

## Obtención de características geométricas y mecánicas del ladrillo de barro recocido de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

### *Geometrical and mechanical characteristics of clay brick for Tuxtla Gutierrez, Chiapas*

*Alejandro Ruiz Sibaja,<sup>1</sup> G. Silva Acevedo,<sup>2</sup> A. De León Argüello,<sup>2</sup> Moisés Nazar Beutelspacher,<sup>1</sup> Francisco Vidal Sánchez<sup>3</sup>*

#### RESUMEN

Desde 2008 se ha estado caracterizando, en la Universidad Autónoma de Chiapas, el ladrillo de barro que se utiliza en la construcción de edificaciones de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. El estudio de las piezas individuales comprende los siguientes aspectos: identificación de la variación de las dimensiones geométricas, obtención de la variación del peso, obtención del índice de absorción, determinación de la resistencia a flexión y compresión. También se realizaron ensayos a compresión en pilas de ladrillos unidas con el mortero utilizado comúnmente en la práctica constructiva local. De igual manera, se realizaron pruebas de compresión en probetas de este mortero. El procedimiento se ajustó a lo indicado por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) y por las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004). Se encontró que las piezas ensayadas no cumplen con la resistencia mínima a compresión que se recomienda en la normativa NMX-C-044-ONNCCE (2005). Una situación semejante ocurre para el mortero estudiado pues su resistencia promedio a compresión es mucho menos que aquella que se menciona en las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004).

**Palabras clave:** Resistencia a compresión, mortero, ladrillo de barro.

#### ABSTRACT

Since 2008 it has been testing at the Autonomous University of Chiapas the clay brick used in buildings of the city of Tuxtla Gutierrez, Chiapas, Mexico. The study includes the identification of variations on geometry properties, weight, absorption and strength of bricks. Besides the individual properties of brick units, piles of bricks were tested to determinate theirs compression strength. Similarly, compression tests were performed on samples of the mortar. The procedure was performed as indicated by the National Agency for Standardization and Certification of Building and Construction (ONNCCE) and Complementary Technical Norms for Design and Construction of Masonry Structures (2004).

**Key words:** Compression strength, mortar, clay brick.

#### INTRODUCCIÓN

Históricamente, Chiapas ha sido un área con alta incidencia de eventos sísmicos. Esto se debe a que la costa de esta región se encuentra en el Pacífico mexicano, la zona de mayor actividad sísmica de México. Específicamente en la costa de esta región se encuentra la Trinchera Mesoamericana (límite entre la placa Norteamericana y la placa de Cocos), en la cual, durante el siglo XX, se originaron más de 7 000 eventos sísmicos de los cuales 800 tuvieron su epicentro en Chiapas. En Tuxtla Gutiérrez, la capital de Chiapas, un porcentaje muy alto del total de

las edificaciones se han hecho, total o parcialmente, de mampostería en gran parte a base de piezas de ladrillo de barro unidas con mortero. Durante el sismo de Villaflores del 20 de octubre de 1995, algunas de las edificaciones de Tuxtla Gutiérrez presentaron daños originados por el desarrollo de grietas diagonales en los muros de mampostería. Esto se debió a una deficiente práctica constructiva por falta de elementos de refuerzo en el perímetro de los muros, lo cual provocó concentraciones de esfuerzos. En Villaflores, población vecina a Tuxtla Gutiérrez, las estructuras de mampostería reforzada presentaron también daños

1 Profesor de tiempo completo, Facultad de Ingeniería, Campus I, Universidad Autónoma de Chiapas, Boulevard Belisario Domínguez Km 1081, Del. Terán, 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Tel. (+52) 961.61.503.22, ext. 206, asibaja@unach.mx, moisesnazar@hotmail.com

2 Constructor independiente, Tel. (+52) 1961.13.708.96, silva130@hotmail.com

3 Investigador, Instituto Andaluz de Geofísica, C/Profesor Clavera Nº 12, Campus Universitario de Cartuja, C.P. 18071, Granada, España, Tel. (+34)958.240.900; fax: 958.160.907; fvidal@iag.ugr.es

estructurales y en algunos casos la construcción debió ser demolida.

Estos antecedentes han mostrado una práctica deficiente del diseño de estructuras de mampostería. Esta deficiencia se manifiesta en daños que en su mayoría son a causa de configuraciones estructurales inadecuadas y a la falta de asesoría técnica en el proyecto, diseño y construcción de estas estructuras. Se ha observado que las consecuencias de los sismos han impactado principalmente al sector más desprotegido de la población chiapaneca, que por ignorancia y falta de recursos económicos recurre a la autoconstrucción y a materiales de baja calidad para edificar sus viviendas.

