



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstruccion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

García Giraldo, John Mario; Ledezma Araya, Christian; Bonett Díaz, Ricardo León
Modelo analítico del comportamiento a compresión de bloques huecos de concreto
Revista de la Construcción, vol. 12, núm. 3, diciembre, 2013, pp. 76-82
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127631072009>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Modelo analítico del comportamiento a compresión de bloques huecos de concreto

Analytical Model for Compression Behavior of Hollow Concrete Blocks

John Mario García Giraldo (Autor Principal)

jmgarcia@udem.edu.co

Universidad de Medellín, Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil, Colombia

Carrera 87 # 30-65 Medellín Colombia.

Fono: 57-4-3405333, Fax: 57-4-3405555

Christian Ledezma Araya (Autor Oficial de Contacto)

Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

ledezma@ing.puc.cl

Ricardo León Bonett Díaz

Universidad de Medellín, Colombia

rbonett@udem.edu.co

Código: 0106

Fecha de Aceptación: 1 de diciembre de 2013.

Resumen

El desempeño estructural de la albañilería está relacionado directamente con las propiedades mecánicas de sus materiales constituyentes. Uno de los principales parámetros que controlan el comportamiento de este sistema, es la resistencia a la compresión de la unidad. Sin embargo, para la modelación numérica de la albañilería se emplean modelos simplificados elásticos-lineales recomendados por los códigos de diseño, los cuales no permiten establecer adecuadamente el comportamiento real de este material, generando altas incertidumbres en sus desplazamientos. Los métodos modernos de diseño se basan en el control de desplazamientos, siendo esta una de las principales variables que condicionan su desempeño estructural. Para ello, es fundamental conocer las leyes constitutivas de los principales elementos que conforman la albañilería. En este trabajo se ha desarrollado un modelo constitutivo para determinar el comportamiento de bloques de concreto a partir de la correlación entre algunos modelos constitutivos del hormigón y los resultados de una evaluación experimental en 90 bloques aligerados de concreto liviano, clasificados en dos grupos acorde a su nivel de resistencia (10MPa y 30MPa). Los resultados obtenidos permiten identificar que los modelos que involucran dentro de sus parámetros la resistencia del bloque, son los que mejor se ajustan a los resultados experimentales.

English Abstract

The structural behavior of concrete masonry is strongly influenced by the mechanical properties of the constituent materials. The compressive strength of masonry is probably the most important parameter in the design of masonry structures, and it depends mainly on the strength of the individual blocks. However, the design code for masonry structures assumes linear-elastic behavior for the numerical models, which cannot provide an accurate prediction of the real structural behavior, thereby producing high uncertainty on the displacements. Currently, displacement based design approaches have been developed considering the stress-strain relationship as one of the most important parameter in order to control the structural response. In this work, a constitutive model has been developed in order to estimate the behavior of concrete blocks under uniaxial compression stress by means of the correlation between constitutive models and the experimental results corresponding to 90 samples of hollow concrete blocks. The results show that the strength of the blocks should be involved in the analytical model in order to obtain a good match with the experimental results.

Keywords: Stress-strain curve; Compressive strength; Modulus of elasticity; Hollow concrete block; Masonry.

Introducción

La albañilería es un material de comportamiento no lineal debido, principalmente, a la anisotropía mecánica de sus materiales constitutivos (Haach et al., 2010). Por lo tanto, salvo para deformaciones muy pequeñas, no es correcto emplear formulaciones de comportamiento elástico para establecer el desempeño estructural de la albañilería, ni tampoco suponer valores únicos del módulo de elasticidad para determinar las deformaciones del sistema al aplicársele un conjunto de cargas definido. Por el contrario, el comportamiento no lineal de la albañilería requiere de diseños estructurales que incorporen la plasticidad de sus componentes, que renueven los planteamientos de diseño elástico que promueven muchos códigos de diseño y que, eventualmente, reduzcan la incertidumbre en el diseño proporcionando factores de seguridad adecuados para este tipo de estructuras.

Descripción del problema

El concreto y la albañilería comparten ciertas características, entre ellas: buena resistencia a la compresión, baja resistencia a la tracción, y fragilidad. Esto hace válido pensar que el conocimiento acumulado de las diversas investigaciones desarrolladas en el concreto se pueda extrapolar, con las modificaciones apropiadas, a la albañilería mediante, por ejemplo, el uso de expresiones analíticas y empíricas similares. Un paso fundamental dentro de la investigación del desempeño mecánico de la albañilería estructural, es el conocimiento adecuado de las variables de resistencia de la unidad de albañilería (Jaafar et al. 2006). Lamentablemente, son muy pocas las investigaciones sobre el tema y la mayoría de ellas se han centrado en el comportamiento del conjunto (unidades + mortero), sin preocuparse por lo que sucede con cada una de las partes de manera independiente (Haach et al. 2010). Aunque el comportamiento de la unidad de albañilería difiere si se trata de prisma, murete o muro, los parámetros de resistencia de la unidad están directamente relacionados con el desempeño de las diferentes configuraciones geométricas del

sistema (Jaafar et al. 2006). El esfuerzo de compresión es posiblemente el parámetro más importante a determinar en las unidades de albañilería. Asimismo, la curva tensión-deformación unitaria determina los parámetros de diseño más importantes de la albañilería, los que sirven para predecir el comportamiento estructural del sistema y para identificar los diferentes estados límites de su desempeño mecánico.

