

# Determinación de la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de la mampostería de bloques huecos de concreto

Fernández Baqueiro, L.<sup>1</sup>, Marín Gómez, F.<sup>2</sup>, Varela Rivera, J.<sup>1</sup> y Vargas Marín, G.<sup>1</sup>

*Fecha de recepción: septiembre de 2008 – Fecha de aceptación: julio de 2009*

## RESUMEN

La Ciudad de Mérida no cuenta con normas técnicas para el diseño y construcción de estructuras de mampostería, que estén basadas en las características y propiedades de los materiales y en los procedimientos constructivos de la región. Esto ha motivado el desarrollo de un proyecto de investigación, cuyo objetivo es proponer dichas normas técnicas. Este artículo presenta los resultados de 18 muretes de mampostería sujetos a una carga de compresión diagonal en su plano. Los muretes de mampostería fueron contruidos con bloques huecos de concreto y mortero representativo de la práctica constructiva de la ciudad de Mérida. Con base en los resultados de dichos muretes se determina que la resistencia a compresión diagonal de la mampostería depende de la adherencia bloque-mortero. La falla típica de los muretes fue en la junta bloque-mortero, en ocasiones la falla fue sobre la diagonal y en otras por deslizamiento sobre las juntas horizontales. Para explicar los diferentes tipos de falla observados se desarrolla un modelo numérico de un murete de mampostería utilizando el Método de los Elementos Finitos y se analiza la distribución de esfuerzos que se obtiene. Finalmente, se propone un valor de diseño para la resistencia a compresión diagonal de  $1.8 \text{ kg/cm}^2$  y se determina que la relación promedio entre los módulos de cortante y de elasticidad de la mampostería es igual a 0.42.

**Palabras clave:** resistencia a compresión diagonal, módulo de cortante, bloques huecos de concreto.

## Determination of the diagonal compressive strength and the shear modulus of masonry constructed with hollow concrete blocks

### ABSTRACT

The City of Merida do not have technical norms for the design and construction of masonry structures, that are based on the characteristics and properties of materials and construction procedures of the region. This has motivated the development of a research project, which objective is to propose those technical norms. In this paper, the results of 18 masonry wall specimens subjected to a diagonal compressive force are presented. The masonry specimens were constructed using hollow concrete blocks and mortars representative of the construction practice in the City of Merida. Based on the results of those specimens it is determined that the diagonal compressive strength of the masonry depends on the bond between blocks and mortar; the typical failure of the specimens was at the masonry joints, in some cases related to failure over the diagonal, and in other cases to sliding failure over the bed joints. To study those types of observed failures, a numerical model of a masonry wall is developed using the Finite Element Method, and the obtained stress distribution is analyzed. Finally, a design value for the diagonal compressive strength of  $1.8 \text{ kg/cm}^2$  is proposed and it is determined that relationship between the shear modulus and the modulus of elasticity of the masonry is equal to 0.42.

**Keywords:** diagonal compressive strength, shear modulus, hollow concrete block.

<sup>1</sup> Profesor Investigador del Cuerpo Académico de Estructuras y Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. E-mail: [luis.fernandez@uady.mx](mailto:luis.fernandez@uady.mx)

<sup>2</sup> Maestría en Ingeniería opción Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.

## INTRODUCCIÓN

La mampostería es un material de construcción ampliamente utilizado en México; este material se emplea con fines estructurales, especialmente en muros que deben soportar cargas verticales y horizontales. En la actualidad, la mayoría de las viviendas del municipio de Mérida están construidas con muros de mampostería de bloques huecos de concreto; sin embargo, el Reglamento de Construcciones de este municipio carece de normas técnicas (Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán, 2004), por lo que permite el empleo de otras de aplicación supletoria, tales como las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTCM) del Reglamento para Construcciones del Distrito Federal (Gaceta Oficial del D. F., 2004). Las NTCM no toman en cuenta las características y propiedades de los materiales empleados en el municipio de Mérida, por lo tanto, es necesario desarrollar normas técnicas propias de la región. Para este propósito se requiere conocer las propiedades de los materiales y de la mampostería, tales como la resistencia a compresión axial de bloques y morteros, la resistencia a compresión axial, la resistencia a compresión diagonal, el módulo de elasticidad, el módulo de cortante y la resistencia a tensión de la mampostería.

En este trabajo de investigación se estudia el comportamiento de la mampostería sujeta a compresión diagonal. Para este propósito se identifican los modos de falla y se determina la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante que se obtienen del ensaye de 18 muretes de mampostería de 1.20 m. x 1.20 m. de dimensión. Se determina la distribución de esfuerzos que experimentan los muretes por medio un análisis por el Método del Elemento Finito, el cual permite mejorar el entendimiento de los resultados obtenidos. Finalmente, se propone un valor de diseño para la resistencia a compresión diagonal.