Un primer paso hacia una medida preventiva ante este tipo de eventos lo constituye la caracterización en laboratorio de los materiales con que se construyen los muros de mampostería de la región de Tuxtla Gutiérrez. Es así que en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chiapas, se ha iniciado un proyecto de largo alcance en el cual se pretende caracterizar a la mampostería comúnmente utilizada en la construcción de edificaciones de Tuxtla Gutiérrez. A la fecha ya se tienen algunos resultados sobre esta caracterización, los cuales se presentan en este trabajo. Es así que los objetivos específicos de esta investigación son los siguientes: valorar la resistencia a compresión de piezas individuales de ladrillo de barro, obtener el peso volumétrico de cada una de las piezas ensayadas, determinar la capacidad de absorción de estos ladrillos, estimar la resistencia a compresión de pilas de ladrillos y caracterizar la resistencia a compresión de probetas del mortero utilizado para unir las piezas individuales.

## **METODOLOGÍA**

### **Ensayos realizados**

Se realizaron ensayos en piezas de ladrillo de barro de fabricación tradicional (Figura 1), de acuerdo con las pruebas que recomienda la normativa vigente (NMX-C-021-ONNCCE, NMX-C-036-ONNCCE, NMX-C-037-ONNCCE-2005, NMX-C-061-ONNCCE, NMX-C-404-ONNCCE y Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería 2004). Para cada ensayo se utilizaron tres muestras, cada una de diez piezas,

de lotes obtenidos de fabricantes distintos de Tuxtla Gutiérrez. La caracterización de cada una de las piezas de ladrillo consideró los siguientes aspectos:

1. Medición de las dimensiones (ancho, largo y espesor)
2. Obtención del peso volumétrico
3. Determinación de la absorción máxima de agua
4. Ensayo de resistencia a compresión

Además de caracterizar las piezas en forma individual se realizaron ensayos de pilas construidas con ladrillos de los lotes mencionados previamente. Los ladrillos se unieron con un mortero fabricado según las proporciones acostumbradas en la práctica local. Estas pilas se ensayaron para fuerza de compresión. También se determinó la resistencia a compresión del mortero con que se unen los ladrillos. Se construyeron cubos de este material con dimensiones de 5 x 5 x 5 cm utilizando una proporción de 1:4:12 (cemento-cal-arena), común en la práctica local. El ensayo se realizó a la edad de 7 días del mortero.

### **Material ensayado**

Se realizaron ensayos en 2008 y 2009 (Silva Acevedo y Deleón Argüello, 2009). En la primera campaña de pruebas se consiguieron ladrillos de barro de cuatro fabricantes distintos. Del material reunido se probaron un total de 120 piezas individuales, además se ensayaron 27 pilas, cada una de ellas se construyó con tres piezas de ladrillo unidas con mortero, finalmente se obtuvo la resistencia a compresión de 18 cubos de mortero. En la segunda campaña de ensayos se utilizaron ladrillos de barro de tres fabricantes distintos. Se probaron 90 piezas individuales de ladrillos, se ensayaron 27 pilas y se obtuvo la resistencia a compresión de 18 cubos de mortero.

## **RESULTADOS**

### **Obtención del peso volumétrico**

Para obtener el peso volumétrico de cada pieza fue necesario previamente caracterizar la geometría de cada una de ellas. Se utilizó una muestra de 30 piezas de ladrillo por cada uno

de los siete lotes en estudio. Se midieron las dimensiones geométricas de cada pieza con ayuda de un vernier. Estos datos se procesaron estadísticamente para obtener el largo, ancho y espesor promedios. A continuación las piezas se pesaron en una balanza para obtener el peso de cada ladrillo y a partir de este dato se calculó el peso volumétrico en estado seco de cada pieza. Cabe mencionar que estos ladrillos son de fabricación artesanal, sin ningún control de calidad en su proceso de fabricación (Figura 1).

La dimensión de cada pieza se obtuvo midiendo la longitud de las líneas centrales de cada una de las caras de los ladrillos. Esto se hizo así debido a que el proceso artesanal de fabricación origina cierta irregularidad en la geometría de la pieza. Por esta razón se adoptó el criterio de tomar como longitud representativa a la longitud medida a lo largo de las líneas centrales de cada una de las caras de los ladrillos. En la Tabla 1 aparecen los valores de la media, la desviación estándar y la varianza

del peso volumétrico para cada lote estudiado. Se promediaron los resultados que se muestran en esta tabla y se obtuvo un peso volumétrico promedio de  $1\ 506.37\text{ kg/m}^3$ , que es mayor al valor mínimo de  $1\ 300\text{ kg/m}^3$  para tabique de barro recocido, que se menciona en las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004).

### Ensayo de resistencia a compresión en las piezas individuales

Esta prueba se realizó para determinar la resistencia a compresión de acuerdo con el método de prueba establecido en la NMX-C-036-ONNCC-CE. Se ensayaron a compresión las 210 piezas de los siete lotes en estudio. En la Figura 2 aparece un detalle del proceso de ensayo a compresión.