Estado del arte de los modelos empíricos existentes para el concreto convencional

Las investigaciones enfocadas a establecer el comportamiento mecánico de la unidad de albañilería son muy escasas; no obstante, Jaafar et al. (2006) coinciden en que la resistencia de la albañilería está limitada principalmente por la resistencia de su unidad. Lo anterior implica que una de las maneras más eficientes de incrementar el desempeño estructural en la albañilería es optimizando la resistencia de sus unidades.

Por la similitud que existe entre los componentes con los que se produce el hormigón convencional y el mortero en los bloques prefabricados, y dado el vacío que existe en la literatura sobre las curvas de comportamiento mecánico específicas para bloques de concreto, se ha hecho una revisión completa de las diferentes ecuaciones propuestas en la literatura de la curva esfuerzo-deformación unitaria en el concreto, y su posible concordancia con los valores experimentales obtenidos en los bloques prefabricados de concreto (Tabla 1).

Tabla 1. Leyes esfuerzo – deformación para el concreto.
Fuente: Elaboración propia.

Investigación	Ecuaciones	Nº	Parámetros
(Hognestad, 1951)	$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{2\varepsilon}{\varepsilon_c} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^2$	(1)	f'_c, ε_c
(Smith & Young, 1955)	$\frac{f_c}{f'_c} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right) e^{1-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)}$	(2)	f'_c, ε_c
(Sargin, Ghosh, & Handa, 1971)	$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{n\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^2}{1 + (n-2)\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)}$ donde $n = \frac{E_i}{E_c}$	(3)	f'_c, ε_c, n
(Popovics, 1973)	$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{\frac{n}{n-1}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)}{\frac{1}{n-1} + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^{\frac{n}{n-1}}}$ donde $n = \frac{E_i}{E_c}$	(4)	f'_c, ε_c, n

Aspectos experimentales

Los bloques ensayados son piezas de concreto prefabricadas mediante el sistema de vibro-compactación. En Colombia, la norma que establece los requisitos mínimos de dimensionamiento y resistencia mecánica de estos elementos es la Norma Técnica Colombiana NTC 4026 (1997), "Ingeniería Civil y Arquitectura. Unidades (Bloques y Ladrillos) de concreto, para albañilería estructural" (NTC 4026, 1997).

Geometría

El bloque de concreto que se estudió tiene forma de prisma recto con 2 perforaciones verticales y simetría en sus dos direcciones principales. Sus dimensiones nominales son 150*200*400 mm y las dimensiones reales aproximadas son (140±1)*(190±2)*(390±1) mm. La sección transversal del bloque posee un área bruta nominal de 54600 mm² y un área promedio neta de 32800 mm² (60% del área total de la sección). La relación de esbeltez (altura/ancho) de las muestras, es de 1.36, por lo que se tendrían que aplicar factores de corrección si estos resultados se quisieran extrapolar a otras relaciones de esbeltez (Drysdales et al. 1994).

Materiales constitutivos

Se evaluaron bloques con dos niveles de resistencia: resistencia comercial [$f'_b=10$ MPa] y alta resistencia [$f'_b=30$ MPa]. Los materiales constitutivos son los mismos y solo varía la dosificación de la mezcla. Los materiales constituyentes de los bloques de concreto ensayados, y su respectiva dosificación por peso, son: Bloques de resistencia comercial [$f'_b=10$ MPa]: arena fina (5.5%), arena media (30.1%), arena gruesa (46.5%), cemento (6.9%), ceniza volante (5.5%) y agua (5.5%). Bloques de alta resistencia [$f'_b=30$ MPa]: arena fina (2.7%), arena media (50.1%), arena gruesa (28.2%), cemento (12.0%), ceniza volante (3.9%) y agua (3.1%).

Metodología del programa experimental

Los bloques de concreto fueron ensayados a compresión uniaxial cumpliendo los parámetros establecidos por la Norma Icontec NTC 4024 (ICONTEC, 2001). A partir de este ensayo, se obtuvieron las curvas esfuerzo-deformación unitaria de las diferentes unidades de bloque ensayadas hasta llegar a la falla y se establecieron correlaciones de algunos parámetros carga-deformación para este tipo de material.

