navas, 1999).

Cuadro 5. Resistencia a compresión de los prismas de mampostería con concreto de relleno.

Tipo	f'_g (kg/cm ²)	f'_m (kg/cm ²)
CR-1	182	128
CR-2	126	126
CR-3	79	86
CR-4	218	121
CR-5	169	102
CR-6	122	86
CR-7	181	164
CR-8	145	138
CR-9	124	142

Fuente: (Carvajal, 2000; Cascante, 2001; Rodríguez, 1999).

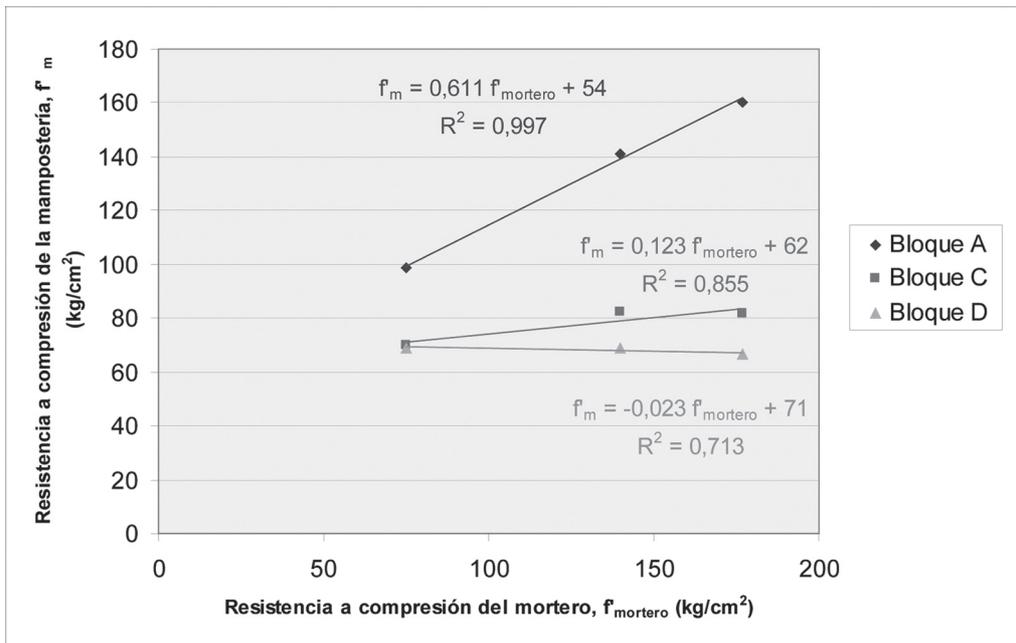


Figura 6. Resistencia a compresión de los prismas de mampostería sin concreto de relleno vs resistencia a compresión del mortero según el tipo de bloque utilizado.

Fuente: (Navas, 1999).

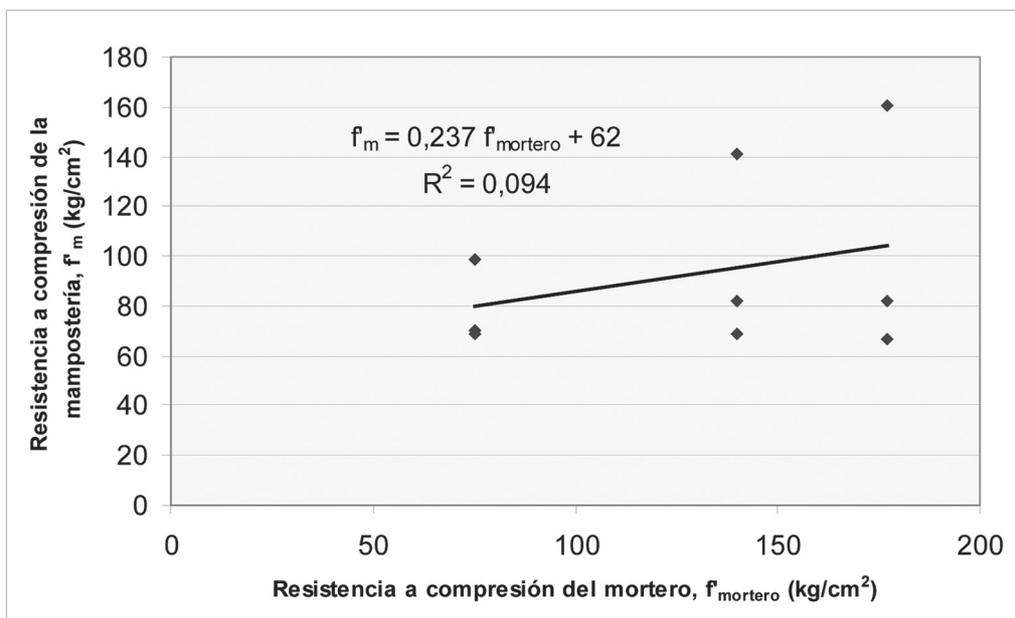


Figura 7. Relación general entre la resistencia a compresión de los prismas de mampostería sin concreto de relleno y la resistencia a compresión del mortero.