Las fallas típicas de los muretes de mampostería sujetos a compresión diagonal pueden ser de tres tipos (Figura 1): (1) falla por tensión diagonal en bloques; se produce una grieta diagonal que atraviesa predominantemente las piezas, su trayectoria es aproximadamente recta; (2) falla por tensión diagonal en juntas; se produce por la falla por adherencia bloque-mortero, su trayectoria es en forma escalonada aproximadamente al centro del murete; (3) falla por deslizamiento; se produce la falla entre las piezas y el mortero, produciéndose el desprendimiento de una junta horizontal.

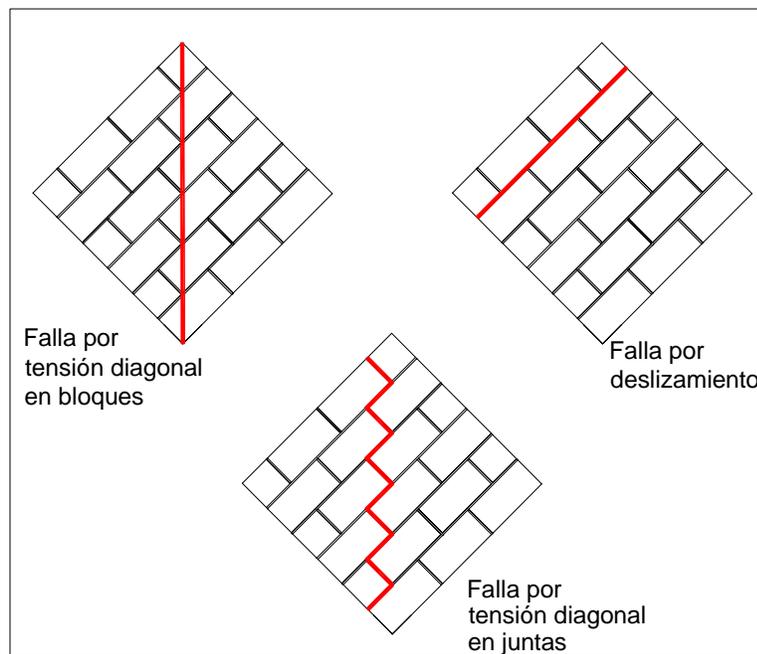


Figura 1 Tipos de fallas en muretes de mampostería sujetos a compresión diagonal

Las variables que afectan la resistencia a compresión diagonal y el correspondiente módulo de cortante de la mampostería son: el tipo de bloque, el tipo de

mortero y la adherencia bloque-mortero. Las variables que afectan la adherencia bloque-mortero son: la cantidad de cemento y agua del mortero, el

porcentaje de absorción de agua y la rugosidad de los bloques, así como la mano de obra, entre otros (Drysdale et al., 1999). La adherencia bloque-mortero incrementa con una mayor cantidad de cemento en el mortero. Asimismo, la adherencia incrementa también con una mayor cantidad de agua en el mortero, sin embargo, dicha cantidad debe ser la necesaria para obtener una buena trabajabilidad y garantizar la permanencia de agua en el mortero después del primer contacto con el bloque (ASTM-C270, 2002). Para obtener una buena adherencia bloque-mortero se recomienda usar bloques con un porcentaje de absorción de agua comprendido entre 10 y 20% (Gaceta Oficial del D.F., 2004) y un porcentaje inicial de absorción de agua (PIA) menor a 30 g/min/cm<sup>2</sup> (Drysdale et al., 1999). El valor anterior se refiere a la cantidad de agua absorbida en un minuto por una cara de un bloque con un área de 194 cm<sup>2</sup>. La adherencia bloque-mortero se reduce si se tienen bloques con superficies poco rugosas o con capas de polvo. Asimismo, la adherencia se reduce si se tiene una mano de obra deficiente caracterizada por periodos de tiempo prolongados entre la colocación del mortero y los bloques, juntas de mortero incompletas, movimientos para plomar y nivelar los bloques, y el uso de mortero endurecido.

**METODOLOGÍA**

La metodología utilizada en este trabajo para estudiar el comportamiento de la mampostería sujeta a compresión diagonal es la siguiente: (1) selección de las variables de estudio, (2) selección de los especímenes, (3) caracterización de materiales, (4) construcción de especímenes, (5) ensaye de especímenes y (6) análisis por el Método del Elemento Finito.

**Selección de variables de estudio.** La variable de estudio es la resistencia a compresión axial de los bloques, para lo cual se seleccionaron bloques de tres plantas de fabricación con resistencia a compresión axial promedio, reportadas por González (2006), de 50 kg/cm<sup>2</sup>, 60 kg/cm<sup>2</sup> y 102 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. Estos valores cubren en general la variación de la resistencia a compresión de los bloques de la región (González, 2006). Los bloques son típicamente fabricados con dimensiones 10x20x40 cm, 15x20x40 cm y 20x20x40 cm (ancho, altura, longitud); se seleccionó el de 15x20x40 cm ya que éste es comúnmente empleado en la construcción de muros estructurales en edificaciones. Los bloques estudiados tienen porcentajes de absorción de agua en 24 horas del orden del 10% (González, 2006).