Se registró la cantidad de carga que soporta cada pieza en el momento de la aparición de la primera grieta. Una vez que ocurrió la

**Figura 1.** Ejemplo de algunos de los ladrillos utilizados en las pruebas



**Tabla 1.** Medidas de tendencia central del peso volumétrico de los siete lotes estudiados

	Peso volumétrico ( $\text{kg/m}^3$ )						
	2008				2009		
	Primer Lote	Segundo Lote	Tercer Lote	Cuarto Lote	Quinto Lote	Sexto Lote	Séptimo Lote
Media	1456.00	1635.00	1539.15	1531.00	1466.19	1440.59	1476.63
Desviación estándar	86.93	155.10	119.86	86.04	102.49	80.93	88.94
Varianza	7556.82	24056.01	14366.42	7402.88	10153.50	6330.90	7645.9

fisuración se continuó con la aplicación de la carga hasta su fractura total. En ambos casos (aparición de la primera grieta y ruptura total) se calculó la resistencia a compresión referida al área bruta. Se obtuvo así una base de datos de cada lote que se procesó estadísticamente y cuyos resultados se resumen en la Tabla 2. En esta tabla  $f_p$  es el valor promedio (en kg/cm<sup>2</sup>) de la resistencia a compresión hasta la aparición de la primera grieta,  $\sigma$  es el valor promedio de la resistencia de diseño a compresión (en kg/cm<sup>2</sup>),  $C_p$  es la desviación estándar y  $f_p^*$  es el coeficiente de variación.

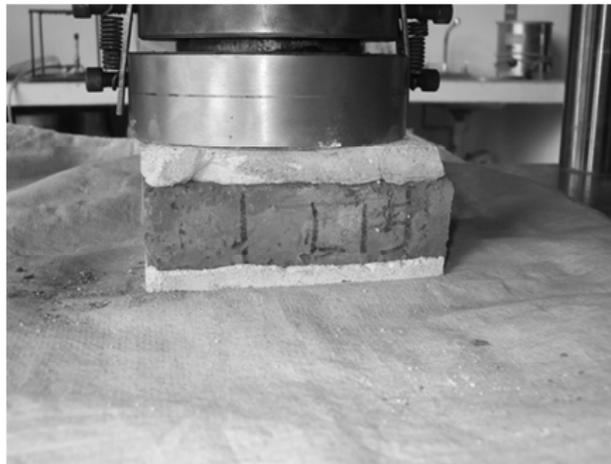
La resistencia de diseño a compresión que se muestra en la Tabla 2 se obtuvo con la siguiente expresión que aparece en la NMX-C-

404-ONNCCE y en la sección 2.1.2 de las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004):

$$f_p^* = \frac{f_p}{1+2.5 C_p}$$

Donde  $f_p$  es la media de la resistencia a compresión de las piezas referida al área bruta y  $\sigma$  es el coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las piezas. Para el cálculo de la resistencia de diseño a compresión se optó usar los coeficientes de variación obtenidos para cada lote en lugar del que recomiendan las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004).

**Figura 2.** Proceso de ensayo a compresión



**Tabla 2.** Resistencia a compresión de las piezas individuales de ladrillos

Lote	Resistencia a compresión primera grieta				Resistencia a compresión ruptura total			
	$f_p$	$\sigma$	$C_p$	$f_p^*$	$f_p$	$\sigma$	$C_p$	$f_p^*$
1	22.68	13.09	0.577	9.282	66.58	27.04	0.406	33.037
2	7.50	4.23	0.564	3.112	34.74	13.48	0.388	17.631
3	33.85	11.08	0.327	18.615	64.86	21.00	0.324	35.850
4	13.32	5.76	0.564	6.398	50.30	14.96	0.388	28.849
5	29.30	4.00	0.100	21.800	40.50	2.70	0.100	34.700
6	21.90	6.90	0.300	12.300	34.30	4.00	0.100	26.500
7	31.00	6.60	0.200	20.300	36.70	6.30	0.200	25.700
Promedio								28.900

Esto se decidió debido a que el coeficiente que sugieren las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004) para piezas de producción artesanal es de 0.35, un valor que difiere del que se muestra en la Tabla 2 y que no reproduce la realidad física de los lotes ensayados.

Se promediaron los resultados de para la resistencia a compresión a la ruptura total, de los siete lotes, que aparece en la columna 9 de la Tabla 2. Se obtuvo así una resistencia promedio de diseño de  $28.90 \text{ kg/cm}^2$  que es menor que la resistencia mínima de  $60 \text{ kg/cm}^2$  para tabique de barro, que se menciona en la NMX-C-044-ONNCE (2005).