Fuente: (Navas, 1999).

A partir de lo comentado anteriormente, se puede afirmar que la resistencia de la mampostería f'_m , está limitada principalmente por la resistencia de los bloques; la resistencia del mortero y del concreto de relleno, tienen menor relevancia.

3.1.3 Resistencia a compresión del concreto de relleno, f'_g

En el Cuadro 5 se presentan los resultados obtenidos por Carvajal (2000), Cascante (2001) y Rodríguez (1999) de f'_m para las distintas resistencias de concreto de relleno utilizadas; en la Figura 8 se muestra la relación obtenida entre ambas variables.

La mampostería con concreto de relleno presenta cargas de falla inferiores a aquellas predichas superponiendo las capacidades del concreto de relleno y del prisma sin concreto de relleno (Drysdale & Hamid, 1979, Junio; Drysdale *et al.*). Se ha encontrado que los prismas sin concreto de relleno tienen mayor resistencia (basándose en el área neta) que aquellos con concreto de relleno (basándose en el área bruta) (Cheema & Klingner, 1986, Enero-Febrero; Khalaf, 1997). Lo anterior se debe a que en la mampostería rellena el bloque no sólo debe confinar el mortero, sino también el concreto de relleno; así, ante una misma carga, el esfuerzo que se debe resistir es mayor, por lo que f'_m disminuye.

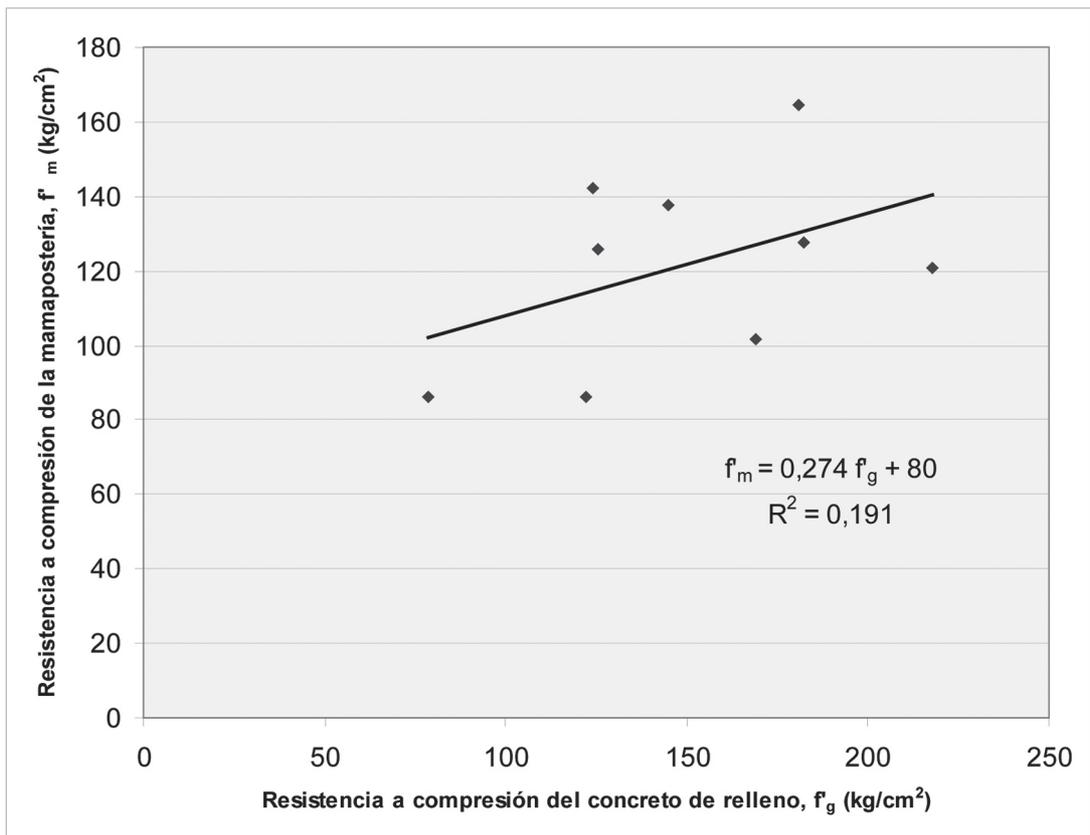


Figura 8. Resistencia a compresión de los prismas de mampostería con concreto de relleno vs resistencia a compresión del concreto de relleno.