En la región típicamente se emplean tres tipos de morteros en proporciones por volumen: 1:2:5, 1:2:6 y 1:2:7 (cemento Portland: cal: arena) para la construcción de muros de mampostería; se seleccionó emplear un mortero 1:2:7 debido a que las resistencias a compresión de los morteros de la región varían en un 10% y a que este tipo de mortero corresponde al de menor resistencia (González, 2006). La construcción de todos los especímenes se realizó con un sólo trabajador experimentado de la región.

**Selección de especímenes.** Con el propósito de identificar los tipos de falla y las variables que determinan la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de la mampostería se seleccionaron inicialmente especímenes preliminares con las características presentadas en la Tabla 1.

**Tabla 1** Características de los especímenes preliminares

PLANTA	f <sub>pt</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	MORTERO	f <sub>jt</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	Número de especímenes
4	102	1:2:7	35	3
11	50	1:2:7	35	3

Las variables f<sub>pt</sub> y f<sub>jt</sub> corresponden a la resistencia a compresión axial promedio de los bloques y morteros estudiados por González (2006). Las dimensiones de los especímenes ensayados es de 1.2 x 1.2 m, cumpliendo con lo establecido en el Anteproyecto de norma NMX-MURETES (2003) y la Norma ASTM E519 (2000). El primer grupo de especímenes se construyó con bloques de resistencia a compresión alta (más de 65 kg/cm<sup>2</sup>) y mortero de resistencia a compresión baja (mortero 1:2:7). El segundo grupo con bloques de resistencia a compresión baja (menos de 50 kg/cm<sup>2</sup>) y mortero de resistencia a compresión baja (mortero 1:2:7).

Con base en los resultados de los especímenes preliminares se seleccionaron especímenes finales con las características presentadas en la Tabla 2. El primer grupo de especímenes se construyó con bloques de resistencia a compresión alta (más de 65 kg/cm<sup>2</sup>), mientras que el segundo y tercer grupo con resistencia a compresión intermedia (entre 50 y 65 kg/cm<sup>2</sup>); en todos los casos se emplea mortero de resistencia a compresión baja (mortero 1:2:7). Los especímenes de la planta 5\_PD se construyeron con bloques con paredes de las celdas menores a las reportadas por González (2006) para la planta 5.

**Tabla 2** Características de los especímenes finales

PLANTA	$f_{pt}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	MORTERO	$f_x$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Número de especímenes
4	102	1:2:7	35	4
5	60	1:2:7	35	6
5 PD	60	1:2:7	35	2

**Caracterización de materiales.** Se determinaron las dimensiones (NMX-C-038-ONNCE, 2004) y la resistencia a compresión axial de los bloques (NMX-C-036-ONNCE, 2004) junto con la resistencia a compresión axial de los morteros (NMX-C-061-ONNCE, 2001). La resistencia a compresión axial de los bloques se determinó de 5 especímenes de cada planta. La resistencia a compresión axial del mortero se determinó de 12 cubos, seis con las fluideces recomendadas en la norma y seis con las fluideces obtenidas durante la construcción.

**Construcción de especímenes.** La construcción de los especímenes se realizó en el Laboratorio de Estructuras y Materiales (LEM) de la Facultad de

Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY). Los especímenes fueron construidos sobre bases de bloques previamente niveladas. Los bloques fueron cuatropuestos utilizando mortero únicamente en las paredes exteriores de los bloques de acuerdo con la práctica de la Ciudad de Mérida (Figura 2). Se realizaron pruebas de fluidez (NMX-C-085-ONNCE, 2002) para verificar que los morteros tengan porcentajes de fluidez entre 110% y 125%, que corresponde al intervalo de valores observado en campo para la construcción de muros de la región (González, 2006). Los especímenes se almacenaron en el laboratorio al menos durante 28 días antes de realizar las pruebas correspondientes.



**Figura 2.** Construcción de especímenes

**Ensayo de muretes.** Los especímenes fueron ensayados en el marco de carga del LEM de la FIUADY. El sistema de ensaye utilizado fue el recomendado en el Anteproyecto de norma NMX-MURETES (2003) y la norma ASTM E519 (2000). Las cargas se aplicaron utilizando un actuador hidráulico marca “Enerpac” con capacidad de 25 toneladas y se midieron con una celda de carga marca “Lebow”, con una capacidad de 22.7 toneladas. Los desplazamientos sobre las diagonales se midieron utilizando 4 sensores lineales, marca “ETI”, de 1.2 cm de longitud; dichos sensores se colocaron uno en cada cara y en cada diagonal de los especímenes. La adquisición de datos se realizó utilizando un equipo de marca “National Instruments”. La carga fue transmitida al espécimen por medio de cabezales de acero diseñados de acuerdo con la norma ASTM E519 (2000). En la Figura 3 se presenta una vista

general del ensayo de los muretes de mampostería (Marín, 2008).



