

Influencia de la forma de colocación del mortero en el comportamiento a compresión uniaxial de los bloques huecos de concreto.

R. García-Cedeño¹ , J. Álvarez-Pérez^{1*} , M. Mesa-Lavista¹ , F. A. Carpio-Santamaría² ,
J. H. Chávez-Gómez¹ , R. González-Alcorta¹ , G. Fajardo-San Miguel¹ 

*Autor de Contacto: jose.alvarezpr@uanl.edu.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i1.703>

Recibido: 08/09/2023 | Correcciones recibidas: 17/10/2024 | Aceptado: 29/11/2024 | Publicado: 01/01/2025

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar cómo la colocación del cabeceo influye en el comportamiento a compresión uniaxial de bloques huecos de concreto. Se analizaron dos métodos de colocación: 1) sobre el área bruta y 2) en las caras laterales. Se realizó un programa experimental y un análisis estadístico para identificar diferencias significativas entre ambos métodos. Los resultados mostraron que los bloques con cabeceo en las caras laterales presentaron una disminución del 12.5% en la capacidad de carga y del 11.33% en la rigidez, en comparación con los cabeceados sobre el área bruta. Este estudio se enfoca en bloques huecos de concreto y concluye que el uso de un denominador variable conduce a una interpretación errónea de su resistencia.

Palabras clave: mampostería; bloques huecos de concreto; formas de colocación del cabeceo.

Citar como: García-Cedeño, R., Álvarez-Pérez, J., Mesa-Lavista, M., Carpio-Santamaría, F. A., Chávez-Gómez, J. H., González-Alcorta, R., Fajardo-San Miguel, G. (2025), “Influencia de la forma de colocación del mortero en el comportamiento a compresión uniaxial de los bloques huecos de concreto”, Revista ALCONPAT, 15 (1), pp. 1 – 18, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i1.703>

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.

² Instituto de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Veracruzana, Boca del Río-Veracruz, México.

Contribución de cada autor

En este trabajo el autor R. García-Cedeño contribuyó con la experimentación y recolección de datos (100%) asesorado por los autores G. Fajardo-San Miguel (25%), J. Álvarez-Pérez (25%), M. Mesa-Lavista (25%), y J. H. Chávez-Gómez (25%). Los autores J. Álvarez-Pérez, M. Mesa-Lavista, G. Fajardo-San Miguel y F. A. Carpio-Santamaría contribuyeron en un 25% cada uno en el planteamiento metodológico general. Los autores M. Mesa-Lavista (16%), G. Fajardo-San Miguel (16%), J. Álvarez-Pérez (20%), R. González-Alcorta (16%), F. A. Carpio-Santamaría (16%) y J. H. Chávez-Gómez (16%) contribuyeron al análisis y discusión de los resultados. Todos los autores participaron de manera equitativa en la escritura y conclusiones generales del trabajo.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2025) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2025 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2025.

Influence of the mortar placement method on the uniaxial compression behavior of hollow concrete blocks.

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate how capping placement affects the uniaxial compressive behavior of hollow concrete blocks. Two placement methods were analyzed: 1) on the gross area and 2) on the lateral faces. An experimental program and statistical analysis were conducted to identify significant differences between the methods. The results showed that blocks capped on the lateral faces exhibited a 12.5% decrease in load capacity and an 11.33% decrease in stiffness compared to those capped on the gross area. This study focuses on hollow concrete blocks and concludes that using a variable denominator leads to a misinterpretation of their strength.

Keywords: masonry; hollow concrete blocks; mortar placement.

Influência do método de aplicação da argamassa no comportamento à compressão uniaxial de blocos vazados de concreto.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar como a colocação do capeamento influencia o comportamento à compressão uniaxial de blocos de concreto vazados. Foram analisados dois métodos de colocação: 1) sobre a área bruta e 2) nas faces laterais. Foi realizado um programa experimental e uma análise estatística para identificar diferenças significativas entre os dois métodos. Os resultados mostraram que os blocos com capeamento nas faces laterais apresentaram uma redução de 12,5% na capacidade de carga e de 11,33% na rigidez, em comparação com os capeados sobre a área bruta. Este estudo foca em blocos de concreto vazados e conclui que o uso de um denominador variável leva a uma interpretação errônea de sua resistência.

Palavras-chave: alvenaria; blocos ocios de concreto; colocação de argamassa.

Nomenclatura:

BHC: Bloque hueco de concreto u hormigón

f_{pb} : Esfuerzo a compresión sobre el área bruta del BHC (MPa)

f_{pn} : Esfuerzo a compresión sobre el área neta del BHC (MPa)

f_{pe} : Esfuerzo a compresión sobre el área lateral del BHC (MPa)

E_{pb} : Módulo de elasticidad sobre el área bruta del BHC (MPa)

E_{pn} : Módulo de elasticidad sobre el área neta del BHC (MPa)

E_{pe} : Módulo de elasticidad sobre el área lateral del BHC (MPa)

P_b : Carga a compresión sobre el área bruta del BHC (kN)

P_e : Carga a compresión sobre el área lateral del BHC (kN)

A_b ; A_n ; A_e : Área bruta; neta y lateral del BHC (cm²)

ε_c : Deformación correspondiente al esfuerzo máximo (mm/mm)

ε_u : Deformación última (mm/mm)

γ_c : Peso por unidad de volumen (kN/m³)

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

La mampostería es el material de construcción por excelencia en viviendas multifamiliares y obras sociales de pequeña y mediana altura. Este material está compuesto por unidades (ladrillos o bloques) y el mortero de pega. Dentro de las principales variables a tener en cuenta para garantizar un diseño (o revisión) que cumpla con la seguridad estructural, se encuentran la resistencia a la compresión uniaxial y el módulo de elasticidad de sus componentes. En este sentido, los procedimientos experimentales y analíticos para la obtención de estas propiedades mecánicas consideran las propiedades mecánicas de la unidad y el mortero. Dentro de la mampostería, las unidades (ladrillos o bloques) son quienes más aportan a la resistencia a la compresión del compuesto. Sin embargo, es conocido que existen otras variables que influyen en la resistencia a la compresión uniaxial y el modo de falla de la mampostería. Dentro de esas variables se encuentran: el tipo de unidad (bloque /ladrillo), la esbeltez, el espesor y la forma de colocación del mortero (Álvarez-Pérez, et. al., 2020; Mohamad, et. al, 2007; Caldeira, et. al., 2020; Zahra, et. al. 2021; Sarhat y Sherwood, 2014; Zahra y Dhanasekar, 2018). Este artículo se centra en la determinación de la resistencia a la compresión uniaxial y el módulo de elasticidad de los bloques huecos de concreto u hormigón (BHC) mediante el empleo de dos variantes de colocación del cabeceo. Estas dos variantes de colocación del cabeceo fueron (véase Figura 1a): 1) colocación del cabeceo sobre el área bruta del BHC (o conocido como *full shell*) y, 2) colocación del cabeceo sobre las caras laterales del BHC (o conocido como *face Shell bedding*).

El cabeceo del BHC sobre el área bruta es el procedimiento experimental establecido por las normativas (NMX-ONNCCE-C-036, 2010; TMS 602/ACI 530.1/ASCE 6, 2013) para la determinación de la resistencia y el módulo de elasticidad en el BHC, mientras que el cabeceo sobre el área lateral es establecido en las normativas (S304.1-04, 2004; AS 3700, 2018) para las unidades huecas.