### Determinación de la absorción máxima del agua

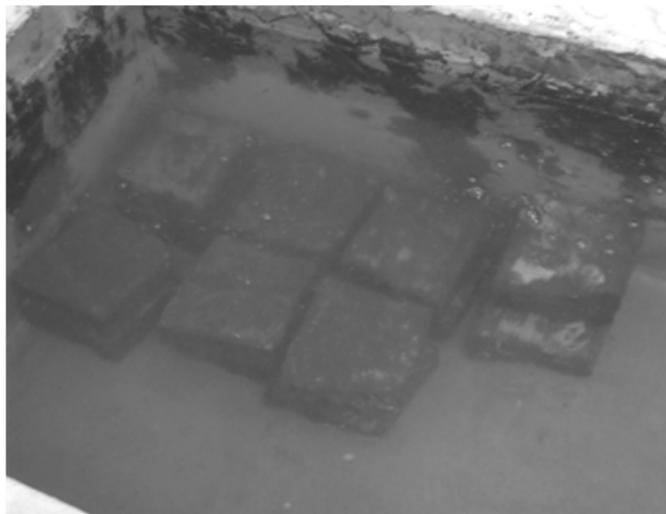
Esta prueba se realizó para determinar la porosidad de las piezas de acuerdo con el método de prueba establecido en la NMX-C-037-ONNCE. En general, el ensaye consistió en colocar los ladrillos en un horno a una temperatura entre  $100$  y  $110^\circ\text{C}$  durante 24 horas para eliminar la humedad de las piezas (Figura 3). Al término de este tiempo se extrajeron los ladrillos y se obtuvo el peso seco para cada pieza.

Hecho lo anterior se colocaron las piezas secas dentro de un depósito con agua a temperatura ambiente donde permanecieron durante

**Figura 3.** Proceso de secado en horno



**Figura 4.** Prueba de absorción en agua



**Tabla 3.** Absorción máxima de agua en % durante 24 h

	Peso seco (gr)	Peso húmedo (gr)	Absorción máxima de agua en %
Primer lote	1004.46	1205.36	20.11
Segundo lote	1054.00	1373.92	30.57
Tercer lote	1189.40	1442.85	21.33
Cuarto lote	1256.92	1518.75	20.85
Quinto lote	1186.00	1516.00	27.82
Sexto lote	1139.00	1468.00	28.90
Séptimo lote	1194.00	1535.00	28.56
Promedio	1146.25	1437.13	25.45

24 horas (Figura 4). Al cabo de este tiempo se retiraron los ladrillos, se les quitó el exceso de agua superficial con una franela semi húmeda y se pesaron nuevamente para obtener el peso húmedo de cada uno de ellos. En la Tabla 3 se resume el resultado de esta prueba.

Los pesos seco y húmedo que aparecen en las columnas 2 y 3 de la Tabla 3 son el promedio de los pesos registrados para cada lote durante la realización de esta prueba. De igual manera, la absorción máxima que se muestra en la columna 4 es el promedio de los porcentajes obtenidos para cada pieza ensayada de los cuatro lotes estudiados. En la parte final de la Tabla 3 se presentan los promedios de los siete lotes estudiados. A partir de estos resultados se concluye que, en promedio, la absorción máxima de agua (25.45%) de estos ladrillos es mayor a la mínima recomendada (21%) por la NMX-C-404-ONNCCE (2005).

### Ensayo de resistencia a compresión en pilas de ladrillos

A partir de seis de los lotes utilizados en estas pruebas se fabricaron pilas con tres piezas de ladrillos a las cuales se les realizaron pruebas a compresión. No se fabricaron pilas de los siete lotes porque no se disponía del número suficiente de piezas en uno de ellos. Las piezas de ladrillo se unieron con una capa de mortero de espesor aproximado de 1 cm. La proporción del mortero utilizado para unir las piezas fue de 1:4:12 (cemento-cal-arena). Por cada lote se construyeron nueve pilas y en total se ensayaron 54 pilas. En la Figura 5 se muestra la forma de ejercer la carga sobre la probeta y en la Figura 6 aparece el momento de la fractura de una de las pilas ensayadas.

En esta tabla anterior  $f_m$  es el valor promedio (en kg/cm<sup>2</sup>) de la resistencia a compresión

**Tabla 4** Resistencias a compresión representativas de las pilas ensayadas para cada lote

Lote	Resistencia a compresión			
	$f_m$	$\sigma$	$C_m$	$f_m^*$
1	28.52	3.80	0.10	22.82
2	19.25	4.02	0.16	13.75
3	22.94	5.32	0.17	16.10
4	31.47	10.37	0.33	17.26
5	33.96	4.30	0.13	25.79
6	33.41	7.78	0.23	21.12
Promedio				19.47

hasta la ruptura de la pila, es el valor promedio de la resistencia de diseño a compresión (en kg/cm<sup>2</sup>),  $f_m^*$  es la desviación estándar y  $C_m$  es el coeficiente de variación.

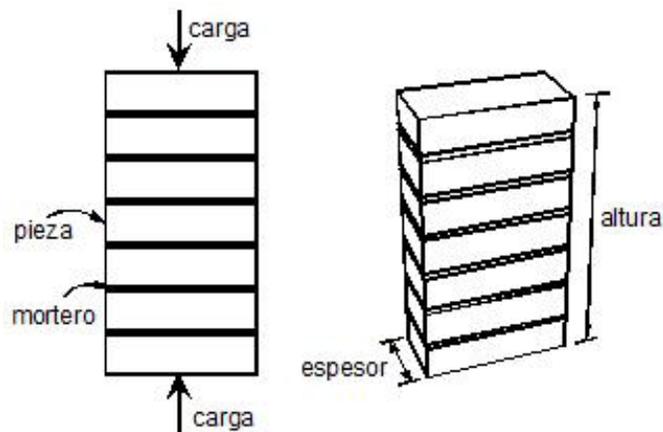
La resistencia de diseño a compresión de las pilas de cada lote se obtuvo con la siguiente expresión que se indica en la sección 2.8.1.1 de las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004):

$$f_p^* = \frac{f_p}{1+2.5 C_p}$$

Donde  $f_m$  es la media de la resistencia a compresión de las piezas referida al área bruta y  $v$  es el coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las piezas. Para el cálculo de la resistencia de diseño a compresión  $f_m^*$  se optó usar los coeficientes de variación obtenidos para cada lote en lugar del que recomiendan las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004).