Montaje del ensayo

Cada bloque de concreto fue cargado monotónicamente con velocidad controlada de 1 kN/s hasta la falla, y se monitoreó su deformación axial con la finalidad de obtener la historia completa de carga-deformación axial, y así los principales parámetros que definen su comportamiento mecánico.

Para la presente investigación se ensayaron hasta la rotura un total de 90 probetas, 60 de ellas corresponden a bloques de resistencia comercial ($f'_b=10$ MPa), elemento convencionalmente empleado en el mercado nacional colombiano, y las restantes 30 probetas corresponden a bloques de alta resistencia ($f'_b=30$ MPa), cuya aplicación es ideal en edificios de mediana y gran altura o en estructuras con altos niveles de esfuerzos de compresión. Las probetas fueron ensayadas en una máquina de compresión servo-hidráulica con capacidad de 2500 kN y una precisión de ±1 kN, controlada por un sistema de adquisición de datos digital (Figura 1).

Instrumentación

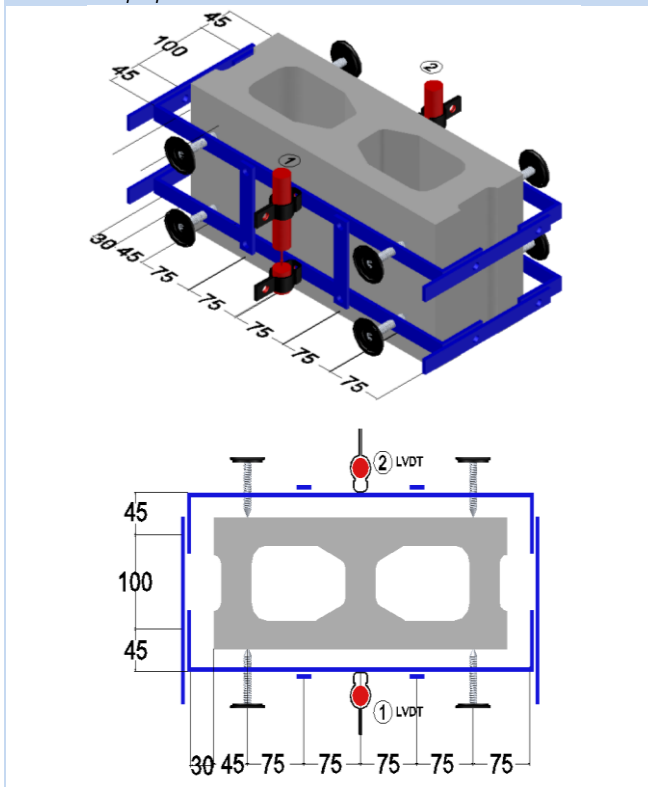
Para monitorear el desplazamiento en la dirección de aplicación de la carga axial, se colocaron 2 transductores de desplazamiento (LVDT's) a cada lado del bloque con precisión ±0.001 mm (Figura 2). El marco de fijación para la medición del

desplazamiento vertical del bloque, fue sujeto en posiciones adyacentes a la zona de vacíos del bloque donde se anticipa que se generarán las mayores deformaciones unitarias de acuerdo con lo reportado por Barbosa y Hanai (C.S Barbosa y Hanai, 2009).

Figura 1. Montaje experimental de las probetas ensayadas. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Acople de los LVDTs al marco de fijación al bloque. Fuente: Elaboración propia.



Resultados

A partir de la historia de carga versus deformación axial de cada una de las probetas se obtuvieron las curvas esfuerzo-deformación unitaria de cada uno de los bloques ensayados, y los siguientes parámetros de comportamiento mecánico: módulo de elasticidad (secante y tangente al origen),

deformación unitaria máxima, esfuerzo de rotura y su respectiva deformación unitaria.

Curvas esfuerzo-deformación unitaria

La Figura 3 muestra que el 93% de los bloques presenta un comportamiento tensión-deformación relativamente lineal hasta aproximadamente el 30% de su resistencia máxima, punto a partir del cual comienzan a aparecer las primeras fisuras al interior de la unidad de bloque, incrementándose gradualmente su comportamiento inelástico. Para un nivel de carga cercano al 90% de su carga máxima, se observa un mayor incremento del agrietamiento y la posterior falla con desprendimiento de la cuña de grieta diagonal de corte (Barbosa y Hanai, 2006).

Módulo de elasticidad

Los resultados experimentales mostraron que las curvas de esfuerzo-deformación de las unidades de albañilería tuvieron un comportamiento aproximadamente lineal en el primer tercio de la curva y después presentaron una notoria tendencia no lineal. Los resultados obtenidos por las metodologías del Masonry Standards Joint Committee (MSJC, 2005) y del American Concrete Institute (American Concrete Institute -ACI, 2005) para establecer el módulo de elasticidad de la unidad de albañilería fueron muy similares entre sí, cuyas diferencias fueron inferiores al 10%. De esta forma, se tomó la determinación de trabajar con la ecuación propuesta por el MSJC, por ser una metodología avalada por el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (NSR-10, 2010) en su numeral D.5.2.1.2 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010). Esta norma establece el módulo de elasticidad secante como la pendiente de la recta secante entre el 5% y el 33% de la resistencia máxima en la curva esfuerzo-deformación unitaria.