Fuente: (Carvajal, 2000; Cascante, 2001; Rodríguez, 1999).

Cuadro 6. Comparación entre f'_m y f'_b en prismas de mampostería con concreto de relleno.

Ancho nominal (cm)	f'_m , según clase de concreto de relleno (kg/cm ²)				f'_b (kg/cm ²)
	A	B	C	D	
12	128	-	126	86	154
15	115	102	86	-	162
20	164	138	142	-	171

Fuente: (Carvajal, 2000; Cascante, 2001; Rodríguez, 1999).

En las investigaciones realizadas por Carvajal (2000) y Navas (1999), se construyeron prismas de mampostería con y sin concreto de relleno respectivamente, con bloque clase A de 12 cm (ancho nominal) y mortero clase B, de resistencias similares. Los prismas con concreto de relleno dieron como resultado un máximo de 128 kg/cm² (al utilizar concreto de relleno clase A), mientras que los prismas sin concreto de relleno dieron como resultado una resistencia promedio de 141 kg/cm². Los datos obtenidos por ambas investigaciones siguen el patrón de comportamiento descrito en el párrafo anterior.

En la Figura 8 se observa que al aumentar f'_g , f'_m también aumenta, pero no en forma proporcional. Un aumento de un 176 % (del concreto de relleno con menor resistencia al de mayor resistencia utilizado) produce un aumento en el valor de f'_m de apenas un 41 %. El coeficiente de correlación obtenido ($R^2 = 0,191$) ratifica la afirmación anterior, puesto que sugiere que solamente el 19,1 % de las variaciones en f'_m se deben a variaciones en f'_g . Además, por más alto que sea el valor de f'_g , la resistencia a compresión de la mampostería siempre estará restringida, principalmente, por la resistencia del bloque que se utilice. Lo anterior se ejemplifica claramente en el Cuadro 6, el cual incluye datos promedio de f'_m obtenidos por Carvajal (2000), Cascante (2001) y Rodríguez (1999).

Estudios realizados referentes al efecto de f'_g sobre f'_m (Boult, 1979; Abril; Khalaf, 1996) señalan que igualar las características de deformación del concreto de relleno con las del

bloque es más efectivo, en términos de f'_m , que aumentar f'_g . Según estos estudios, la situación anterior se logra al utilizar un concreto de relleno entre 45 % y 50 % más resistente que el bloque; sin embargo, su costo lo hace poco práctico. Resulta de mayor importancia usar un concreto con un alto revenimiento para evitar que queden espacios vacíos dentro de la mampostería (Drysdale *et al.*, 1994).

Según lo establecido en el CSCR-02 (CPCSCR, 2002), “la mampostería Clase A debe utilizar concreto de relleno Clase A, la mampostería Clase B debe usar concreto de relleno Clases A o B y la mampostería Clase C debe usar concreto de relleno Clases A, B o C.” No obstante, a partir de los resultados obtenidos para cada uno de los tipos de prisma construidos para las investigaciones realizadas en el LANAMME, es posible afirmar que aun cuando se utiliza concreto de relleno clase D, se obtiene mampostería clase B (tipo de prisma CR-3); al utilizar concreto de relleno clase C, se obtiene mampostería clase A (tipo de prisma CR-2 y CR-9) o clase B (tipo de prisma CR-6).

Los datos anteriores sugieren que el no cumplir con la resistencia del concreto de relleno especificada por el CSCR-02 (CPCSCR, 2002) para obtener una resistencia mínima en la mampostería no es tan crítico; incluso utilizando resistencias menores a las indicadas se logra la resistencia deseada en la mampostería. Lo anterior es válido para bloques con una resistencia mínima de 154 kg/cm², por lo tanto, aproximadamente un 14 % más que el valor mínimo recomendado para bloques clase A.