**Figura 3.** Vista general del ensayo de muretes de mampostería

**Análisis por el Método del Elemento Finito.** Para estudiar los tipos de falla observados se realiza un análisis por el Método de Elemento Finito. Se utiliza el programa de cómputo DIANA versión 9.3 (TNO DIANA, 2008) y se emplea un modelo de esfuerzo plano con elementos isoparamétricos cuadriláteros de 4 nodos. Se utiliza una malla estructurada con elementos finitos de 5x5 cm de dimensión, un espesor de 15 cm, un comportamiento constitutivo elástico lineal con un módulo de elasticidad de 40,000 kg/cm<sup>2</sup> y una relación de poisson de 0.25, equivalente a considerar que el módulo de cortante es igual al 40% del módulo de elasticidad. Las condiciones de frontera son impuestas a través de los cabezales de acero los cuales se consideran infinitamente rígidos;

el cabezal en la parte inferior del murete restringe el desplazamiento en las direcciones horizontal y vertical, mientras que el cabezal superior restringe el desplazamiento en la dirección horizontal e impone un desplazamiento en la dirección vertical hacia abajo, simulando la acción del actuador hidráulico.

**RESULTADOS**

**Caracterización de bloques y morteros.** En la Figura 4 se presenta la nomenclatura utilizada para definir las dimensiones de los bloques. En la Tabla 3 y Tabla 4 se presentan las dimensiones, las áreas totales y netas promedio, así como la relación entre éstas, para los bloques de las plantas estudiadas en las pruebas preliminares y finales, respectivamente.

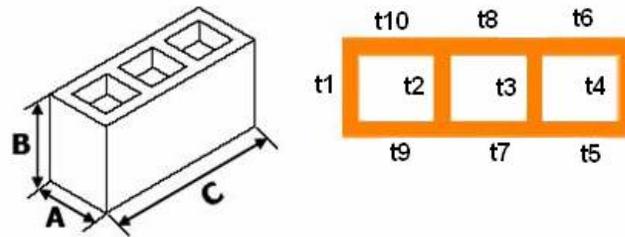


Figura 4. Nomenclatura de dimensiones de bloques

Tabla 3. Dimensiones y áreas promedio de los bloques para las pruebas preliminares

PLANTA	PROMEDIOS en cm													AREAS cm <sup>2</sup>		A <sub>NETA</sub> /A <sub>TOTAL</sub>
	A	B	C	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	TOTAL	NETA	
PLANTA 4	14.49	19.41	39.66	2.92	2.69	2.63	2.97	2.88	2.70	2.89	2.71	2.91	2.67	574.44	321.28	0.56
PLANTA 11	14.59	19.13	39.51	3.02	2.48	2.56	3.02	2.82	3.09	2.80	3.02	2.85	3.01	576.16	328.23	0.57

Tabla 4. Dimensiones y áreas promedio de los bloques para las pruebas finales

PLANTA	PROMEDIOS en cm													AREAS cm <sup>2</sup>		A <sub>NETA</sub> /A <sub>TOTAL</sub>
	A	B	C	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	TOTAL	NETA	
PLANTA 4	14.47	19.40	39.67	2.87	2.59	2.63	2.90	2.79	2.75	2.78	2.76	2.81	2.72	574.05	317.59	0.55
PLANTA 5	14.44	19.62	39.86	2.59	2.47	2.39	2.50	2.63	2.51	2.59	2.49	2.69	2.43	575.62	296.70	0.52
PLANTA 5_PD	14.36	19.59	39.81	2.36	2.09	2.15	2.31	2.39	2.33	2.37	2.35	2.38	2.32	571.76	273.56	0.48

En la Tabla 5 se presentan los valores de la resistencia a compresión axial promedio de los bloques utilizados en las pruebas preliminares y finales. En la tercera columna se presenta la resistencia a compresión axial calculada con el área total de los

bloques (f<sub>p</sub>). Estas resistencias son diferentes a las observadas por González (2006) (Tabla 1 y Tabla 2), sin embargo, continúan siendo valores representativos de la variación observada en la región.

Tabla 5. Resistencia a compresión axial promedio de los bloques para las pruebas preliminares y finales

PLANTA	AREA TOTAL (cm <sup>2</sup> )	f <sub>p</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	PLANTA	AREA TOTAL (cm <sup>2</sup> )	f <sub>p</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )
PLANTA 4	574.44	72.06	PLANTA 4	574.05	74.31
PLANTA 11	576.16	39.40	PLANTA 5	575.62	49.65
			PLANTA 5_PD	571.76	58.38

Del ensaye de los cubos de mortero se observó que la resistencia a compresión axial promedio  $f_j$  fue aproximadamente 38 kg/cm<sup>2</sup>, lo que representa un 8.5% superior a los valores promedio obtenidos por González (2006) (Tabla 1 y Tabla 2).