Cabe hacer notar que sólo para el primer lote se obtiene un coeficiente  $C_m$  menor que el valor mínimo de 0.15 que sugieren las NTC

**Figura 5.** Forma en que se ejerce la carga sobre las pilas.



**Figura 6** Ensayo a compresión de una pila de ladrillos. Se obtuvo el área de la sección transversal de la cara superior de cada pila y se procedió al ensayo de resistencia a compresión. En la Tabla 4 se presentan las resistencias a compresión representativas de cada lote ensayado.



para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004). En los otros dos lotes el coeficiente  $C_m$  resultó mayor que el mínimo recomendado.

Se promediaron los resultados de  $f_m^*$  que aparecen en la quinta columna de la Tabla 4. Se obtuvo una resistencia promedio de diseño a compresión de 19.47 kg/cm<sup>2</sup> que es menor que la resistencia mínima de 20 kg/cm<sup>2</sup> para mampostería de piezas de barro, que se menciona en las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004).

$$f_m^* = \frac{f_m}{1+2.5 C_m}$$

Con esta resistencia promedio se calculó el módulo de elasticidad utilizando la expresión sugerida en la sección 2.8.5.2 de las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004) para cargas de corta duración:

$$E_m = 600 f_m^*$$

Se obtuvo así un valor de 11 682 kg/cm<sup>2</sup> para  $E_m$ . En forma optativa este resultado se puede dividir entre 1.7 para piezas de barro, de lo cual resulta un valor de  $E_m$  igual a 6 871.76 kg/cm<sup>2</sup>. Al usar este último valor se puede encontrar el módulo de cortante de la mampostería ensayada, mediante la expresión que se recomienda en la sección 2.8.6.2 de las NTC para Diseño

y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004) para cargas de corta duración:

$$G_m = 0.4 E_m$$

Utilizando esta expresión se obtiene un valor de  $G_m$  igual a 2 478.71 kg/cm<sup>2</sup>. Estos resultados, sin ser definitivos, dan una idea acerca del comportamiento elástico del material ensayado. Es necesario realizar más ensayos de esta naturaleza para determinar valores representativos de  $G_m$  de la mampostería utilizada en la edificación de vivienda en Tuxtla Gutiérrez.

### Ensayo de resistencia a compresión en el mortero

El mortero se hizo con la proporción 1:4:10 (cemento-cal-arena) comúnmente utilizada en la práctica local de edificación. La mezcla se colocó en moldes metálicos de 5×5×5 cm. Se fabricaron cinco lotes de seis cubos cada uno, para un total de 30 probetas de mortero que se ensayaron según las indicaciones de la normativa vigente. En la Figura 7 se muestra una de las probetas utilizadas.

Se midieron las dimensiones de la superficie de aplicación de la carga, para obtener el área de esta superficie. Posteriormente, con el dato de la carga ejercida por la máquina universal de ensaye, se determinó la resistencia a compresión del mortero.

Figura 7. Probeta tipo de mortero.



Se colocaron cada una de las probetas en la máquina universal y se les aplicó carga de compresión hasta alcanzar la fractura total del cubo de mortero. La carga correspondiente a la carga última obtenida se utilizó para calcular la resistencia a compresión del mortero.

En la Figura 8 se muestra la prueba de compresión en el mortero y en la Tabla 5 se concentran los resultados de las pruebas de resistencia a compresión en el mortero, así como los parámetros estadísticos asociados a esta base de datos. En particular se determinaron la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

En la Tabla 5  $f_j$  es el valor promedio (en kg/cm<sup>2</sup>) de la resistencia a compresión hasta la ruptura de la probeta de mortero,  $f_j^*$  es el valor promedio de la resistencia de diseño a compresión (en kg/cm<sup>2</sup>),  $s_j$  es la desviación estándar y  $C_j$  es el coeficiente de variación.

La resistencia de diseño a compresión del mortero se obtuvo con la siguiente expresión que aparece en la NMX-C-061-ONNCCE y en las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004):

$$G_m = 0.4 E_m$$

Donde  $f_j$  es la media de la resistencia a compresión de las piezas referida al área bruta y  $C_j$  es el coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las piezas. Para el cálculo de la resistencia de diseño a compresión  $f_j^*$  se optó usar los coeficientes de variación obtenidos para cada lote en lugar del que recomiendan las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004).