Dentro de los modelos analíticos encontrados en la literatura (Popovics, 1973; Sargin et al. 1971), se identificó que un parámetro característico del comportamiento de la curva esfuerzo-deformación unitaria, es la relación entre el módulo de elasticidad tangente inicial (E_t) sobre el origen de coordenadas de la curva esfuerzo-deformación unitaria, y el módulo de elasticidad secante trazado desde el origen de coordenadas hasta el punto correspondiente al esfuerzo máximo (E_c). Se observa que la tendencia de la razón entre los módulos de elasticidad tangente y secante versus la resistencia a la compresión de los bloques de concreto ensayados es similar a lo observado en el hormigón convencional y que los resultados experimentales se pueden aproximar satisfactoriamente acordes a lo expresado en la ecuación 5.

$$\frac{E_t}{E_c} = \frac{20.1751 (MPa)}{f'_b} + 1 \quad (5)$$

En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos al evaluar la correlación entre el módulo de elasticidad (E_b) calculado acorde a los parámetros establecidos por el MSJC (2005) y la resistencia máxima obtenida experimentalmente en los bloques de concreto. Sobre esta misma figura se reportan los valores experimentales obtenidos por Kaushik et al. (2007), Haach y otros (Haach et al. 2010), Barbosa y Hanai (2009) y por Nwofor (2012).

Figura 3. Curvas esfuerzo-deformación unitaria de los bloques ensayados. Fuente: Elaboración propia.

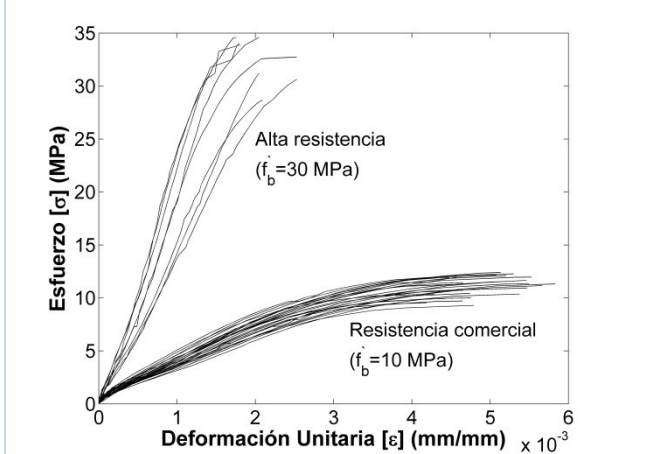
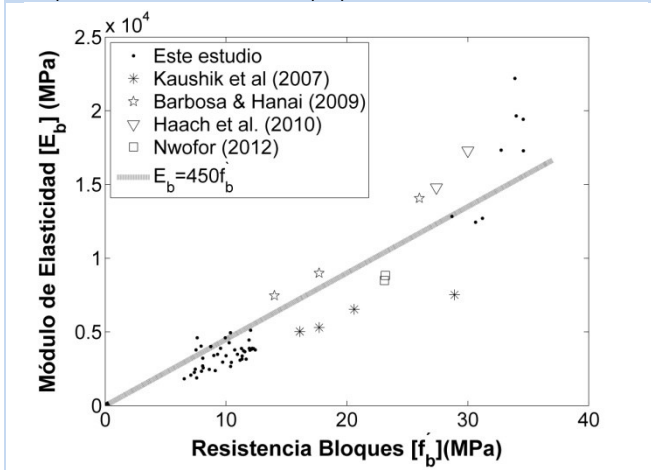


Figura 4. Módulo de elasticidad del bloque versus resistencia a la compresión. Fuente: Elaboración propia.



La correlación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión en los bloques ensayados se ajusta mejor a una relación del tipo $E_b = 450f_b'$. Incluso, la tendencia que se observa en los resultados experimentales no es perfectamente lineal, sino que ligeramente curva.

Modos de falla

La falla de los bloques a compresión se caracteriza por una grieta diagonal de corte (Barbosa y Hanai, 2006) la que se produce por una combinación de los esfuerzos generados, por la baja relación de esbeltez del bloque, y por el confinamiento lateral y la fuerza de fricción generada en el contacto entre el bloque y la placa de aplicación de la carga (Barbosa y Hanai, 2006).