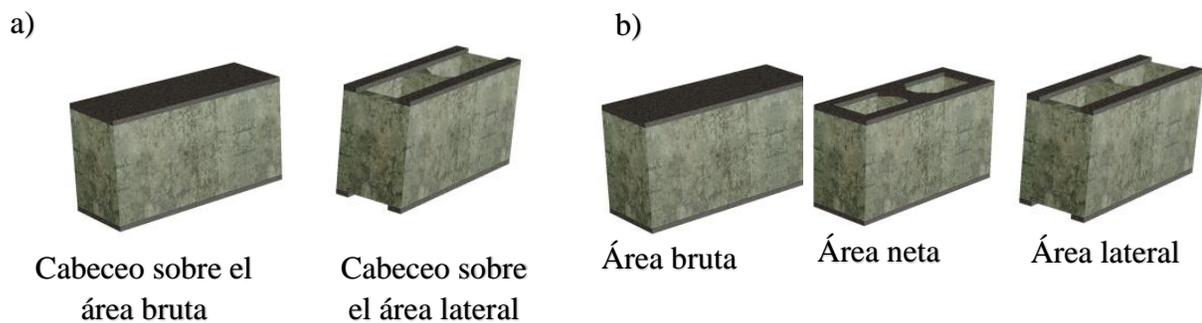


Figura 1. Representación de: a) Diferentes formas de cabeceos., b) Áreas involucradas en el cálculo de los esfuerzos. Fuente: elaboración propia.

Las normas mexicanas de diseño y construcción de mampostería (NTC-Mampostería, 2023; NMX-ONNCCE-C-464, 2010), establecen la colocación del mortero sobre el área neta del BHC (Figura 1a). Sin embargo; en la práctica profesional es común la colocación del mortero en las caras laterales del BHC (

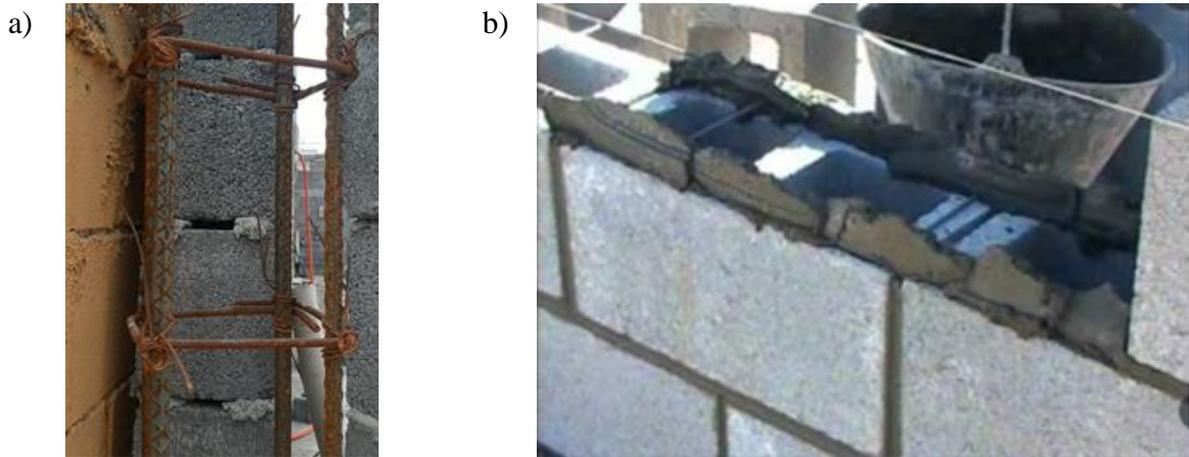


Figura 2), misma que se extiende a otras partes del mundo (Sarhat y Sherwood, 2014; Lima, 2021).

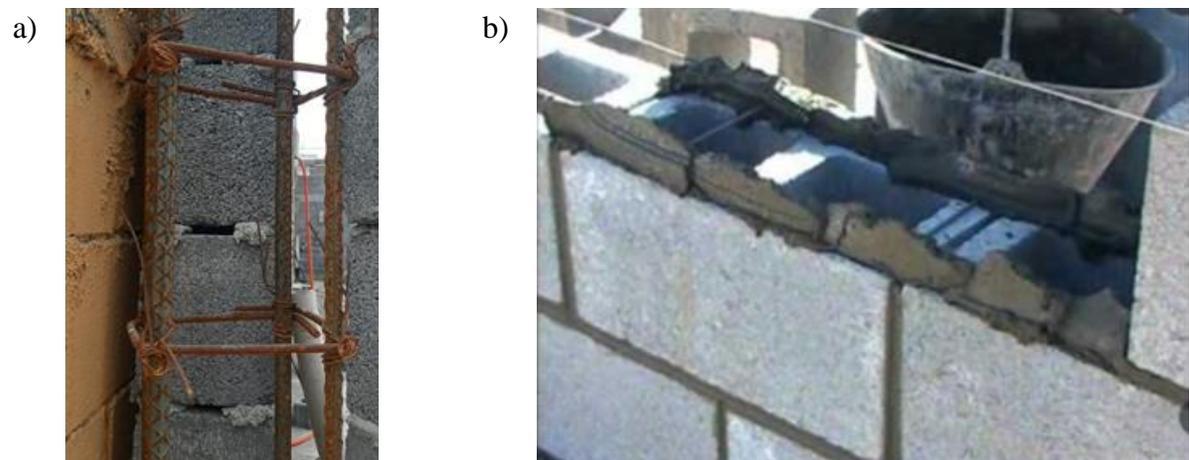
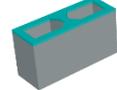
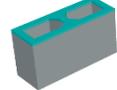
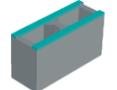


Figura 2. Ejemplos de colocación del mortero en las caras laterales en la mampostería de BHC en un: a) muro terminado y, b) muro en construcción. Fuente: elaboración propia.

En las normativas de diseño nacionales e internacionales se evidencian diferentes enfoques sobre la colocación del mortero en la mampostería (Tabla 1).

Tabla 1. Principales variables y expresiones que plantean algunos códigos de mampostería, para la determinación de la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de los BHC. Fuente: elaboración propia.

Variable	México (NMX-ONNCCE-C-036, 2013; NTC-Mampostería, 2023; NMX-ONNCCE-C-464, 2010; ASTM-C-1552, 2016)	U.S.A. (TMS 602/ACI 530.1/ASCE 6, 2013; ASTM-C-140-17A, 2017; ASTM-C-1552, 2016)	Canadá (S304.1-04, 2004)
Colocación del cabeceo sobre el BHC	Sobre el área bruta 	Sobre el área bruta 	Sobre el área lateral 
Aplicación del mortero para la colocación de la mampostería in situ.	Sobre el área neta 	Sobre el área neta 	Sobre las caras laterales 

Resistencia a la compresión del BHC	$f_{pb} = \frac{P_b}{A_b} \cdot FC$	$f_{pn} = \frac{P_b}{A_n} \cdot FC$	$f_{pe} = \frac{P_e}{A_e} \cdot FC$
Módulo de elasticidad del BHC	Recta secante al 40% del esfuerzo máximo.	Recta secante entre el 5% y el 35% del esfuerzo máximo.	Recta secante entre el 5% y el 33% del esfuerzo máximo.

FC: Factor de corrección por esbeltez. Considera la influencia de la esbeltez en la estimación de la resistencia a la compresión uniaxial del espécimen. La determinación del FC varía en función de los códigos de diseño.
f_{pb}: Esfuerzo a compresión sobre el área bruta del BHC (MPa)
f_{pn}: Esfuerzo a compresión sobre el área neta del BHC (MPa)
f_{pe}: Esfuerzo a compresión sobre el área lateral del BHC (MPa)
P_b: Carga a compresión sobre el área bruta del BHC (kN)
P_e: Carga a compresión sobre el área lateral del BHC (kN)
A_b; *A_n*; *A_e*: Área bruta; neta y lateral del BHC respectivamente (cm²)

Por ejemplo: en las normativas mexicanas (NMX-ONNCCE-C-036, 2013; NTC-Mampostería, 2023; NMX-ONNCCE-C-464, 2010) se establece que el mortero debe ser colocado en el área neta de la unidad; sin embargo, el cálculo de los esfuerzos normales de compresión, se realiza considerando el área bruta. Por otro lado, las normas de ensayo y diseño de los Estados Unidos de América (TMS 602/ACI 530.1/ASCE 6, 2013; ASTM-C-140-17A, 2017; ASTM-C-1552, 2016), establecen que el cálculo de los esfuerzos promedios de compresión, se realicen sobre el área neta del BHC.