Al igual que en las pruebas de resistencia a compresión en los ladrillos, se tomó esta decisión debido a que el coeficiente  $C_j$  que sugieren las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004) es de 0.20, un valor mayor del que se muestra en la Tabla 5 y que no reproduce la realidad física de las probetas ensayadas.

Se promediaron los resultados de  $f_j^*$  que aparecen en la quinta columna de la Tabla 5. Se obtuvo una resistencia promedio de diseño de 9.71 kg/cm<sup>2</sup> que es menor que la resistencia mínima de 40 kg/cm<sup>2</sup> para mortero para pegar

**Figura 8.** Ensayo a compresión de una probeta de mortero



**Tabla 5.** Resistencia a compresión de las probetas de mortero

Lote	Resistencia a compresión			
	$f_m$	$\sigma$	$C_m$	$f_m^*$
1	13.01	2.21	0.17	9.13
2	9.02	1.48	0.16	6.44
3	16.50	2.06	0.12	12.58
4	9.76	1.62	0.17	6.90
5	16.03	1.20	0.07	13.51
Promedio				9.71

piezas, que se menciona en las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004).

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### Peso volumétrico de las piezas de ladrillo

Las piezas ensayadas mostraron en promedio un peso volumétrico de 1 506.37 kg/m<sup>3</sup> que es mayor al valor mínimo de 1 300 kg/m<sup>3</sup> para tabique de barro recocido, que se menciona en las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004). Se deduce que el ladrillo fabricado en la región tiene un peso volumétrico bastante razonable para el medio mexicano y que cumple los requisitos mínimos de las normas mexicanas correspondientes.

### Resistencia a compresión de piezas de ladrillos

Esta es una de las pruebas más importantes ya que la función del ladrillo es básicamente soportar esfuerzos de compresión en edificaciones de mampostería. Se encontró una resistencia promedio de 28.90 kg/cm<sup>2</sup> que es mucho menor que la resistencia mínima de 60 kg/cm<sup>2</sup> para tabique de barro, que se menciona en la NMX-C-044-ONNCCE (2005). Se observó que los ladrillos que se ensayaron a compresión, en general se rompieron al desarrollarse grietas con un ángulo aproximado de 45°, lo cual, como es de esperar, indica que la arcilla tiene muy poca resistencia a cortante.

La baja resistencia en compresión de los ladrillos ensayados indica un bajo contenido de arena en la arcilla utilizada para la fabricación de las piezas. Esto se puede explicar con

el tamaño de la partícula y la proporción de bentonita presente en la arena sílica. La bentonita es una arcilla pura formada por silicatos hidratados de sodio, calcio o magnesio y posee adecuadas propiedades plásticas y de resistencia. Por esta razón la proporción de bentonita juega un papel importante en la resistencia a compresión del ladrillo.

De igual trascendencia es el tamaño de la partícula, ya que además de estar relacionada directamente con la resistencia, las partículas finas pueden resistir más la compresión ya que pueden tener una mejor compactación y una mejor distribución de la carga. A juzgar por los resultados obtenidos se infiere que la mezcla utilizada para fabricar los ladrillos ensayados no tiene ninguna de las cualidades anteriores y por lo tanto éstos presentaron una baja resistencia en compresión.

### Absorción de agua de los ladrillos ensayados

Los resultados indican que los ladrillos ensayados, en promedio, tienen una absorción máxima de agua (25.45%) mayor que la mínima recomendada (21%) por la NMX-C-404-ONNCCE (2005). Esto indica la necesidad de humedecer las piezas antes de su colocación, seguramente porque los ladrillos tienen una cantidad insuficiente de arena, dando lugar a una arcilla plástica con un grado de porosidad alto. El hecho de tener un bajo contenido de arena hace que el ladrillo cocido tenga un alto grado de porosidad, lo cual provoca altas absorciones al saturarse con agua, tal como se obtuvo.

Esta falta de arena genera una sinterización baja, debido al bajo contenido de sílice, que es el fundente de las partículas en la cocción. Por

lo general esta situación genera bajas resistencias a compresión en los ladrillos. Podría obtenerse una arcilla más favorable si se hiciese, durante el proceso de amasado de la misma, el ensayo de Casablanca, para hallar los límites de Atterberg y disminuir su grado de plasticidad. De esta manera aumentaría el contenido de arena, lo cual da mejor manejabilidad a la arcilla sin adicionarle agua en exceso.

### **Resistencia a compresión de pilas de ladrillos**

A partir de los ensayos realizados en pilas de ladrillos se obtuvo una resistencia promedio de diseño a compresión de  $19.47 \text{ kg/cm}^2$ , la cual resulta ligeramente menor que la resistencia mínima de  $20 \text{ kg/cm}^2$  para mampostería de piezas de barro, que se menciona en las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004). A todo efecto práctico esta diferencia es poco significativa y se puede aceptar que las pilas ensayadas satisfacen los requisitos de la normativa vigente.