**Resistencia a compresión diagonal de la mampostería.** En la Tabla 6 se presentan los valores de la carga máxima aplicada ( $P_{max}$ ), el espesor del murete ( $t$ ), la longitud de la diagonal ( $L_c$ ), el área del espécimen sobre la diagonal ( $A$ ), la resistencia a compresión diagonal de los especímenes ( $V_m$ ), junto con la desviación estándar y el coeficiente de

variación; en la séptima columna se presenta el tipo de falla observado para cada espécimen. La nomenclatura empleada para identificar a los especímenes es M# para indicar el número de espécimen, BP# para indicar el número de planta de fabricación de los bloques y la terminación P o D para indicar si las pruebas son preliminares o finales, respectivamente. En la Figura 5 se presentan los dos tipos de falla observados en los ensayos de los muretes de mampostería estudiados en este trabajo; a la izquierda se presenta la falla por tensión diagonal en juntas y a la derecha la falla por deslizamiento en la junta horizontal.

**Tabla 6.** Resistencia a compresión diagonal de los muretes de mampostería

MURETE	$P_{max}$ (kg)	$t$ (cm)	$L_c$ (cm)	$A$ (cm <sup>2</sup> )	$V_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Tipo de Falla
M2BP 4P	4,545	14.49	171.00	2,477.79	1.83	Diagonal
M3BP 4P	5,418	14.49	171.00	2,477.79	2.19	Diagonal
M1BP 11P	6,064	14.59	170.50	2,487.60	2.44	Diagonal
M2BP 11P	7,288	14.59	170.00	2,480.30	2.94	Diagonal
M3BP 11P	5,975	14.59	171.00	2,494.89	2.40	Diagonal
M1BP 4D	6,786	14.47	170.50	2,467.14	2.75	Diagonal
M2BP 4D	6,147	14.47	170.50	2,467.14	2.49	Diagonal
M3BP 4D	7,769	14.47	171.00	2,474.37	3.14	Deslizamiento
M4BP 4D	5,686	14.47	171.00	2,474.37	2.30	Diagonal
M1BP 5D	8,113	14.44	171.00	2,469.24	3.29	Deslizamiento
M2BP 5D	7,398	14.44	171.00	2,469.24	3.00	Deslizamiento
M3BP 5D	7,157	14.44	171.00	2,469.24	2.90	Deslizamiento
M4BP 5D*	7,522	14.44	171.00	2,469.24	3.05	Diagonal
M5BP 5D	7,515	14.44	171.50	2,476.46	3.03	Deslizamiento
M6BP 5D	8,505	14.44	171.50	2,476.46	3.43	Deslizamiento
M7BP 5D**	7,729	14.36	171.50	2,462.74	3.14	Diagonal
M8BP 5D**	7,116	14.36	171.50	2,462.74	2.89	Diagonal
<b>Promedio</b>					<b>2.78</b>	
<b>Desv. Est.</b>					<b>0.43</b>	
<b>Coef. De Var.</b>					<b>0.16</b>	

\* Murete reforzado con varillas corrugadas de ½” de diámetro en los extremos.

\*\* Muretes construidos con bloques que tienen espesores de paredes de celdas más pequeños.



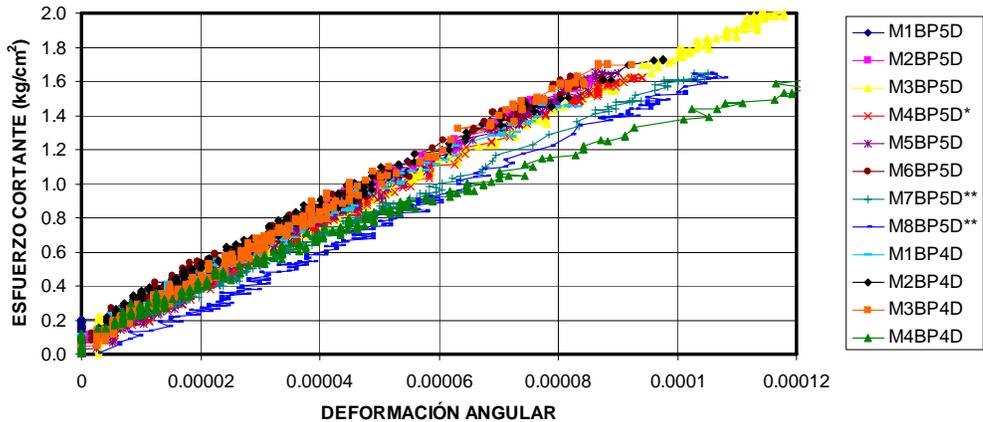
**Figura 5.** Modos de falla de la mampostería

**Módulo de cortante de la mampostería.** En la Tabla 7 se presentan los valores del módulo de cortante ( $G_m$ ), así como el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación. En este trabajo se calcula el módulo de cortante con base en una rigidez secante obtenida de la curva esfuerzo deformación ( $\tau-\gamma$ ); esta

rigidez secante se calcula con dos puntos de dicha curva definidos con el 40% y el 20% del esfuerzo cortante máximo:  $\tau_2 \psi \tau_1$ , respectivamente. Las curvas típicas esfuerzo deformación obtenidas de los especímenes se presentan en la (Figura 6).