En la literatura especializada revisada (Álvarez-Pérez, et. al., 2020; Mohamad, et. al, 2007; Caldeira, et. al., 2020; Zahra, et. al. 2021; Sarhat y Sherwood, 2014; Zahra y Dhanasekar, 2018; Mahamid y Westin, 2020; Thamboo, et al. 2013; Al-Amoudi y Alwathaf, 2014; Mohamad, 2017; Martins, et. al, 2018; Fortes, et. al., 2017; Barbosa, et. a., 2010), existe una escasa información sobre los efectos de la forma de colocación del cabeceo en la resistencia y el módulo de elasticidad de las unidades de mampostería. Los pocos estudios sobre la forma de colocación del mortero, en general, se han centrado en el impacto que este ocasiona a los prismas o pilas de mampostería de dos (Sarhat, 2014) y tres hiladas (Zahra, 2021). En ese sentido, solo los trabajos reportados por Tatheer Zahra et al. constituyen el principal antecedente encontrado en la literatura sobre el impacto de la colocación del cabeceo sobre las unidades de mampostería. Tatheer Zahra et al. (2021) estudiaron la influencia de la colocación del cabeceo en la resistencia a la compresión uniaxial de los BHC como parte de un estudio sobre las pilas de tres hiladas de mampostería de BHC. Ellos ensayaron bloques de concreto con dos agujeros de dimensiones nominales de 390 x190 x 90mm (longitud x altura x espesor) y con una relación de área neta y bruta de 0.74. Para tener en cuenta las dos variantes de colocación del mortero, emplearon un cabeceo con tiras de madera contrachapada de 6 mm de espesor para cubrir el área bruta y el área lateral de los BHC. Los resultados obtenidos mostraron que la carga aplicada sobre el área bruta del BHC resultó ser mayor que sobre el área lateral en un 28%, reduciéndose esa diferencia en términos de los esfuerzos debido a las diferencias entre las áreas (*A_b*, *A_n* y *A_e*), en un 19.87%.

De la revisión bibliográfica realizada (Álvarez-Pérez, et. al., 2020; Mohamad, et. al, 2007; Caldeira, et. al., 2020; Zahra, et. al. 2021; Sarhat y Sherwood, 2014; Zahra y Dhanasekar, 2018; Mahamid y Westin, 2020; Thamboo, et al. 2013; Al-Amoudi y Alwathaf, 2014; Mohamad, 2017; Martins, et. al, 2018; Fortes, et. al., 2017; Barbosa, et. a., 2010) se evidencian tres aspectos fundamentales, tales como:

- No se han reportado investigaciones asociadas al modo de falla del BHC y el medio bloque de concreto (MBHC) en función del tipo de colocación del mortero. Es conocido que para la elaboración de un muro de mampostería se necesita del BHC y del MBHC en las terminaciones laterales del muro. En ese sentido, se asume que las diferencias existentes en el comportamiento mecánico del MBHC y el BHC no son significativas.

- Los resultados reportados centran su atención en el comportamiento a compresión uniaxial de prismas o pilas de mampostería de dos y tres hiladas.
- No existe un consenso sobre cuál es el área del BHC (A_b, A_n y A_e) que debe emplearse para determinar la resistencia y el módulo de la elasticidad de las piezas de mampostería.

La resistencia a la compresión de los bloques huecos de concreto (BHC) es el principal parámetro mecánico utilizado como índice de control de calidad para las piezas de mampostería (S304.1-04, 2004; NTC-Mampostería, 2023; Eurocode, 2005). Además, la selección de una pieza de mampostería para uso estructural depende fundamentalmente de su resistencia a la compresión. Adicionalmente, es conocido que la resistencia a la compresión de la mampostería depende del mortero y de la pieza, siendo la pieza el factor más determinante (Eurocode, 2005; Barbosa y Hanai, 2005).

Por esta razón, el objetivo de esta investigación fue evaluar cómo la forma de colocación del cabeceo influye en los bloques huecos de concreto, analizando su impacto en la resistencia a compresión uniaxial y el módulo de elasticidad. La hipótesis plantea que la disposición del cabeceo afecta significativamente el comportamiento a compresión uniaxial de estos bloques.

2. PRUEBAS EXPERIMENTALES

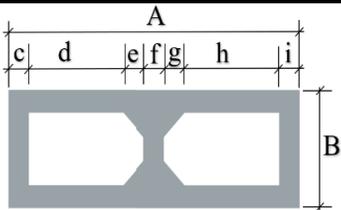
2.1. Materiales

Los BHC de este estudio fueron seleccionados de manera aleatoria procedentes de un único fabricante. Son bloques elaborados con cemento-arena de doble celda, con un tamaño máximo de arena gruesa de 3/8. Sus dimensiones nominales fueron de 390 mm x 190 mm x 150 mm (largo x altura x espesor), ver Tabla 2. Como parte del programa experimental se ensayaron 20 BHC a compresión uniaxial (Tabla 2) divididos en dos grupos: 10 BHCs con el cabeceo sobre el área bruta, según lo indicado en la referencia (NMX-ONNCCE-C-036, 2013), y 10 BHCs con el cabeceo colocado en las caras laterales.

Para garantizar una correcta distribución de la carga sobre los especímenes de prueba (BHC), se cabecearon todas las piezas empleando una combinación de azufre y cenizas volante. Para ello se empleó una relación 2:1 (azufre: ceniza), obteniéndose una resistencia a la compresión uniaxial promedio del material para el cabeceo de 45.6 MPa, garantizando los requisitos establecidos por la NMX-C-036 (2013). Los BHC estuvieron guardados en el laboratorio a una temperatura de $24^{\circ}\text{C} \pm 8^{\circ}\text{C}$ y con una humedad relativa inferior al 80%.

Tabla 2. Promedio de algunas propiedades físicas y geométricas de los BHC.

Fuente: elaboración propia.

			γ_c (N/m^3)	A_n (cm^2)	A_b (cm^2)	A_e (cm^2)	$\frac{A_n}{A_b}$	$\frac{A_e}{A_n}$	$\frac{A_e}{A_b}$
			19300	333.6	580	222.0	0.57	0.66	0.38
A (cm)	B (cm)	c (cm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	g (mm)	h (mm)	i (mm)	altura (mm)
39.50	14.70	27	100	56	31	57	100	27	19.50

2.2. Instrumentación

Para la ejecución de los ensayos se utilizó una máquina INSTRON DX 600 con una capacidad de carga de 60 toneladas. Los ensayos de los bloques fueron llevados a cabo bajo un control de desplazamiento a una velocidad de $0.006 \text{ mm}/\text{s}$. Con el objetivo de garantizar una correcta

nivelación y distribución de la carga, se colocó un asiento esférico y placas de acero de 5 cm de espesor (Figura 3a). Se colocaron galgas extensiométricas (Strain gauges) y dos transductores de desplazamiento (LVDT) para la obtención de las curvas esfuerzo-deformación de los especímenes. Las galgas extensiométricas fueron colocadas una en posición vertical y la otra en posición horizontal. De esta manera se obtuvieron las deformaciones horizontales y transversales para la posterior determinación de la relación de Poisson (Figura 3b).