Las probetas presentaron la falla clásica de pilas de mampostería a compresión (Tena Colunga *et al.*, 2007). Este modo de ruptura también se conoce como falla por tracción lateral y se caracteriza por la aparición de grietas verticales en las piezas producidas por las deformaciones transversales incrementadas por el efecto de las deformaciones del mortero en las juntas. Cuando este agrietamiento vertical se vuelve excesivo, se producen la inestabilidad del elemento y su falla. Para piezas de baja resistencia, la falla se presenta por aplastamiento en compresión de las piezas mismas.

Por lo general la ruptura de las pilas comenzó en el material más resistente, que en este caso era el ladrillo, extendiéndose al mortero. Cabe señalar que también se presentaron fallas por aplastamiento en las que había concentración de esfuerzos en los extremos debido a un mal acomodo de las pilas a la hora del ensaye.

El aplastamiento del mortero generalmente no ocasiona la falla cuando los esfuerzos son puramente axiales, ya que éste, cuando se aplasta, es retenido por fricción por las piezas, y el conjunto puede soportar cargas mayores, salvo que el mortero sea muy pobre en comparación con las piezas. Sin embargo, en elementos esbeltos, el aplastamiento del mortero puede provocar problemas de inestabilidad.

### **Resistencia a compresión de las probetas de mortero**

Con base en las pruebas realizadas se encontró una resistencia promedio de diseño de  $9.71 \text{ kg/cm}^2$ , que es mucho menor que la resistencia mínima de  $40 \text{ kg/cm}^2$  para mortero para pegar piezas, que se menciona en las NTCM-2004.

Estos resultados hablan de un mortero extremadamente débil a compresión. Conviene recordar que la resistencia a este elemento mecánico depende de la relación agua-cemento y muy especialmente de la granulometría de la arena, la cual se establece mediante el módulo de finura. La arcilla disminuye esta resistencia, por lo cual es indispensable controlar su inclusión en la mezcla evitando el uso de arenas sucias.

En condiciones de obra, es de esperarse mayor dispersión en los resultados que los obtenidos en laboratorio, debido a la intervención de diferentes operaciones y a la posible variación de los proporcionamientos cemento-cal-arena realmente empleados. Desgraciadamente, es muy común que en nuestro país no se ponga la suficiente atención al proporcionamiento de materiales en la elaboración del mortero en la obra.

### **CONCLUSIONES**

Se han mostrado los resultados más relevantes de una campaña de pruebas experimentales, realizada en dos etapas (2008 y 2009), del ladrillo de barro de fabricación tradicional que se usa en Tuxtla Gutiérrez. Los ensayos se realizaron conforme al protocolo para ensayos a compresión establecido por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE) y por las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM-2004).

Como una primera aproximación al estudio de este material se valoró únicamente su resistencia a compresión, puesto que desde el punto de vista estructural, este es uno de los parámetros más importantes del ladrillo de barro.

A partir de las pruebas realizadas se encontró un peso volumétrico de la pieza con un valor promedio de  $1506.37 \text{ kg/m}^3$ , el cual es

mayor al valor mínimo de  $1\ 300\ \text{kg/m}^3$  para tabique de barro recocido, que se menciona en las NTCM-2004. Esto indica que el ladrillo de barro ensayado tiene un peso volumétrico adecuado de acuerdo con las normas mexicanas correspondientes.

Por lo que se refiere a la resistencia de diseño a compresión se obtuvo un promedio de  $28.90\ \text{kg/cm}^2$  que está por debajo de la resistencia mínima de  $60\ \text{kg/cm}^2$  para tabique de barro recocido, que se recomienda en la NMX-C-044-ONNCCE (2005).

Asimismo, con base en los resultados de las pruebas realizadas se observa que los ladrillos ensayados presentan características aceptables en cuanto a su capacidad de absorción, pues se obtuvo una absorción máxima promedio de 25.45% que es mayor a la mínima recomendada (21%) por la NMX-C-404-ONNCCE (2005).

También se realizaron ensayos de resistencia a compresión en pilas de ladrillos. A partir de estas pruebas se obtuvo una resistencia promedio de diseño a compresión de  $19.47\ \text{kg/cm}^2$  que es ligeramente menor que la resistencia mínima de  $20\ \text{kg/cm}^2$  para mampostería de piezas de barro, que se menciona en las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004). Se puede aceptar que esta diferencia es poco significativa y que las probetas ensayadas cumplen con lo que se indica en la normativa vigente.

Con esta resistencia promedio se calcularon valores de los módulos de elasticidad y de cortante a partir de ensayos de compresión en pilas de ladrillos. Así, el módulo de elasticidad calculado es  $6\ 871.76\ \text{kg/cm}^2$  y el módulo de cortante es  $2\ 478.71\ \text{kg/cm}^2$ . Estos resultados constituyen una primera aproximación a los módulos de elasticidad y de cortante de la mampostería utilizada en edificación de vivienda en Tuxtla Gutiérrez. Aunque estos valores pueden usarse como una referencia en el cálculo de estructuras de mampostería a base de ladrillos de barro, es preferible realizar una mayor cantidad de ensayos de manera tal que se consiga una base de datos que permita definir módulos y representativos de la región de Tuxtla Gutiérrez.