3.2 Módulo de elasticidad de la mampostería de concreto

A continuación se presentan los valores promedio de resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, para todos los tipos de prismas construidos en las investigaciones de Carvajal (2000), Cascante (2001), Navas (1999) y Rodríguez (1999).

Cuadro 7. Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad promedio para cada tipo de prisma de mampostería.

Tipo	f'_m (kg/cm ²)	E_m (kg/cm ²)
SR-1	160	143187
SR-2	141	130299
SR-3	99	103363
SR-4	82	76512
SR-5	82	80161
SR-6	70	57746
SR-7	66	56983
SR-8	69	62739
SR-9	69	65042
CR-1	86	75564
CR-2	126	80631
CR-3	128	163054
CR-4	86	80397
CR-5	102	98564
CR-6	121	89953
CR-7	164	170978
CR-8	138	133975
CR-9	142	133521

Fuente: (Carvajal, 2000; Cascante, 2001; Navas, 1999; Rodríguez, 1999).

En las siguientes figuras, se muestran las relaciones encontradas a partir de la totalidad de datos generados por las investigaciones antes mencionadas. En la Figura 9 se presenta la relación encontrada únicamente para los prismas sin concreto de relleno, en la Figura 10 se muestra la relación para los prismas con concreto de relleno.

En las Figuras 9 y 10 se observa una mayor dispersión en los datos para mampostería con concreto de relleno que en los datos para mampostería hueca. Esto se debe a que al utilizar concreto de relleno, se introduce una variable más, que afecta el valor de f'_m , por lo que se espera una mayor variabilidad.

En la Figura 11 se presenta la relación general encontrada para todos los prismas fallados. Además, se muestra el límite superior e inferior para la correlación entre E_m y f'_m .

En la Figura 11 se nota claramente la relación lineal existente entre la resistencia a compresión de la mampostería y su módulo de elasticidad; al aumentar el valor de f'_m también aumenta E_m . La correlación general que se obtuvo entre E_m y f'_m es: $E_m = 932 f'_m$. La dispersión de los valores es alta, sin embargo, la relación encontrada se ubica dentro del rango de comportamiento esperado, según Drysdale *et al.* (1994). El coeficiente de determinación, R^2 , indica que las variaciones en f'_m explican el 49 % de las variaciones en E_m .

En el Cuadro 8 se presentan las expresiones propuestas por cada código para la relación entre E_m y f'_m , junto con el resultado obtenido en este artículo.

Cuadro 8. Comparación de resultados obtenidos en este artículo para la relación entre E_m y f'_m con respecto a los códigos para diseño de mampostería.

	E_m vs f'_m
ACI 530-05	$E_m = 900 f'_m$
IBC	$E_m = 900 f'_m$
CSCCR-02	$E_m = 750 f'_m$
Este artículo	$E_m = 932 f'_m$

Fuente: (ACI 530-05; CPCSCR, 2002; ICC, 2000).