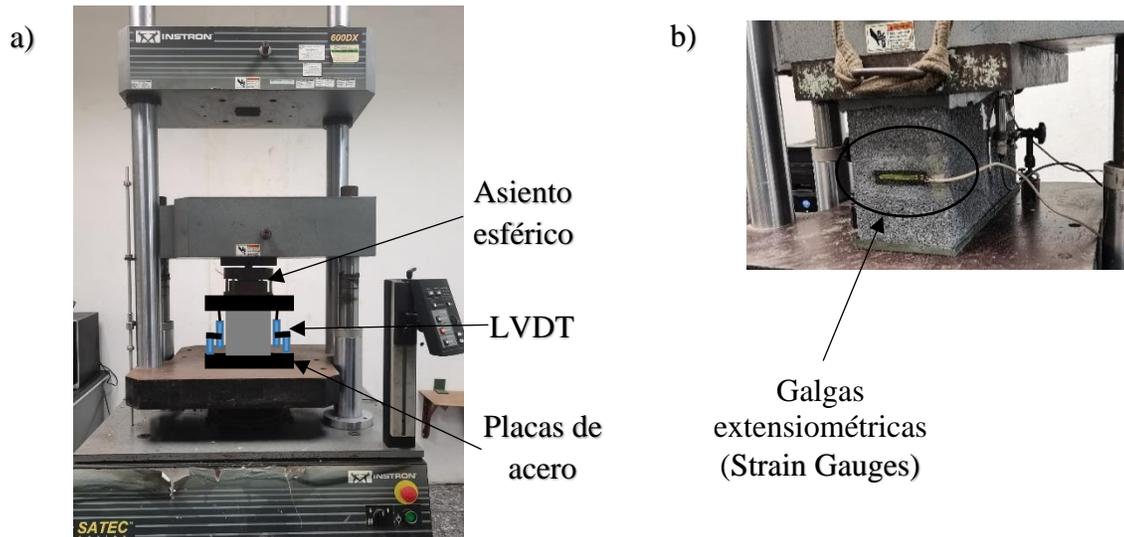
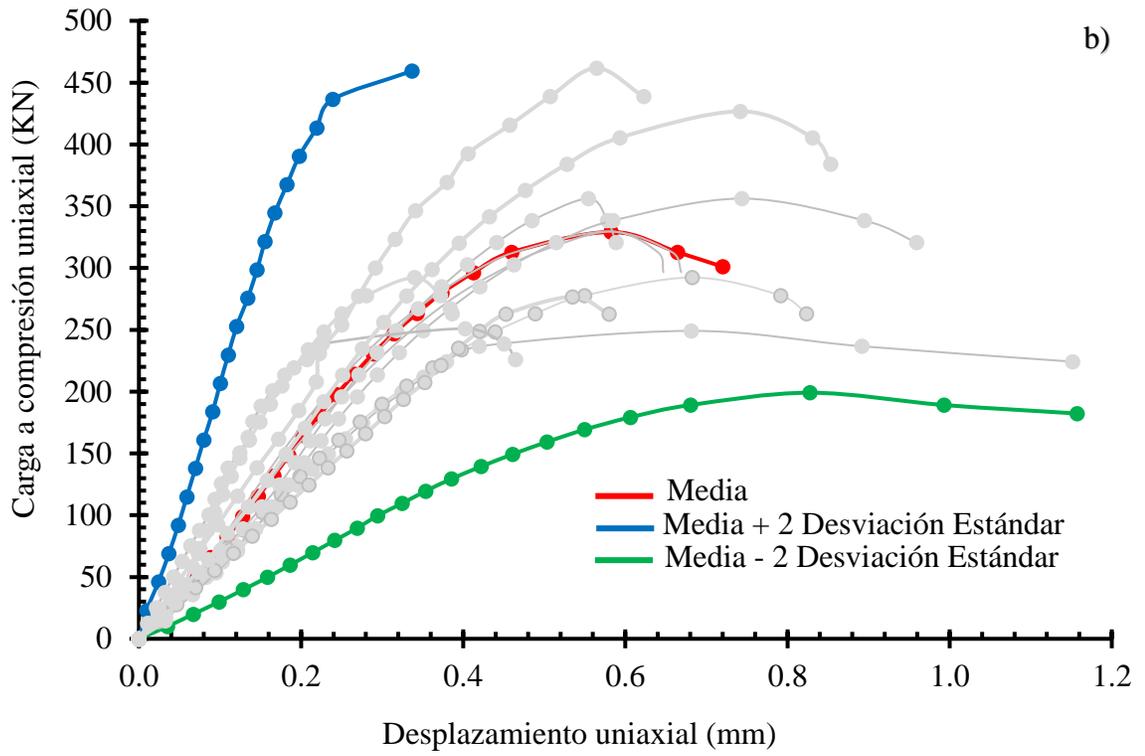
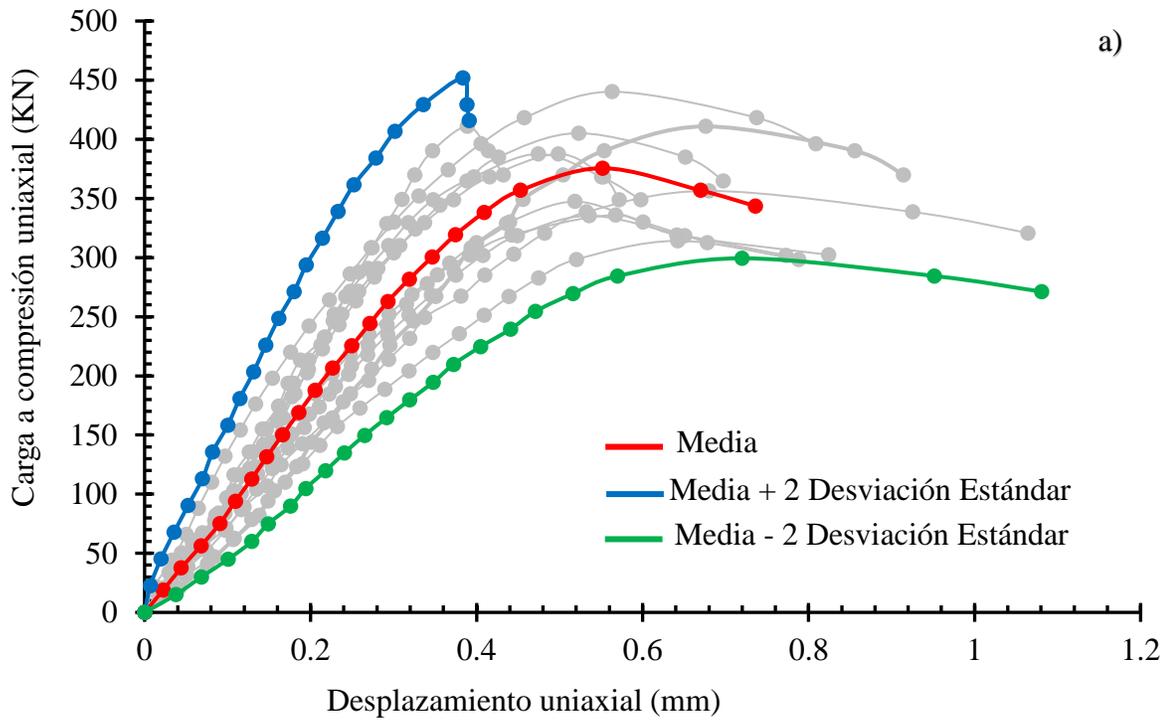


Figura 3. a) Instrumentación de la prueba de compresión uniaxial de los BHC; b) ubicación de las galgas extensiométricas (strain gauges) en los BHC. Fuente: elaboración propia.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1. Bloques huecos de concreto u hormigón

En la Figura 4 se muestran los resultados experimentales promedio de las curvas carga vs desplazamiento para ambas formas de colocación del cabeceo.