Ninguna de las probetas con resistencia comercial ($f_b' = 10$ MPa) presentó una falla explosiva, sino que las fallas fueron acompañadas de la prolongación de las grietas diagonales iniciadas generalmente en los extremos del bloque, similar a lo observado por Barbosa y Hanai (2009) en sus ensayos experimentales. Para los bloques de alta resistencia ($f_b' = 30$ MPa) se presentó una falla explosiva, lo que dificulta la detección exacta de un patrón de agrietamiento antes de la falla. Sin embargo, las fisuras iniciales muestran un patrón de

agrietamiento similar al observado en bloques de resistencia comercial.

Correlación entre la deformación unitaria en la resistencia máxima y la resistencia a la compresión

Al igual que en el hormigón convencional, los bloques de concreto liviano presentan valores de deformación unitaria máxima que varían de acuerdo a sus niveles de resistencia a la compresión. A medida que la resistencia máxima del bloque de concreto aumenta, su módulo de elasticidad crece y su ductilidad disminuye, por lo que se llega a la falla con una deformación unitaria menor a la obtenida en bloques de menor resistencia (Figura 3).

Figura 5. Falla diagonal de corte, típica en bloques de baja y media resistencia. Fuente: Elaboración propia.



$$\varepsilon_c = 0.0078[f_c'(MPa)]^{-\frac{1}{4}} \quad (6)$$

Aunque son pocos los autores que especifican una correlación entre la deformación unitaria correspondiente a la resistencia máxima y el esfuerzo máximo resistente en el concreto (Mohamad et al., 1990; Wee et al., 1996), los valores experimentales obtenidos en tales ensayos muestran una correspondencia aproximada entre estas dos variables tal como se observa en la correlación propuesta por Mohamad et al. (1990) (Ecuación 6) tiene una baja correlación con los valores experimentales obtenidos, puesto que su calibración se hizo con base en resultados de laboratorio en probetas de concreto. En la ausencia de un mayor número de resultados se propone adoptar una relación lineal entre ambas variables (Figura 6).

Resultados versus modelos analíticos existentes

En la Figura 7 se pueden observar las curvas normalizadas obtenidas para los bloques de concreto ensayados. Estas curvas muestran que bloques de diferente resistencia poseen parámetros de curvatura y concavidad que las diferencian entre sí, a pesar de ser la misma tipología de material y de poseer la misma geometría de bloque para ambos casos.

Los primeros autores que establecieron una correlación matemática entre la curva esfuerzo-deformación unitaria para el concreto, Hognestad (1951) y Smith y Young (1955), definieron los parámetros de la curva independientemente del grado de resistencia de la mezcla de concreto. Con el paso del tiempo, autores como Sargin et al. (1971) y Popovics (1973), observaron las variaciones que presentaban las curvas bajo diferentes niveles de resistencia en la mezcla del concreto y propusieron algunos parámetros adicionales en sus formulaciones para incorporar tales efectos.

La Figura 8a muestra que existe un comportamiento normalizado muy similar entre los bloques prefabricados de concreto ensayados y el hormigón convencional cuando se someten a esfuerzos de compresión uniaxial. Esta figura muestra cómo los resultados experimentales obtenidos en los bloques de resistencia comercial ($f'_b=10\text{MPa}$) se correlacionan bien con los diferentes modelos analíticos desarrollados en la literatura. El único modelo que se aleja un poco de los resultados experimentales es la curva exponencial propuesta por Smith y Young (1955).

De igual manera, se hizo la comparación entre las curvas normalizadas propuestas en la literatura y los resultados experimentales para bloques de alta resistencia (Figura 8b). La Figura 8b muestra que los modelos analíticos que involucran dentro de sus expresiones parámetros de comportamiento dependientes de la máxima resistencia a la compresión, son los que mejor se ajustan a los valores obtenidos experimentalmente. Por el contrario, modelos como los propuestos por Hognestad (1951) y Smith y Young (1955) no muestran una correlación satisfactoria con los resultados experimentales para las diferentes resistencias.

Figura 6. Correlación entre la deformación unitaria máxima (ϵ_b) y la resistencia a la compresión del bloque (f'_b). Fuente: Elaboración propia.

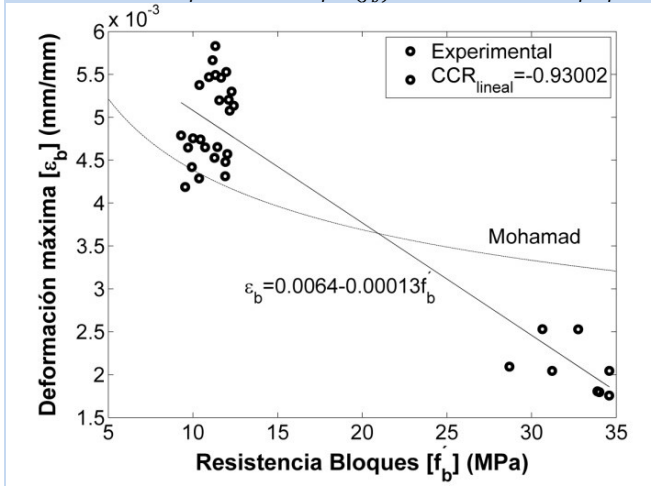


Figura 7. Curvas esfuerzo-deformación normalizadas para a) $f'_b=10\text{MPa}$ y b) $f'_b=30\text{MPa}$. Fuente: Elaboración propia.