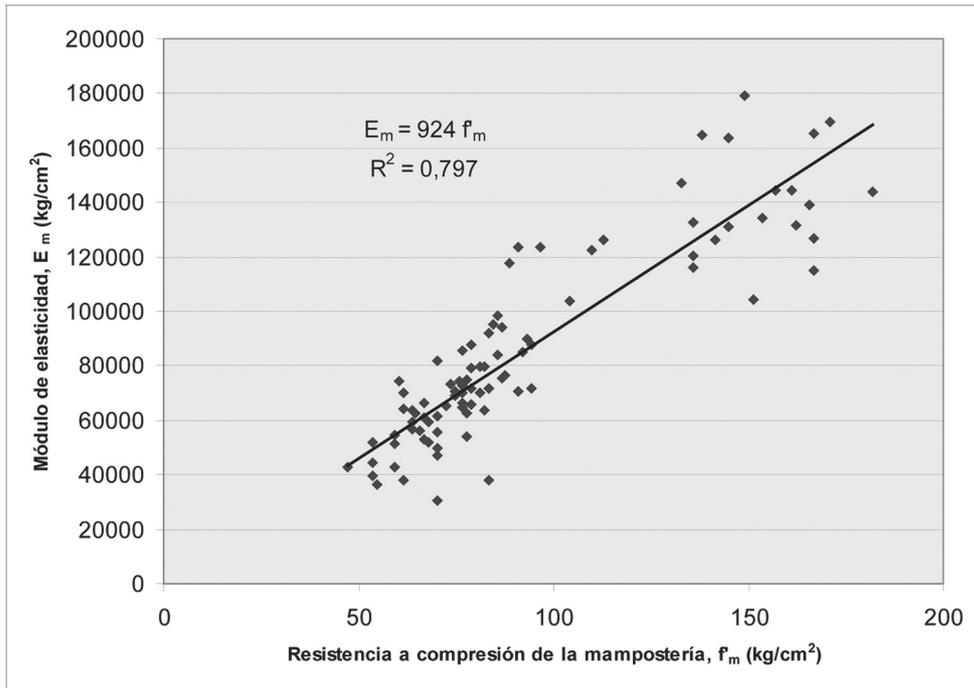


Figura 9. Módulo de elasticidad vs resistencia a la compresión de los prismas de mampostería sin concreto de relleno.
 Fuente: (Navas, 1999).

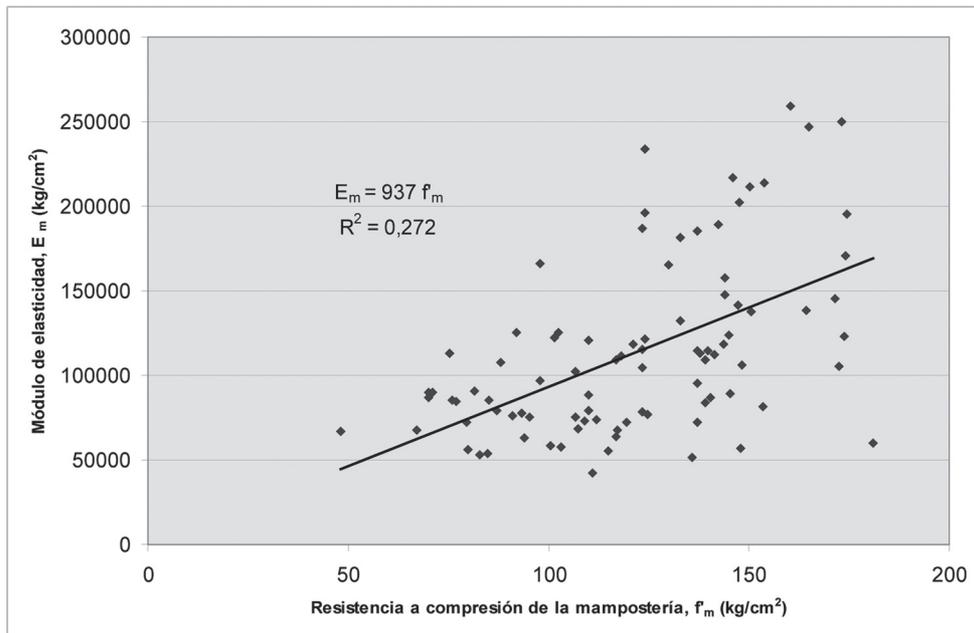


Figura 10. Módulo de elasticidad vs resistencia a la compresión de los prismas de mampostería con concreto de relleno.
 Fuente: (Carvajal, 2000; Cascante, 2001; Rodríguez, 1999).