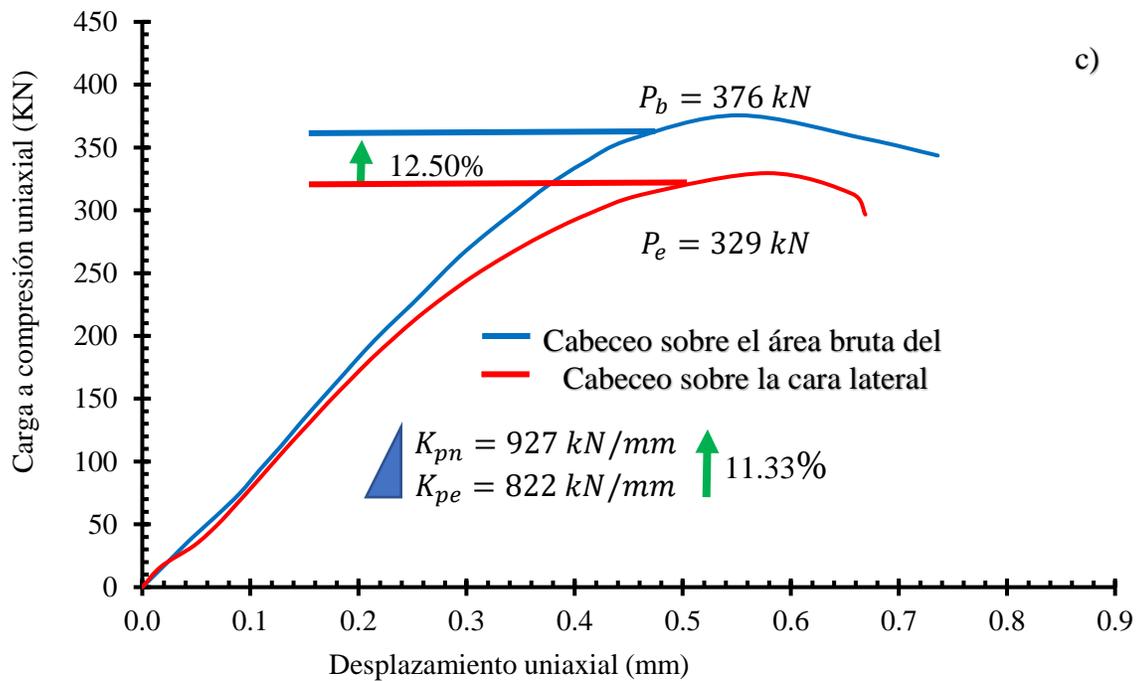


Figura 4. Curvas de carga vs desplazamiento de los BHC para ambas formas de colocación del cabeceo: a) Colocación del cabeceo sobre el área bruta, b) colocación del cabeceo sobre el área lateral y, c) promedios experimentales y diferencias relativas. Fuente: elaboración propia.

Las principales variables que caracterizan a la curva carga vs desplazamiento (P , K , δ_c y δ_u) son presentadas en la Figura 4 y en la Tabla 3. Para calcular las diferencias relativas entre las variables se empleó como patrón de referencia, los valores obtenidos en la variante de colocación del cabeceo sobre el área bruta, debido a que este constituye el procedimiento establecido por la normativa mexicana (NMX-ONNCCE-C-036, 2013).

Como se muestra en la Tabla 3, cuando la carga se aplica sobre el BHC con el cabeceo sobre el área bruta, aumenta la capacidad de carga y la rigidez (K) en un 12.5% y un 11.33%, respectivamente, en comparación con la variante de colocación sobre el área lateral.

Tabla 3. Resultados promedios experimentales de los BHC. Fuente: elaboración propia.

Variables de la curva carga vs desplazamiento	Aplicación de la carga sobre el cabeceo en el área bruta	Aplicación de la carga sobre el cabeceo en el área lateral	Dr_b (%)
Carga máxima P (kN) (COV)	376 (0.1)	329 (0.12)	+12.50
Rigidez del BHC K (kN/mm) (COV)	927 (0.19)	822 (0.10)	+11.33
Desplazamiento en la carga máxima δ_c (mm) (COV)	0.55 (0.15)	0.64 (0.10)	-16.36
Desplazamiento máximo δ_u (mm) (COV)	0.79 (0.23)	0.80 (0.20)	-1.27
$\mu = \delta_u / \delta_c$	1.44	1.25	+13.19

K : Pendiente de la recta secante al 40% de la carga máxima;
 Dr_b (%): Diferencias relativas empleando como patrón el cabeceo sobre el área bruta
 COV: Coeficiente de variación (desviación típica o estándar /media aritmética)
 μ : Índice de Ductilidad

Los resultados experimentales expuestos (Tabla 3 y Figura 4) indican que la colocación del cabeceo sobre el área lateral del BHC, supone una disminución de las principales variables que caracterizan a la curva experimental carga vs desplazamiento.

Tabla 4. Empleo de diferentes medidas de los esfuerzos últimos promedio (resistencia). Fuente: elaboración propia.

Esfuerzos		1	2	3	4	5
		$f_{pb}(MPa)$ (COV)	$f_{pn}(MPa)$ (COV)	$f_{pe}(MPa)$ (COV)	$f_{pn}(MPa)$	$f_{pe}(MPa)$
$P_b(kN)(COV)$	376 (0.1)	6.48	11.27	16.94	11.27	-
$P_e(kN)(COV)$	329 (0.12)	5.67	9.86	14.82	-	14.82
		$f_{pb} = \frac{P_b \cdot A_e}{A_b}$	$f_{pn} = \frac{P_b \cdot A_e}{A_n}$	$f_{pe} = \frac{P_b \cdot A_e}{A_e}$	$f_{pn} = \frac{P_b}{A_n}$	$f_{pe} = \frac{P_e}{A_e}$
$Dr_b(\%)$: +12.50					$Dr_n(\%)$: -31.50	
$P_b; P_e$: Carga aplicada sobre el cabeceo en el área bruta y lateral respectivamente COV: Coeficiente de variación (desviación típica o estándar /media aritmética) $Dr_b(\%)$: Diferencias relativas empleando como patrón P_b $Dr_n(\%)$: Diferencias relativas empleando como patrón f_{pn}						

Este resultado es similar al obtenido por Zahra et al. (2021) donde obtuvieron que los BHC con el mortero colocado en las caras laterales presentaron una disminución de la capacidad de carga de un 19.87%. Las diferencias obtenidas en ese estudio fueron superiores a las del presente estudio debido a que la geometría del BHC y el material de cabeceo fueron diferentes en ambas investigaciones.

Por otro lado, debido a las diferencias existentes entre las áreas del BHC (A_b, A_n y A_e) (Tabla 2), la estimación de los esfuerzos promedio varía notablemente (ver Tabla 4), generando un alto grado de incertidumbre en la fiabilidad del concepto de esfuerzo promedio. Ese esfuerzo promedio se emplea como medida de la resistencia y el módulo de Young en las unidades, los prismas y los muretes de la mampostería de BHC.

En las columnas 1-3 de la Tabla 4, se observa que las resistencias del BHC (f_{pb}, f_{pn} y f_{pe}), obtenidas con el mismo denominador común (A_b, A_n y A_e) disminuyen cuando el cabeceo se aplica en el área lateral del BHC. Además, se obtiene un valor de diferencias relativas de $Dr_b = 12.50 \%$, que coincide con el valor presentado en la primera fila de Tabla 3, basado en la carga máxima aplicada.

En ese sentido, las resistencias obtenidas son consistentes con los resultados experimentales presentados en la Tabla 3, donde el cabeceo aplicado sobre el área bruta mostró un aumento del 12.50% en la carga máxima alcanzada por el BHC en comparación con el cabeceo aplicado en el área lateral.

El problema surge al reportar los valores de resistencia obtenidos con un denominador variable ($A_n > A_e$), como se observa en las columnas 4 y 5 de la Tabla 4. En ese caso, la resistencia f_{pe} es mayor que f_{pn} , lo que podría llevar a una interpretación errónea de que, al aplicar el cabeceo en el área lateral, el BHC resiste más que cuando se aplica en el área neta, presentando una diferencia relativa de $Dr_n = 31.50 \%$. Este resultado contradice el valor experimental mostrado en la primera fila de la Tabla 3.