**Tabla 7.** Módulos de cortante de los muretes de mampostería

MURETE	$\tau_2$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\tau_1$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\gamma_2$	$\gamma_1$	$G_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
M1BP4D	1.10	0.55	0.000057	0.000025	17,073
M2BP4D	1.00	0.50	0.000048	0.000020	17,344
M3BP4D	1.26	0.63	0.000064	0.000029	17,954
M4BP4D	0.92	0.46	0.000060	0.000023	12,609
M1BP5D	1.31	0.66	0.000068	0.000031	18,032
M2BP5D	1.20	0.60	0.000061	0.000028	17,914
M3BP5D	1.16	0.58	0.000062	0.000027	16,594
M4BP5D*	1.22	0.61	0.000067	0.000031	16,732
M5BP5D	1.21	0.61	0.000064	0.000029	17,343
M6BP5D	1.37	0.69	0.000069	0.000031	18,073
M7BP5D**	1.26	0.63	0.000078	0.000036	14,949
M8BP5D**	1.16	0.58	0.000073	0.000037	15,936
<b>Promedio</b>					<b>16,713</b>
<b>Desv. Est.</b>					<b>1,597</b>
<b>Coef. De Var.</b>					<b>0.10</b>



**Figura 6.** Curvas típicas de Esfuerzo – Deformación de los especímenes

**Análisis por el Método del Elemento Finito.** En la Figura 7 se presentan las distribuciones de esfuerzos normales  $\sigma_{xx}$  y  $\sigma_{yy}$  que se presentan en el murete; los ejes globales  $x,y$  tienen sentidos horizontal y vertical, respectivamente (Figura 8). En la Figura 8 se presenta la distribución de esfuerzos cortantes asociados a los

ejes locales  $x',y'$ ; la orientación de los ejes locales coincide con la orientación de las juntas horizontales; en esta figura se ilustra con una línea punteada la posición de la junta de la primera y última hilada del murete.