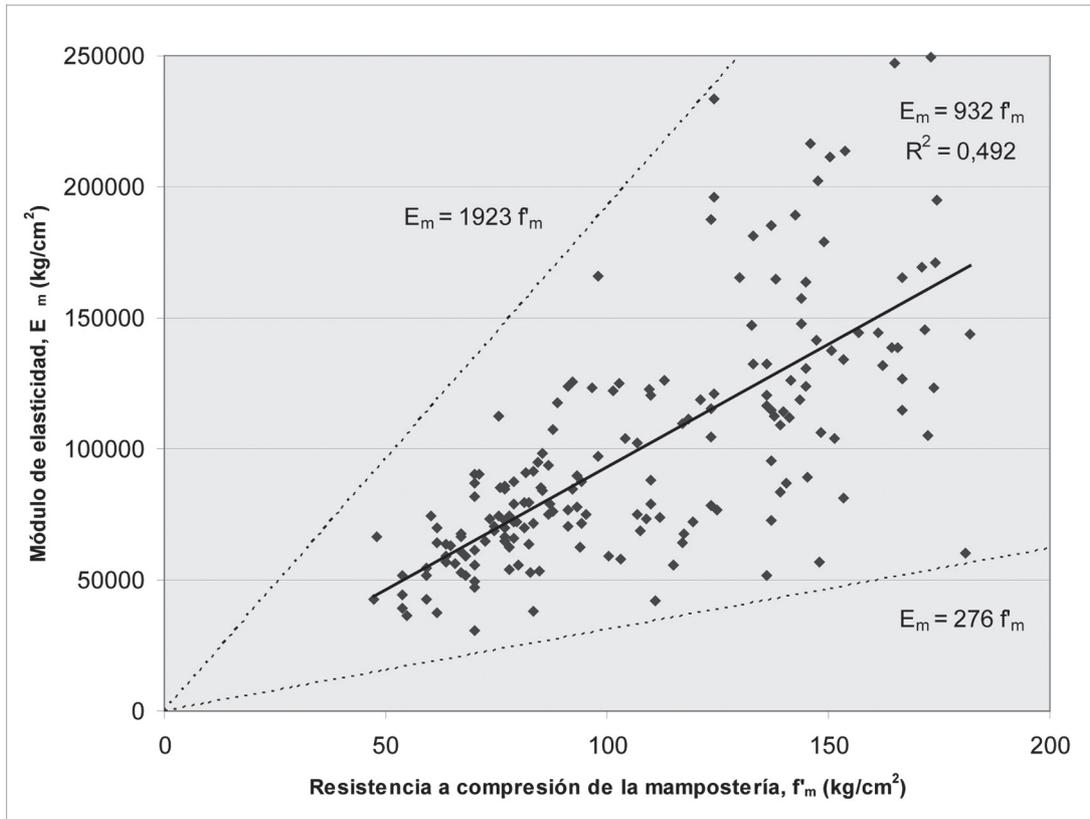


Figura 11. Módulo de elasticidad vs resistencia a la compresión de los prismas de mampostería con y sin concreto de relleno.

Fuente: (Carvajal, 2000; Cascante, 2001; Navas, 1999; Rodríguez, 1999).

El CSCR-02 (CPCSCR, 2002), basado en los estudios nacionales citados (Carvajal, 2000; Cascante, 2001; Navas, 1999; Rodríguez, 1999), en su apartado 9.3.4, propone que el módulo de elasticidad de la mampostería con unidades de concreto se puede calcular como $E_m = 750 f'_m$. El IBC (ICC, 2000) recomienda un valor de E_m/f'_m de 900. El código ACI 530-05 sugiere un valor para E_m/f'_m de 900. En este artículo se obtuvo un valor de 932, el cual se encuentra dentro de los datos anteriormente citados. Cabe destacar que a nivel nacional, el CSCR-02 (CPCSCR) es conservador en un 20%. A nivel internacional, las recomendaciones proporcionadas por el IBC (ICC) y el código ACI 530-05 difieren del comportamiento observado en la mampostería nacional; el CSCR-02 (CPCSCR), como ya fue mencionado, es más conservador.

Es importante mencionar que el valor obtenido es bastante representativo de la mampostería nacional, puesto que proviene de datos para mampostería con y sin concreto de relleno, varias resistencias de bloques, morteros y concretos de relleno, y varios espesores de bloque.

3.3 Modos de falla observados en los prismas de mampostería

3.3.1 Prismas sin concreto de relleno

El modo de falla observado en los prismas fallados para la investigación realizada por Navas (1999) fue de agrietamientos longitudinales a lo largo de los lados y extremos. Este patrón de

agrietamiento está influenciado por el mortero de pega que causa esfuerzos de tracción al prisma en las juntas, ya que al ser el mortero más débil que los bloques, se expande lateralmente a una tasa mayor.

3.2.2 Prismas con concreto de relleno

En los prismas fallados para las investigaciones de Carvajal (2000), Cascante (2001) y Rodríguez (1999), se observaron dos tipos de falla. Algunos de los especímenes presentaron un agrietamiento iniciando en el concreto de relleno y propagándose al bloque; la grieta se propagó sobre el eje vertical del prisma. En otros prismas, la grieta se inició en las aristas verticales del prisma, presentan luego un desprendimiento de las paredes del bloque, por lo que el concreto de relleno queda expuesto y aparentemente intacto.

Los tipos de falla observados (Figuras 12 y 13) obedecen a los esfuerzos de tracción que ejercen tanto el mortero de pega como al concreto de relleno en los bloques, por lo que es importante nuevamente reafirmar que a mayor resistencia de los bloques, mayor resistencia se obtendrá en la mampostería. Es decir, la forma más eficiente de aumentar la resistencia a compresión de la mampostería, es aumentando la resistencia de los bloques.