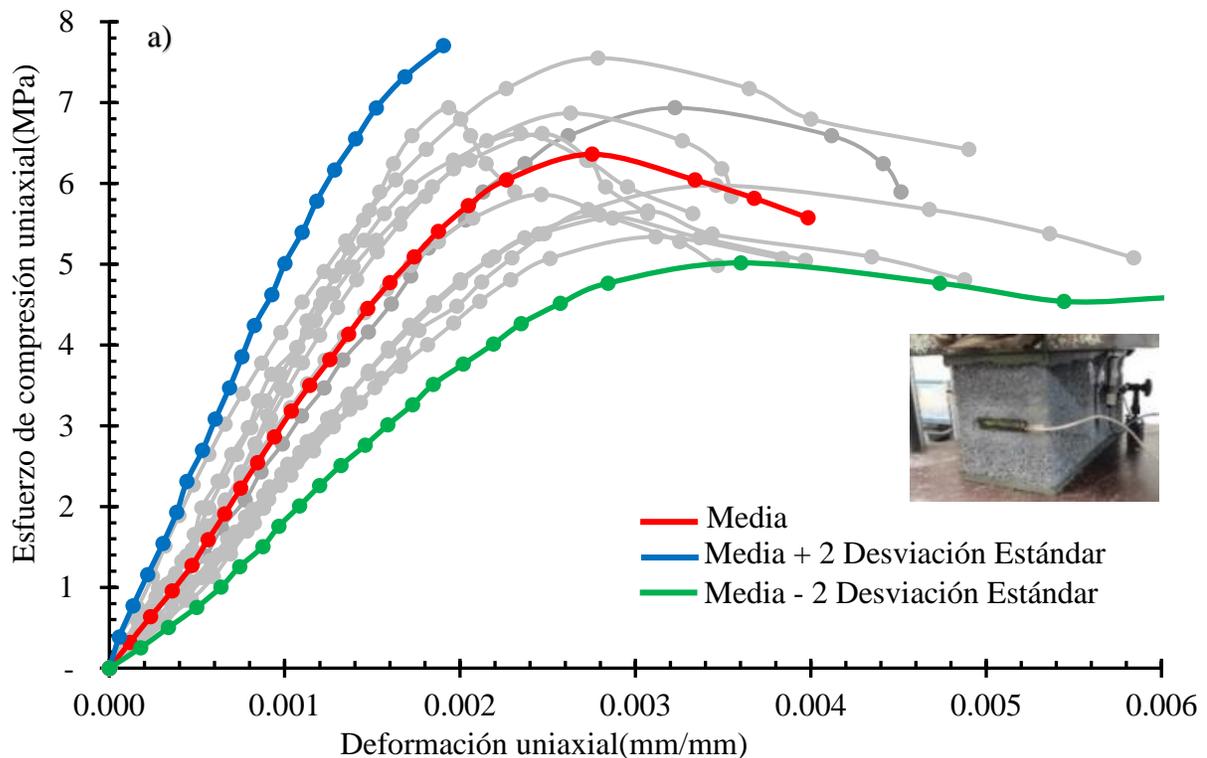
Recientemente, otros autores (Zahra, 2021) han presentado esta problemática tanto para bloques sólidos como huecos. En sus resultados experimentales (Zahra, 2021), la resistencia del BHC se midió como el cociente entre la carga (P_e) y el área lateral (A_e). Sin embargo, al aplicar el modelo

de daño plástico para el concreto, utilizaron los esfuerzos calculados sobre el área neta (f_{pn}), debido al aumento ficticio de la resistencia del BHC generado por la métrica basada en el área lateral ($f_{pe} = \frac{P_e}{A_e}$).

Las normativas mexicanas (NMX-ONNCCE-C-036, 2013; NTC-Mampostería, 2023) establecen que la resistencia del BHC se define como el cociente entre la carga (P_b) y el área bruta (A_b). Por otro lado, otras normativas (TMS 602/ACI 530.1/ASCE 6, 2013; ASTM-C-140-17A, 2017) proponen que la resistencia se calcule como el cociente entre la carga (P_b) y el área neta (A_n), argumentando que, al tratarse de una pieza hueca, el área neta es la región efectiva en el trabajo mecánico.

En la Figura 5 se muestran las curvas esfuerzo vs deformación según el criterio de medición de las normas mexicanas (NMX-ONNCCE-C-036, 2013; NTC-Mampostería, 2023) y con el intervalo de confianza de dos veces la desviación típica o estándar. Adicionalmente, en la Tabla 5 se muestran los principales parámetros mecánicos deformacionales promedio, que fueron extraídos de las curvas esfuerzo vs deformación.

Todos los módulos de elasticidad fueron calculados según una recta tangente al 40% del esfuerzo máximo, siguiendo lo establecido en las normativas mexicanas (NMX-ONNCCE-C-036, 2013; NTC-Mampostería, 2023). De manera análoga en la estimación de la resistencia del BHC, en la Tabla 5 se muestra como el empleo del área lateral en la medida del esfuerzo promedio, ocasiona un aumento en más de un 50% de la estimación del módulo de Young del BHC. Sin embargo, las deformaciones (ϵ_{cb} , ϵ_{ul}) no presentaron diferencias significativas para ambas formas de colocación del cabeceo.



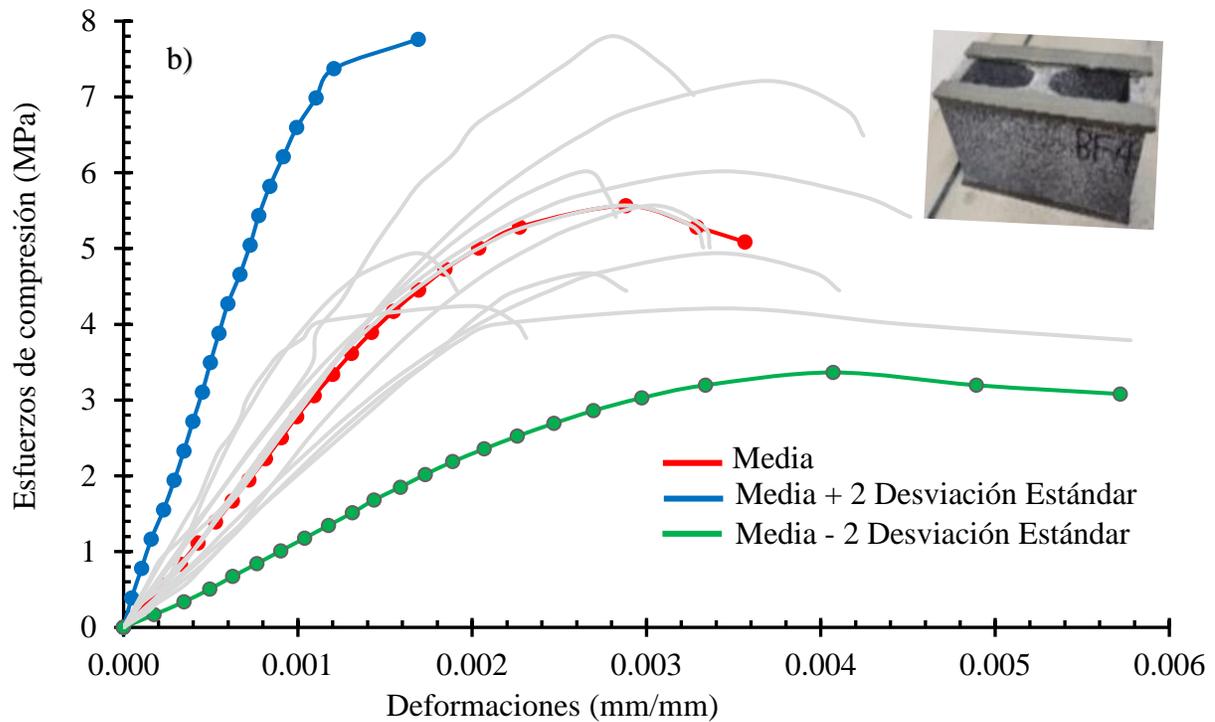


Figura 5. Curvas esfuerzo vs deformación del BHC a) según las normativas mexicana (NMX-ONNCCE-C-036, 2013; NTC-Mampostería, 2023) sobre el área bruta del BHC, b) sobre el área lateral del BHC. Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Principales parámetros mecánicos deformacionales promedio extraídos de las curvas esfuerzo vs deformación de los BHC a compresión uniaxial. Fuente: elaboración propia.