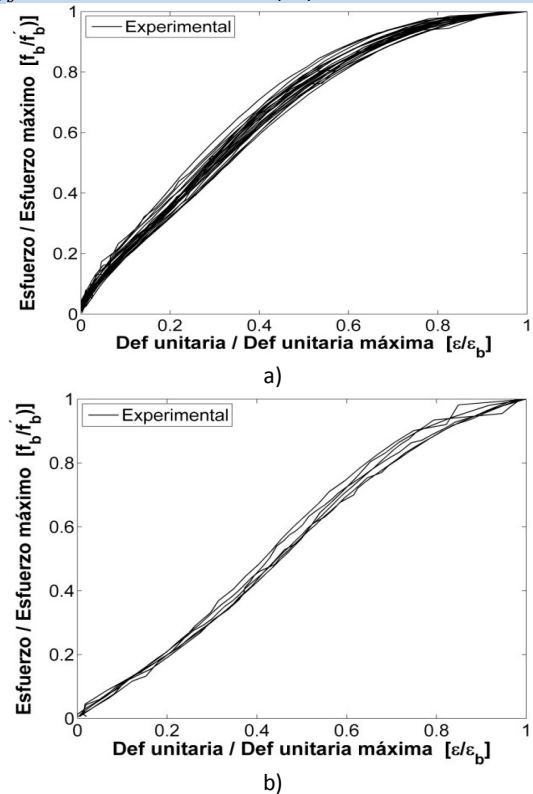
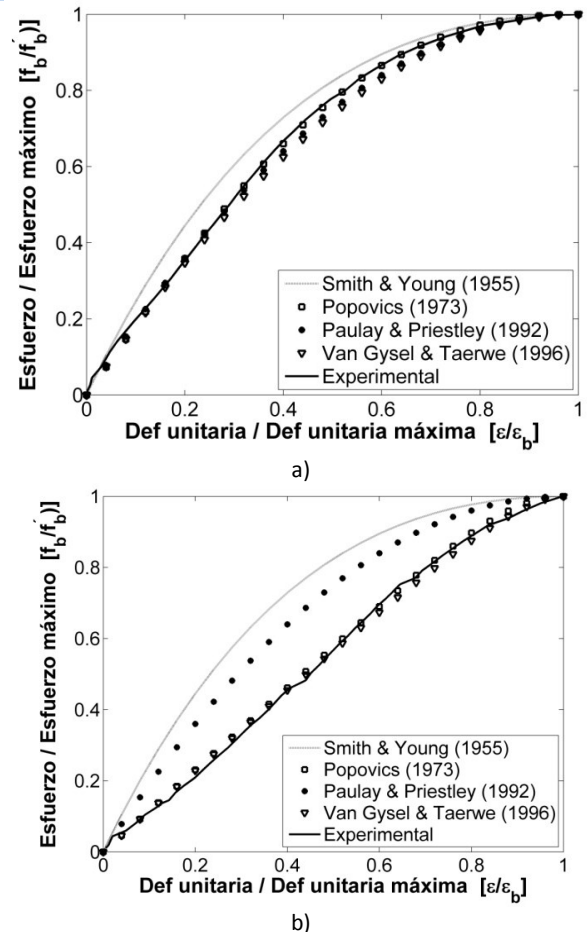


Figura 8. Datos experimentales versus modelos analíticos en bloques de resistencia a) comercial ($f'_b=10\text{MPa}$) y b) alta ($f'_b=30\text{MPa}$). Fuente: Elaboración propia.