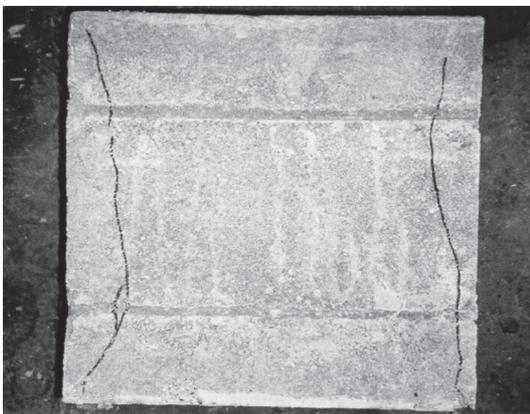


Figura 12. Falla de un prisma de mampostería de concreto, cara frontal.

Fuente: (El autor).

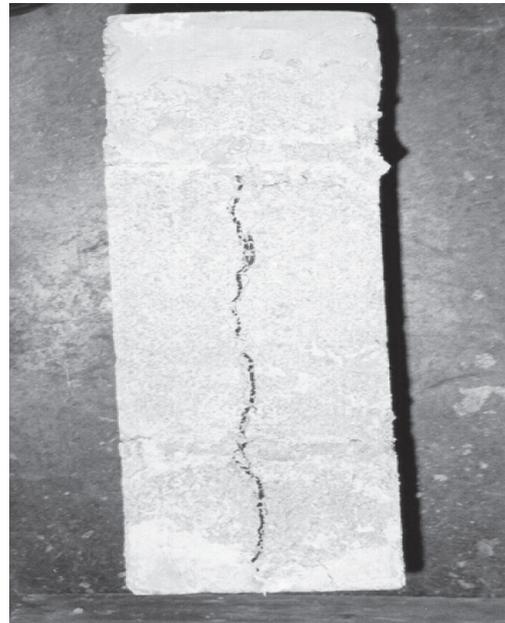


Figura 13. Falla de un prisma de mampostería de concreto, cara lateral.

Fuente: (El autor).

CONCLUSIONES

Luego de analizar los datos experimentales obtenidos por las investigaciones nacionales (Carvajal, 2000; Cascante, 2001; Navas, 1999; Rodríguez, 1999) sobre las propiedades a compresión de la mampostería de bloques de concreto y las relaciones generales mostradas en este artículo, es posible concluir lo siguiente:

1. La resistencia a compresión de la mampostería es directamente proporcional a la resistencia a compresión de los bloques (Figura 4). Aumentar la resistencia a compresión de los bloques, es la manera más eficiente de aumentar la resistencia a compresión de la mampostería.
2. En la mampostería sin concreto de relleno, al disminuir la resistencia a compresión del mortero de pega, disminuye también la resistencia a compresión de la mampostería (Figura 7); sin embargo,

cuando la resistencia de los bloques es inferior a la de los morteros, utilizar morteros con alta resistencia no influye de manera significativa sobre la resistencia a compresión de la mampostería (Figura 6). En mampostería con concreto de relleno, la resistencia del mortero tiene un efecto insignificante sobre la resistencia de esta.

3. Los prismas con concreto de relleno presentan una menor resistencia (con base en el área bruta) que aquellos sin concreto de relleno (con base en el área neta).
4. Al aumentar la resistencia a compresión del concreto de relleno, también aumenta la resistencia de la mampostería, pero no en forma proporcional (Figura 8). Por más alta que sea la resistencia del concreto de relleno, la resistencia de la mampostería estará restringida, principalmente, por la resistencia de los bloques (Cuadro 6).
5. El no cumplir con la resistencia mínima especificada para el concreto de relleno en el CSCR-02 (CPCSCR, 2002), no es un factor tan crítico para la obtención de la resistencia deseada en la mampostería.
6. Al comparar los valores para el coeficiente de determinación obtenidos en las Figuras 4, 7 y 8 (0,780; 0,094 y 0,191 respectivamente), se ratifica que la mayor parte de las variaciones en la resistencia a compresión de la mampostería se deben a variaciones en la resistencia de los bloques.
7. Conforme aumenta el módulo de elasticidad de la mampostería, también aumenta su resistencia a la compresión (figura 11). Al comparar la expresión obtenida por este artículo ($E_m = 932 f'_m$) con la expresión propuesta por el CSCR-02 (CPCSCR, 2002), se concluye que el código citado es conservador en un 20% en su recomendación. Se concluye, además, que las expresiones propuestas por el IBC (ICC, 2000) y el ACI 530-05 no son conservadoras para la mampostería nacional.