	Cabeceo en área bruta			Cabeceo en área lateral			Extremo de la variable del Módulo de Young	
	$E_{pb}(MPa)$ (COV)	$\epsilon_{cb}(\frac{mm}{mm})$ (COV)	$\epsilon_{ul}(\frac{mm}{mm})$ (COV)	$E_{pe}(MPa)$ (COV)	$\epsilon_{cb}(\frac{mm}{mm})$ (COV)	$\epsilon_{ul}(\frac{mm}{mm})$ (COV)	$E_{pe}(MPa)$ (COV)	$E_{pb}(MPa)$ (COV)
Sobre el área bruta	3099 (0.22)	0.0027 (0.15)	0.0039 (0.23)	-	-	-	-	3099 (0.22)
Sobre el área lateral	2680 (0.24)	0.0029 (0.16)	0.0036 (0.28)	6844 (0.16)	0.0031 (0.10)	0.0039 (0.24)	6844 (0.16)	-
$Dr_b(\%)$	13.52	-7.41	7.69					$Dr_{E_{pe}}(\%) = 54.72$
$Dr_b(\%)$: Diferencias relativas empleando como patrón el área bruta								
$Dr_{E_{pe}}(\%)$: Diferencias relativas entre los módulos de Young extremos, tomando como referencia el área lateral								

En cuanto a los modos de falla de los BHC, los resultados experimentales arrojaron que en la variante de colocación del cabeceo sobre el área bruta, el proceso de agrietamiento comenzó a desarrollarse en las esquinas de los BHC, Figura 6a. Posteriormente, las grietas comenzaron a desarrollarse en dirección diagonal hacia el centro de las caras del BHC (Figura 6b y Figura 6c), provocando el desprendimiento de segmentos del material, Figura 6d. Ninguno de los especímenes

presentó una falla explosiva, sino que fueron acompañadas de la prolongación de las grietas diagonales iniciadas en los extremos del bloque. Este modo de falla es típico de los BHC de carácter comercial, y está asociado a una combinación de factores tales como: efecto de confinamiento que imponen las placas de acero en los extremos del BHC (Figura 3), la baja relación de esbelteza del BHC, la baja resistencia a la tensión del material y a la distribución de los esfuerzos principales (Barbosa y Hanai, 2005; García, et al., 2013).



Figura 6. Etapas del proceso de agrietamiento en los BHC con el empleo del cabeceo sobre el área bruta: a) Comienza el agrietamiento en las esquinas del bloque, b y c) desarrollo de las grietas hacia el centro de las caras del bloque, d) desprendimiento de segmentos del material.

Fuente: elaboración propia.

En la variante de colocación del cabeceo sobre las caras laterales, la geometría localizada del cabeceo, originó altas concentraciones de esfuerzos en las caras laterales del BHC (Figura 7a) originando el inicio del proceso de agrietamiento. Posteriormente, las grietas empezaron a desarrollarse con un mayor predominio sobre las paredes más alargadas de los BHC (longitud de 395 mm) debido a la concentración de los esfuerzos sobre las caras laterales. La falla de los BHC abarcó dos zonas diferentes interconectadas entre sí. La primera zona se localizó en las paredes más alargadas y se originó por los efectos de pérdida de la estabilidad local, debido a los efectos de la concentración de los esfuerzos (Figura 7b). La segunda zona se desarrolló después, con otro proceso de agrietamiento originado en las paredes cortas (espesor de 147 mm) debido a la baja resistencia a la tensión del BHC (Figura 7c).

Las investigaciones de otros autores demuestran que con el aumento en la altura de los especímenes (pilas de varias hiladas), el proceso de agrietamiento en la segunda zona adquiere mayor relevancia (Figura 7c) (Zahra, 2021; Nalon, et al., 2022; Henrique Nalon, et. al., 2020).

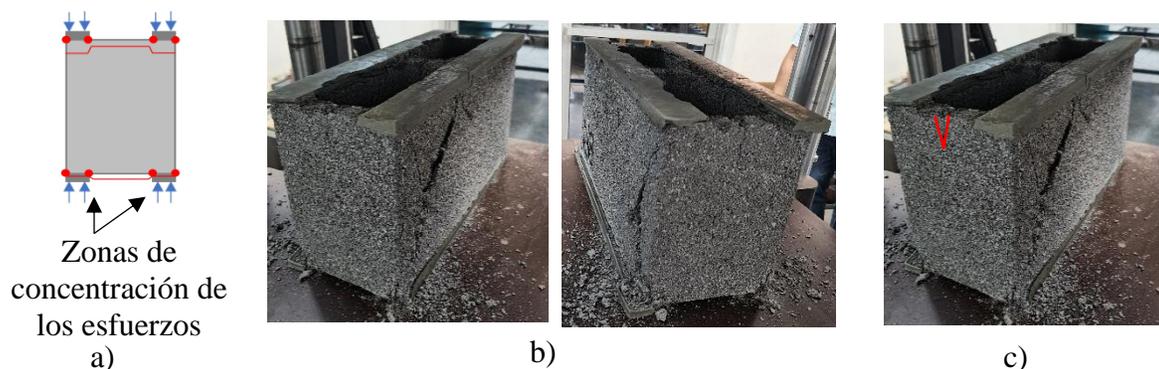


Figura 7. Etapas del proceso de agrietamiento en los BHC con el empleo del cabeceo sobre el área lateral: a) Esquema de la concentración de esfuerzo, b) zona 1, desarrollo de las grietas en la cara larga del bloque, c) zona 2, desarrollo de las grietas en la cara corta del bloque. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 8 se presenta un resumen gráfico comparativo de las curvas medias experimentales según las tres formas más empleadas en la literatura para la estimación de los esfuerzos promedio en los BHC (S304.1-04, 2004; ASTM-C-140-17A, 2017), tales como: esfuerzos promedio sobre el área bruta ($f_{pb} = \frac{P_b}{A_b}$), esfuerzos promedio sobre el área neta ($f_{pn} = \frac{P_b}{A_n}$) y los esfuerzos promedio sobre el área lateral ($f_{pe} = \frac{P_e}{A_e}$). En la misma se puede observar como la estimación de la resistencia y el módulo de Young del BHC pueden variar en más de un 50%.

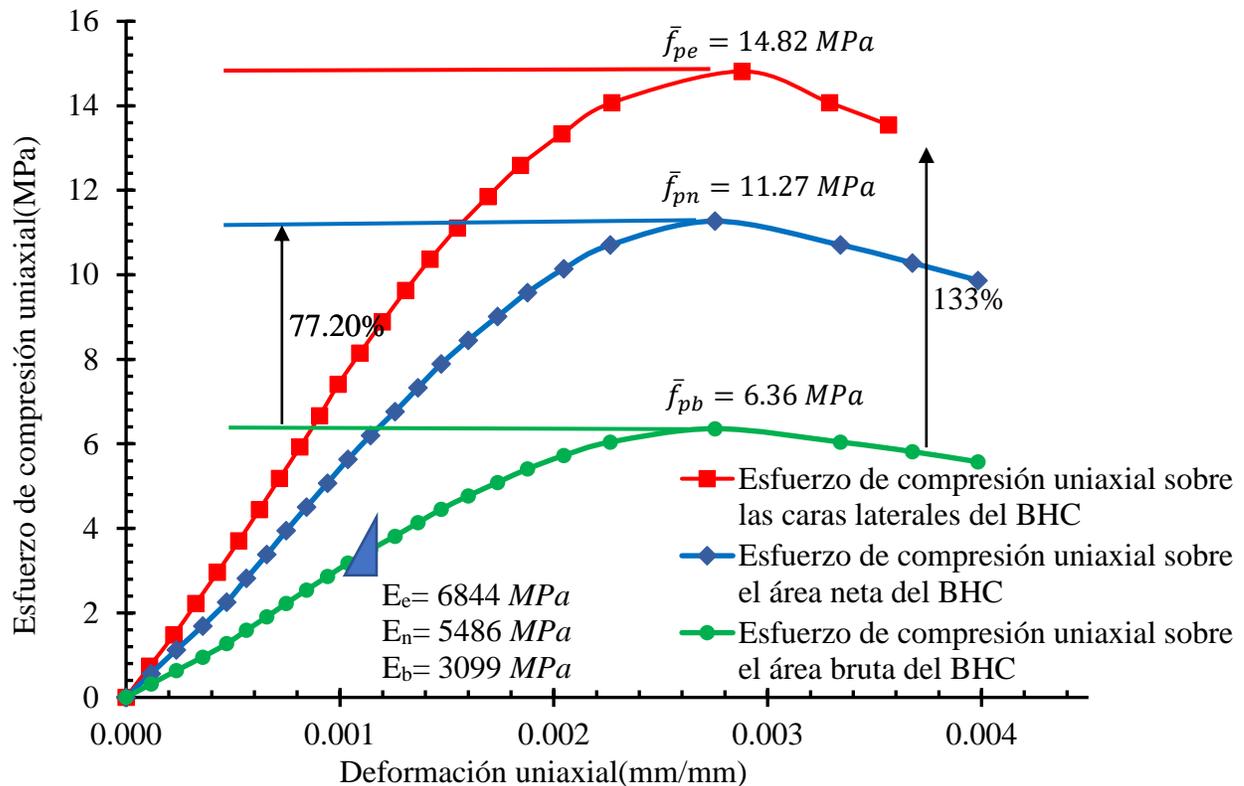


Figura 8. Curvas medias experimentales de los gráficos esfuerzo vs deformación obtenidas para ambas formas de colocación del cabeceo. Fuente: elaboración propia.