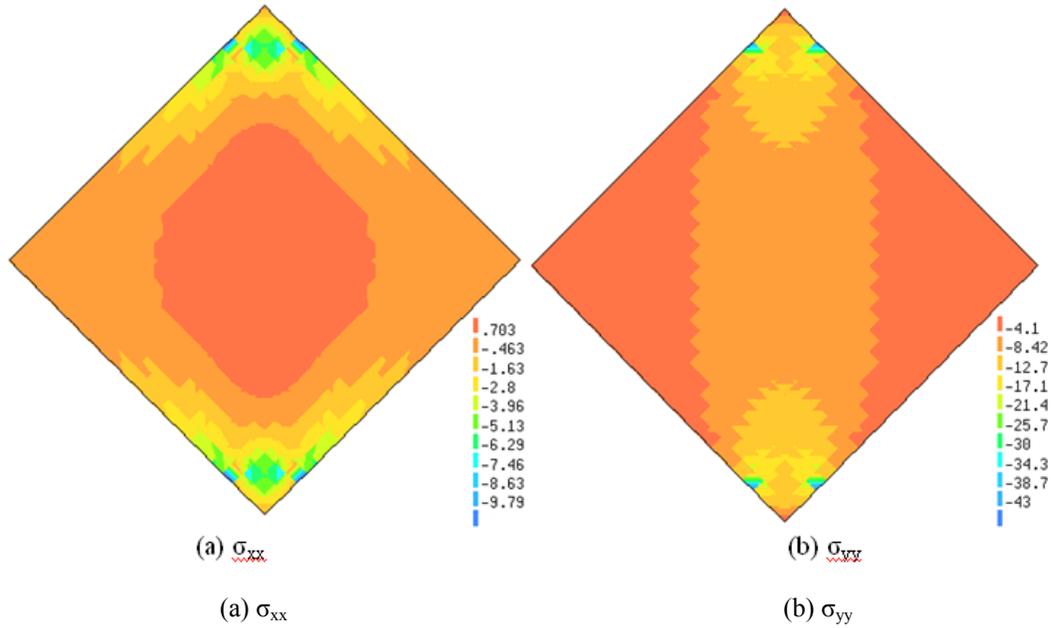


Figura 7. Distribución de esfuerzos normales en ejes globales

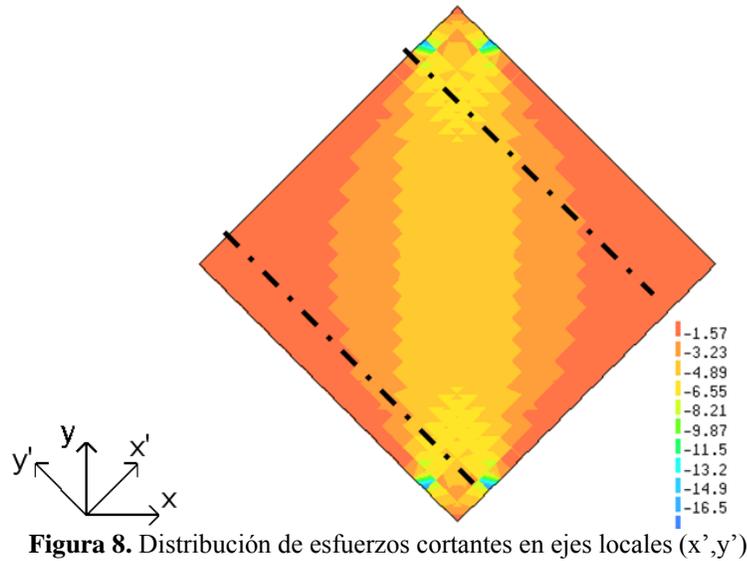


Figura 8. Distribución de esfuerzos cortantes en ejes locales ( $x', y'$ )

**DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Los valores de la resistencia a compresión diagonal variaron de 1.83 a 3.43 kg/cm<sup>2</sup> (Tabla 6). En este trabajo se propone conservadoramente un valor de diseño de 1.80 kg/cm<sup>2</sup> para la resistencia a compresión diagonal de la mampostería. Dicho valor corresponde al 5% percentil de los valores de la resistencia a compresión diagonal obtenidos en este trabajo, considerando conservadoramente un valor de coeficiente de variación de 0.20 y asumiendo que los valores de la resistencia a compresión diagonal se ajustan a una distribución normal. Con base en los tipos de falla observados en los especímenes se

determina que la resistencia a compresión diagonal de la mampostería depende de la adherencia bloque-mortero, ya que en todos los casos se obtuvo una falla en la junta.

Con el objetivo de mejorar la compresión sobre el tipo de falla, al observar que los especímenes de la planta 5 estaban fallando por deslizamiento, se decidió probar un murete (M4BP5D\*) que fue reforzado con una varilla corrugada de 1/2" de diámetro en cada uno de los extremos embebida en una celda rellena con grout, refuerzo similar al de un castillo ahogado. El propósito de este refuerzo fue el

inducir una falla por tensión diagonal en las juntas y cuantificar la diferencia en la carga resistente. El modo de falla obtenido en este murete fue el esperado, se indujo la falla por tensión diagonal en juntas. Sin embargo, no se observó un aumento considerable en la carga de ruptura; por lo tanto, se puede concluir que la resistencia a tensión diagonal en juntas y la resistencia por deslizamiento son similares para los especímenes construidos con bloques de la planta 5 y mortero 1:2:7.

En el Anteproyecto de norma NMX-MURETES (2003) se especifica que el módulo de cortante se debe calcular a partir de una rigidez secante definida con dos puntos:  $\tau_2 \psi \tau_{\gamma=0.00005}$ , que corresponden a los esfuerzos cortantes al 40% de la carga máxima y a una deformación angular de 0.00005. Se observó que esta fórmula no es aplicable a los resultados obtenidos, ya que las deformaciones por cortante son pequeñas (Tabla 7). Por lo anterior, en este trabajo se calcula el módulo cortante a partir de los esfuerzos cortantes al 40% y al 20% de la carga máxima. Las curvas esfuerzo deformación obtenidas de los especímenes presentan un comportamiento lineal (Figura 6). Los valores del módulo de cortante variaron de 12,609 a 18,073 kg/cm<sup>2</sup>, con un valor promedio de 16,713 kg/cm<sup>2</sup>. Del trabajo de González (2006) se calculó el valor promedio de los módulos de elasticidad de pilas de mampostería construidas con bloques de resistencia a compresión axial entre 50 y 70 kg/cm<sup>2</sup> y con mortero 1:2:7; dicho valor es de 39,430 kg/cm<sup>2</sup>. La relación entre el valor promedio

del módulo de cortante y el valor promedio del correspondiente módulo de elasticidad es de 0.42.

De los resultados del análisis por el Método del Elemento Finito se observa que a lo largo de la diagonal vertical del murete los esfuerzos en ejes globales  $\sigma_{xx}$  son de tensión en la zona central y de compresión en la zona cercana a los cabezales. Los esfuerzos de tensión  $\sigma_{xx}$  son menores que los esfuerzos de compresión  $\sigma_{yy}$ . Los esfuerzos cortantes en ejes globales ( $\tau_{xy}$ ) son prácticamente nulos a lo largo de la diagonal vertical.

En la Figura 7 se grafica la distribución de los esfuerzos cortantes ( $\tau_{x'y'}$ ) en ejes locales. Se observa en la figura que se presenta una concentración de esfuerzos en la zona cercana a los cabezales, lo que explica por qué en las pruebas experimentales en las que se presente la falla por deslizamiento se produce la falla en la primera o en la última junta horizontal, indicada con una línea punteada en la Figura 8.