SIMBOLOGÍA

A_n	Área neta (cm ²)
E_m	Módulo de elasticidad de la mampostería (kg/cm ²)
f'_b	Resistencia a compresión de los bloques de concreto (kg/cm ²)
f'_g	Resistencia a compresión del concreto de relleno (kg/cm ²)
f'_m	Resistencia a compresión de la mampostería (kg/cm ²)
$f'_{mortero}$	Resistencia a compresión del mortero de pega (kg/cm ²)
h/t	Razón de esbeltez
P_u	Carga máxima que soporta un prisma de mampostería (kg)
ϵ_v	Deformación unitaria vertical (adimensional)
ϵ	Deformación unitaria correspondiente a σ (adimensional)
σ	Esfuerzo dentro del rango elástico (kg/cm ²)

NOTAS

1. Los bloques clasificados como clase *D* no alcanzan la resistencia indicada para bloques clase *C* en el CSCR-02 (CPCSCR, 2002).
2. La letra *s* en la figura indica la presencia de un esfuerzo; las letras *x*, *y* y *z* indican la dirección en que actúa dicho esfuerzo y las letras *b*, *g* y *m* indican el material sobre el cual actúa el esfuerzo, respectivamente: bloque, *grout* y mortero.
3. Los bloques clasificados como clase *D* no alcanzan la resistencia indicada para bloques clase *C* en el CSCR-02 (CPCSCR, 2002).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Concrete Institute (ACI). (2005). *Building Code Requirements for Masonry Structures (ACI 530-05/ASCE 5-05/TMS 402-05)*. Detroit, MI: Masonry Standards Joint Committee.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2003). ASTM C1314-03b: Standard test method for compressive strength of masonry prisms. West Conshohocken, PA.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (1994). ASTM E447: Standard test methods for compressive strength of masonry prisms. West Conshohocken, PA.
- Boult, B. (1979). Concrete masonry prism testing. *Journal of the American Concrete Institute*, 76(24), 513-535.
- Carvajal, W. (2000). Propiedades mecánicas de la mampostería de bloques rellenos de concreto de 12 x 20 x 40 cm. Informe de trabajo de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Cascante, L. (2001). Propiedades mecánicas de la mampostería de bloques rellenos de concreto de 20 x 20 x 40 cm. Informe de trabajo de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Cheema, T. & Klinger, R. (1986). Compressive strength of concrete masonry prisms. *Journal of the American Concrete Institute*, 83(11), 88-97.
- Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica (CPCSCR). (2002). *Código Sísmico de Costa Rica 2002*. (3ª ed.). Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Drysdale, R. & Hamid, A. (1979). Behavior of concrete block masonry under axial compression. *Journal of the American Concrete Institute*, 76(32), 707-721.
- Drysdale, R., Hamid, A. & Baker, L. (1994). *Masonry structures, behavior and design*. New Jersey: Prentice Hall.
- Hamid, A. & Drysdale, R. (1979). Suggested failure criteria for grouted concrete masonry under axial compression. *Journal of the American Concrete Institute*, 76(43), 1047-1061.
- International Code Council, Inc. (ICC). (2000). *2000 International Building Code*. Estados Unidos: International Code Council, Inc.
- Khalaf, F. (1996). Factors influencing compressive strength of concrete masonry prisms. *Magazine of Concrete Research*, 48(175), 95-101.
- Khalaf, F. (1997). Blockwork masonry compressed in two orthogonal directions. *Journal of Structural Engineering*, 123(5), 591-596.
- Navas, A. (1999). Propiedades mecánicas de mampostería de concreto. Proyecto de tesis para optar por el grado de Maestría en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Rodríguez, R. (1999). Medición de las propiedades estructurales en la mampostería de bloques de concreto rellenos de 15 x 20 x 40 cm. Informe de trabajo de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

SOBRE EL AUTOR

Alejandro Navas Carro

Ingeniero Civil.

Profesor de la Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.

Director del Laboratorio Nacional de Materiales

y Modelos Estructurales (LANAMME) de la
Universidad de Costa Rica.

Apartado postal: 2060, UCR, San José, Costa Rica.

Teléfono: 2207-4186, Facsímil: 2207-4440

Correo electrónico: anavas@lanamme.ucr.ac.cr

Colaboración: Gloriana Arrieta Martínez

Estudiante de cuarto año de la Escuela de
Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.

Teléfono: 8827-6846

Correo electrónico: gloriglori01@gmail.com