Modelo analítico propuesto

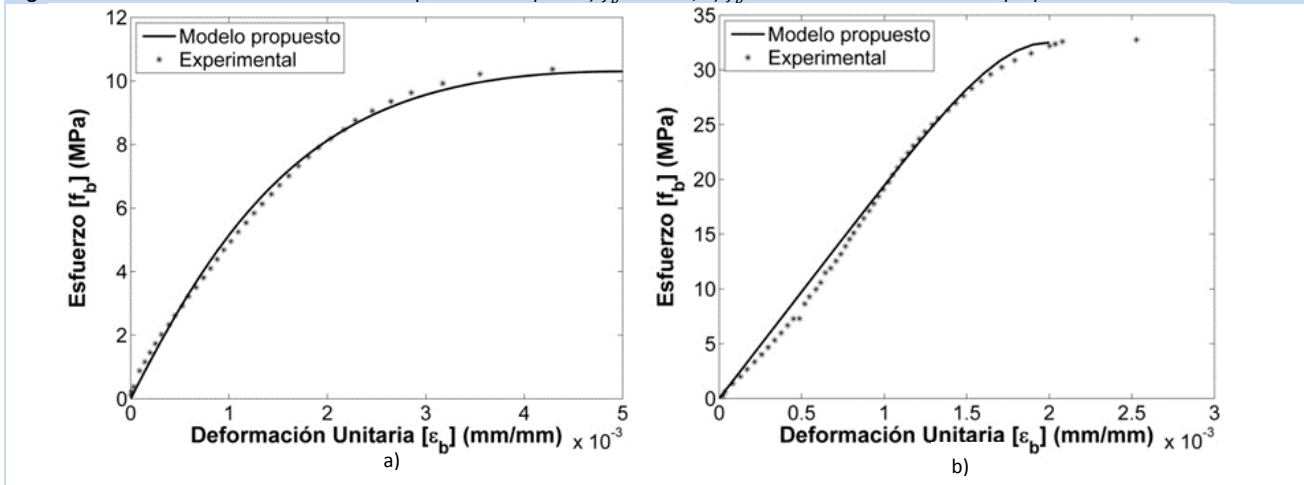
Los resultados experimentales obtenidos muestran que las ecuaciones que mejor se ajustan a los ensayos de laboratorio, son aquellas que involucran a la máxima resistencia a la compresión del hormigón dentro de sus parámetros para definir la forma de la curva esfuerzo-deformación unitaria. De esta manera se determinó adaptar la expresión propuesta por Popovics (1973), por su mejor correlación con los resultados experimentales y la simplicidad en su formulación matemática. A partir de las 90 probetas ensayadas, se han ajustado los parámetros empleados por Popovics calibrándolos a partir de los ensayos realizados. La expresión propuesta (Ecuación 7), ha sido formulada en base a los ensayos a compresión uniaxial realizados.

$$\frac{f_b}{f'_b} = \frac{\frac{n_b}{n_b - 1} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} \right)}{\frac{1}{n_b - 1} + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_b} \right)^{\frac{n_b}{n_b - 1}}} \quad (7)$$

$$\text{donde, } n_b = \frac{E_i}{E_c} = \frac{20.1751 \text{ (MPa)}}{f'_b} + 1$$

La comparación entre los resultados experimentales obtenidos y la curva propuesta se puede observar en la Figura 9 donde se aprecia la buena correlación que existe entre los valores experimentales y el modelo analítico propuesto, tanto para los bloques de concreto de resistencia comercial como para los bloques de alta resistencia.

Figura 9. Modelo analítico versus resultados experimentales para a) $f'_b=10\text{MPa}$, b) $f'_b=30\text{MPa}$. Fuente: Elaboración propia.



Discusión y conclusiones

Se ha evaluado experimentalmente el comportamiento mecánico de bloques huecos prefabricados de concreto liviano ante cargas de compresión, obteniendo la historia de carga-deformación y los principales parámetros que controlan el comportamiento de las unidades de albañilería. A partir de los resultados adquiridos, y considerando la similitud en los resultados experimentales obtenidos, se ha adaptado la expresión propuesta por Popovics (1973) para evaluar el comportamiento normalizado a compresión del concreto, para ser empleada en el caso de los bloques prefabricados de concreto. Se establecieron nuevas correlaciones empíricas para obtener los parámetros correspondientes al desempeño estructural observado en los bloques de concreto. Lo anterior constituye una herramienta útil para el diseño de estructuras de albañilería bajo criterios basados en el desempeño estructural.

Los dos niveles de resistencia a la compresión evaluados, permitieron identificar la necesidad de emplear modelos analíticos que involucren la variación de la resistencia a la compresión. La expresión propuesta por Popovics (1973) cumple con este requerimiento. Los resultados obtenidos evidencian que tanto para el concreto convencional, como para los bloques prefabricados, la curva esfuerzo-deformación unitaria es dependiente de la magnitud de su resistencia a la compresión uniaxial, y que aunque el proceso constructivo de

ambos materiales difiere, su desempeño estructural bajo cargas de compresión uniaxial es similar.