Dado que en las juntas se producen los dos tipos de fallas en los muretes, falla por tensión diagonal en juntas y falla por deslizamiento, se procede a identificar cuál es el estado de esfuerzos al que están sometidas las juntas con base en los resultados del análisis por el Método del Elemento Finito. Se observa que en ambos casos las juntas de los muretes están sometidas a una combinación de esfuerzos cortantes y esfuerzos de compresión, como se indica esquemáticamente en la Figura 9.

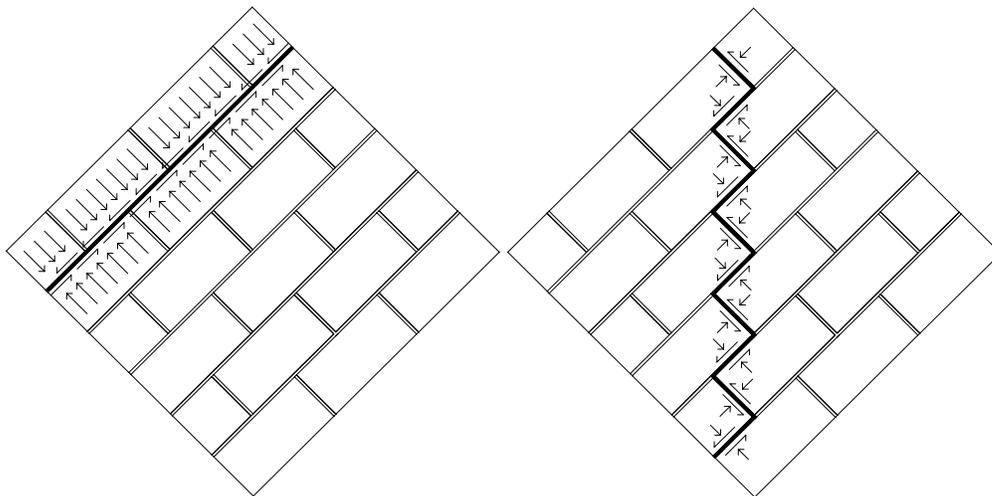


Figura 9. Esfuerzos en las juntas asociados a los dos modos de falla observados

**CONCLUSIONES**

Con base en los resultados obtenidos en este trabajo se presentan las siguientes conclusiones: (1) los muretes de mampostería sujetos a cargas de

compresión diagonal fallaron en la junta; los modos de falla fueron tensión diagonal en juntas y falla por deslizamiento; dichos modos de falla indican que la resistencia a compresión diagonal de la mampostería

es función de la adherencia bloque-mortero; (2) se recomienda un valor de diseño de  $1.8 \text{ kg/cm}^2$  para la resistencia a compresión diagonal de la mampostería, (3) el módulo de cortante promedio de la mampostería fue de  $16,713 \text{ kg/cm}^2$  y corresponde a un 42% del módulo de elasticidad promedio de la mampostería de la región.

## **RECONOCIMIENTOS**

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte de la Universidad Autónoma de Yucatán, que por medio de su Programa de Impulso y Orientación a la Investigación (PRIORI), brindó el apoyo económico necesario para la realización de este trabajo. El segundo autor agradece la beca otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para la realización de sus estudios de Maestría en Ingeniería.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Anteproyecto NMX-MURETES (2003). Determinación de la resistencia a compresión diagonal y de la rigidez a cortante de muretes de mampostería de barro y de concreto. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México D. F.
- ASTM C270 (2002). Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, EUA.
- ASTM E519 (2000). Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, EUA.
- Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán (2004). Reglamento de Construcciones del Municipio de Mérida. Mérida, Yucatán, México.
- Drysdale R. G., Hamid A. A., Baker L. R. (1999). Masonry Structures: Behavior and Design. The Masonry Society, Boulder Colorado, EUA.
- Gaceta Oficial del D. F. (2004). Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería. México, D.F.
- González Torres V. J. (2006). Determinación de la resistencia a compresión axial de la mampostería de bloques de concreto usada en Yucatán. Tesis de Maestría en Ingeniería opción Construcción, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
- 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 Edificación, S. C., México D. F.
- NMX-C-038-ONNCCE-2004. (2004). Industria de la construcción – Determinación de las dimensiones de ladrillos, tabiques, bloques y tabicones para la construcción. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México D. F.
- NMX-C-061-ONNCCE-2001. (2001). Industria de la construcción – Cemento - Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México D. F.
- NMX-C-085-ONNCCE (2002). Industria de la construcción -Cementos Hidráulicos- Método estándar para el mezclado de pastas y morteros de cementantes hidráulico. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C., México D. F.
- Marín Gómez F. J. (2008). Determinación de la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de la mampostería de piezas de concreto. Tesis de Maestría en Ingeniería opción Estructuras, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
- TNO DIANA (2008). DIANA 9.3 User's Manual. TNO DIANA, Delft, Holanda.

Este documento se debe citar como:

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.