El estudio del mortero, fabricado según la práctica local, mostró que éste tiene en promedio una resistencia de diseño a compresión de  $9.71\ \text{kg/cm}^2$ , la cual es mucho menor que la resistencia mínima de  $40\ \text{kg/cm}^2$  para mortero

para pegar piezas, que se menciona en las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2004). Sería conveniente adoptar en la localidad la proporción que recomiendan las NTCM-2004 para alcanzar el mínimo de resistencia requerido por compresión.

Conviene mencionar que la mayoría de los proyectos de estructuras de mampostería que se realizan en Tuxtla Gutiérrez hacen referencia a normativas que no necesariamente tienen aplicación en esta localidad. Los resultados que se describen en este trabajo parecen confirmarlo. De lo anterior se desprende la necesidad de disponer de una norma de aplicación local relativa al diseño y construcción de estructuras de mampostería tal como la que se usa actualmente en el Distrito Federal. Al mismo tiempo se concluye que es preciso establecer un control de calidad mínimo de obligado cumplimiento para los fabricantes de ladrillo de barro de esta ciudad.

Hasta donde se sabe, con base en la revisión del estado del arte, esta es la primera vez que se intenta caracterizar el ladrillo que se utiliza en la construcción de muros de mampostería en Tuxtla Gutiérrez. La investigación, cuyos resultados aquí se presentan, está lejos de concluir y es necesario realizar más campañas de caracterización utilizando ladrillos de otros fabricantes locales a fin de conseguir una base de datos que incluya la mayoría del material utilizado en esta ciudad. Estudios adicionales deberán considerar la valoración de otros mecanismos resistentes, tal como la resistencia a cargas laterales, y el ensayo a la ruptura de muros de mampostería de ladrillo de barro y de bloque hueco de concreto construidos a escala real. Estudios semejantes, encaminados al ensayo en muros de ladrillo de bloque hueco de concreto y de ladrillo de barro, se han realizado en la Universidad Autónoma de Yucatán (Tena Colunga *et al.*, 2007; Varela Rivera *et al.*, 2009; Fernández Baqueiro, L., 2009; Varela Rivera *et al.*, 2010). Los resultados conseguidos en estas investigaciones muestran que los muros construidos con este material, en la zona de Mérida (Yucatán), son aptos para resistir cargas laterales por sismo y que la resistencia a compresión diagonal y a tensión por flexión, de la mampostería, es función de la adherencia bloque-mortero.

## AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen la disposición y el apoyo del Sr. Jorge Vila Gallegos para llevar a cabo las pruebas descritas en este trabajo

## REFERENCIAS

- NMX-C-021-ONNCCE (2004), "Industria de la construcción-Cemento para albañilería (mortero)-Especificaciones y métodos de prueba", Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-036-ONNCCE (2004), "Industria de la construcción-Bloques, tabiques o ladrillos, tabicones y adoquines-Resistencia a la compresión- Método de prueba", Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-037-ONNCCE (2005), "Industria de la construcción-Bloques, ladrillos o tabiques y tabicones-Determinación de la absorción de agua y absorción inicial de agua", Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-061-ONNCCE (2001), "Industria de la construcción-Cemento-Determinación de la resistencia a compresión de cementantes hidráulicos", Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-404-ONNCCE (2005), "Industria de la construcción-Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural-Especificaciones y métodos de prueba", Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- Gaceta oficial del Distrito Federal (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería", Gobierno del Distrito Federal.
- Silva Acevedo, G.; Deleón Argüello, J.A. (2009), "Determinación de los parámetros de diseño a compresión de mampostería de tabique de barro rojo recocido asentados con mortero cemento-calhidra-arena 1:2:10", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas.
- Tena Colunga, A.; Juárez Ángeles, A.; Salinas Vallejo, V.H. (2007), "Resistencia y deformación de muros de mampostería combinada y confinada sujetos a cargas laterales", Revista de Ingeniería Sísmica N° 76, 29-60, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.
- Varela Rivera, J.L.; Flores Chan, R.A.; Fernández Baqueiro, L.E. y Vargas Marín, G. (2009), "Determinación de la resistencia a tensión fuera del plano de la mampostería de bloques huecos de concreto", Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 13-1, pp. 13-23, ISSN: 1665-529X.
- Fernández Baqueiro, L.; Marín Gómez, F.; Varela Rivera, J. y Vargas Marín, G. (2009), "Determinación de la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de la mampostería de bloques huecos de concreto", Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 13-2, pp. 41-50, ISSN: 1665-529X.
- Varela Rivera, J.L.; Navarrete Macías, D.; Fernández Baqueiro, L.E. y Moreno, E.I. (2010), "Estudio experimental de muros de mampostería confinada de bloques huecos de concreto sujetos a presiones perpendiculares a su plano", Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 14-3, pp. 149-160, ISSN: 1665-529-X.