Las expresiones empleadas por los códigos de diseño para obtener los principales parámetros que condicionan el comportamiento de la albañilería, deberían ser revisadas y validadas experimentalmente. En general, los resultados experimentales muestran que los valores del módulo de elasticidad de las unidades de albañilería se encuentran por debajo de los valores propuestos por la mayoría de las normativas, lo que implica que las deformaciones de estos elementos estarían siendo subestimados en la actualidad. Los valores experimentales obtenidos en esta investigación muestran que la mejor correlación entre el módulo de elasticidad de la unidad de mampostería y su resistencia a la compresión es una curva, contrario a la propuesta de correlación lineal expuesta por la gran mayoría de los códigos.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad de Medellín por financiar este trabajo bajo el desarrollo del doctorado del profesor John Mario García. Un especial reconocimiento a la empresa Prefabricados Adoquin-Ar por la donación de los bloques utilizados para la etapa experimental y la empresa Ingeconcreto, que facilitó las instalaciones de su laboratorio, personal y equipos para la

ejecución de los ensayos. Finalmente a los estudiantes de ingeniería civil de la Universidad de Medellín; Luis Fernando Moreno y Juan Manuel Maya por su apoyo en la ejecución de los ensayos y procesamiento de la información.

Referencias

- ACI 530-05/ASCE 5-05/TMS 402-05 (2005) American Concrete Institute. Building Code Requirements for Masonry Structures. Detroit, Estados Unidos.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá, Colombia.
- Barbosa, C. S., & Hanai, J. B. (2006). Resistência e deformabilidade de blocos vazados de concreto e suas correlações com as propriedades mecânicas do material constituinte. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, 8(34), 45-74.
- Barbosa, C. S., & Hanai, J. B. (2009). Strength and deformability of hollow concrete blocks: correlation of block and cylindrical sample test results. *Ibracon Structures and Materials Journal*, 2(1), 85-99.
- Drysdale, R. G., Hamid, A. A., & Baker, L. R. (1994). Masonry structures: behavior and design. New Jersey: Prentice Hall.
- Haach, V. G., Vasconcelos, G., Lourenço, P. B., & Mohamad, G. (2010). Influence of the mortar on the compressive behavior of concrete masonry prisms. *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, Vol18, 79-84.
- Hognestad, E. (1951). Study of combined bending and axial load in reinforced concrete Members. Illinois, The reinforced concrete research council of the engineering foundation.
- ICONTEC. (2001). Prefabricados de concreto: Muestreo y ensayo de prefabricados de concreto no reforzados, vibrocompactados NTC 4024. Bogotá, Colombia.
- Jaafar, M. S., Thanoon, W. A., Najm, A., Abdulkadir, M. R., & Abang, A. A. (2006). Strength correlation between individual block, prism and basic wall panel for load bearing interlocking mortarless hollow block masonry. *Construction and Building Materials*, 20(7), 492-498.
- Kaushik, H. B., Rai, D. C., & Jain, S. K. (2007). Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(9), 728-739.
- Mohamad, A., Farid, B. J., & Al-Janabi, A.I.M. (1990). Stress-Strain Relationship for concrete in compression made of local materials. *JKAU: Eng. Sci*, Vol2, 183-194.
- NTC 4026. (1997). Ingeniería Civil y Arquitectura. Unidades (Bloques y Ladrillos) de concreto, para albañilería estructural. Norma Técnica Colombiana. Bogotá, Colombia.
- Nwofor, T. C. (2012). Experimental determination of the mechanical properties of clay brick masonry. *Canadian Journal on Environmental, Construction and Civil Engineering*, 3(3), 127-145.
- Popovics, S. (1973). A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. *Cem. Concr. Res*, 3(5), 583-599.
- Sargin, M., Ghosh, S. K., & Handa, V. K. (1971). Effect of lateral reinforcement upon the strength and deformation properties of concrete. *Mag. Concrete Res*, 23(75-76), 99-110.

Smith, G. M., & Young, L. E. (1955). Ultimate Theory. Ultimate theory in flexure by exponential function. *Journal of the American Concrete Institute*, 52(11), 349-359.

Wee, T. H., Chin, M. S., & Mansur, M. A. (1996). Stress-strain relationship of high-strength concrete in compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8(2), 70-76.

Notaciones

Los siguientes símbolos fueron usados en el presente artículo:

- E_b : Módulo de elasticidad secante acorde a la propuesta del MSJC
- E_c : Módulo de elasticidad secante en la resistencia máxima $E_c = \frac{f'_c}{\epsilon_c}$
- E_t : Módulo de elasticidad tangente inicial correspondiente a $\epsilon = 0$.
- ϵ_b : Deformación unitaria en el bloque de concreto correspondiente a f'_b
- ϵ_c : Deformación unitaria en el concreto correspondiente a f'_c
- n : Correlación entre los módulos de elasticidad tangente inicial y secante máximo en el concreto
- ϵ : Deformación unitaria
- f_b : Esfuerzo de compresión del bloque de concreto
- f'_b : Máximo esfuerzo a la compresión del bloque de concreto
- f_c : Esfuerzo de compresión del concreto
- f'_c : Máximo esfuerzo a la compresión del concreto
- n_b : Correlación entre los módulos de elasticidad tangente inicial y secante máximo en el bloque de concreto