4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En esta sección se llevó a cabo un análisis estadístico de las diferencias significativas existentes entre los principales parámetros mecánicos promedios extraídos de las curvas esfuerzo vs deformación (Figura 9).

En primer lugar, se llevaron a cabo las pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk con el objetivo de probar que las muestras se ajustan a una distribución normal. En la Tabla 6 se muestra que el valor de significación (sig.) de las muestras analizadas (12 variables aleatorias) fue mayor que el nivel de significación asumido ($\alpha = 0.05$), lo que indica que las variables aleatorias se ajustan a una distribución normal (Montgomery y Runger, 2003; SPSS, 2017).

Posteriormente se realizaron las pruebas de homogeneidad de varianzas (Levene) con el objetivo de determinar cuál prueba de hipótesis (paramétrica o no paramétrica) es mejor para la determinación de las diferencias estadísticamente significativas. En ese sentido, la Tabla 7 muestra que todas las pruebas de hipótesis llevadas a cabo fueron paramétricas (Student-t), con lo cual se aumenta la potencia de la medición de las diferencias estadísticamente significativas.

El análisis estadístico indicó que las deformaciones correspondientes al esfuerzo máximo, así como las deformaciones últimas para ambas variantes de colocación del cabeceo, no suponen diferencias estadísticamente significativas (Tabla 7, Figura 9). Adicionalmente, los parámetros mecánicos tales como las resistencias a la compresión uniaxial (f_{pb}, f_{pn}, f_{pe}) y los módulos de Young (E_{pb}, E_{pn}, E_{pe}), fueron los parámetros que arrojaron diferencias estadísticamente significativas (Tabla 7).

Tabla 6. Pruebas de normalidad. Fuente: elaboración propia.

Variables aleatorias	N	Media	COV (%)	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
				Estadístico	gl.	Sig.	Estadístico	gl.	Sig.
f_{pn}	10	11.50	0.10	0.202	6	0.200*	0.933	6	.604
f_{pe}	10	14.90	0.12	0.268	6	0.200*	0.878	6	.261
f_{pb}	10	6.50	0.10	0.250	6	0.200*	0.895	6	.347
E_{pn}	10	5486	0.21	0.229	6	0.200*	0.873	6	.238
E_{pe}	10	6844	0.16	0.196	6	0.200*	0.957	6	.800
E_{pb}	10	3099	0.22	0.212	6	0.200*	0.883	6	.282
ε_{cn}	10	0.0027	0.15	0.180	6	0.200*	0.959	6	.814
ε_{ce}	10	0.0031	0.10	0.307	6	0.080	0.827	6	.102
ε_{cb}	10	0.0027	0.10	0.180	6	0.200*	0.959	6	.814
ε_{un}	10	0.0039	0.23	0.226	6	0.200*	0.938	6	.644
ε_{ue}	10	0.0039	0.24	0.206	6	0.200*	0.936	6	.627
ε_{ub}	10	0.0031	0.28	0.226	6	0.200*	0.938	6	.644

a. Corrección de la significación de Lilliefors
 *. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

Tabla 7 Resultados de las pruebas de hipótesis paramétricas (t-Student). Fuente: elaboración propia.

Variables aleatorias	Prueba de Levene p-value	Comparación de medias Sig.(bilateral)	Diferencias estadísticamente
Parámetros mecánicos sobre el área bruta vs neta			
f_{pb} y f_{pn}	0.051	Student-t test ($P = 0.000$)	significativo
E_{pb} y E_{pn}	0.078	Student-t test ($P = 0.000$)	significativo
ε_{cb} y ε_{cn}	1.000	Student-t test ($P = 1.000$)	No significativo
ε_{ub} y ε_{un}	1.000	Student-t test ($P = 1.000$)	No significativo
Parámetros mecánicos sobre el área bruta vs área lateral			
f_{pb} y f_{pe}	0.087	Student-t test ($P = 0.000$)	significativo
E_{pb} y E_{pe}	0.370	Student-t test ($P = 0.005$)	significativo
ε_{cb} y ε_{ce}	0.248	Student-t test ($P = 0.284$)	No significativo
ε_{ub} y ε_{ue}	0.736	Student-t test ($P = 0.629$)	No significativo

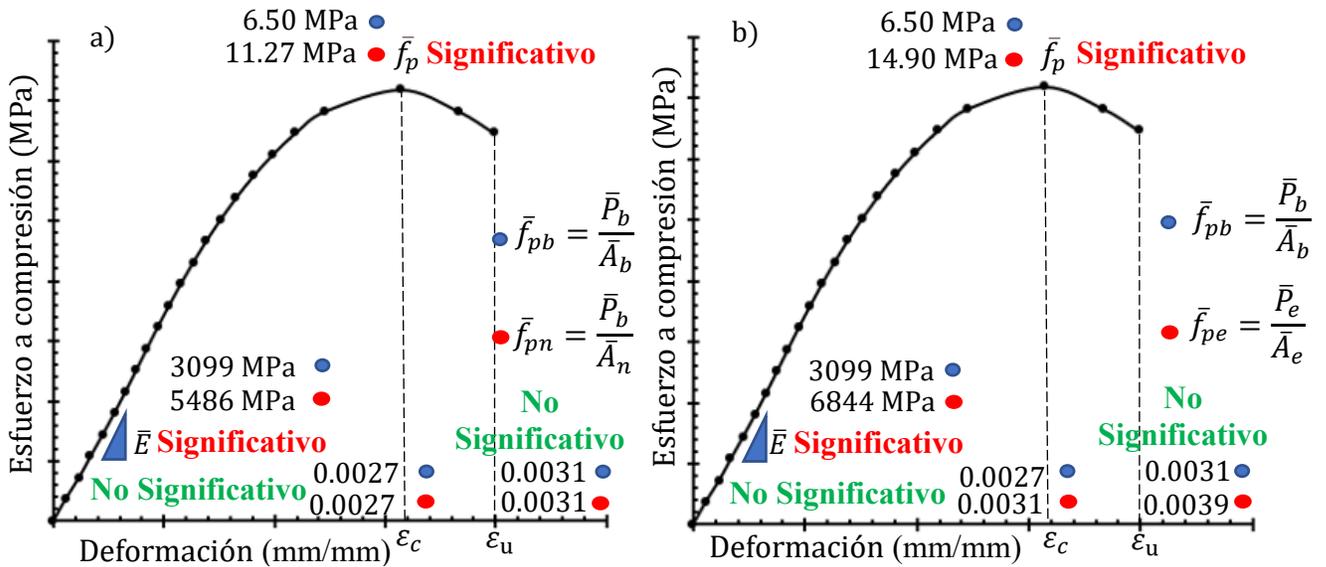


Figura 9. Diferencias estadísticamente significativas de los parámetros mecánicos de la curva esfuerzo vs deformación de los BHC: a) para área bruta vs área neta y, b) para área bruta vs área lateral. Fuente: elaboración propia

5. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones del estudio, las cuales responden al objetivo general y validan la hipótesis planteada:

- La forma de colocación del cabeceo influyó notablemente en el comportamiento a compresión uniaxial de los BHC. La colocación del cabeceo sobre el área lateral del BHC provocó una disminución estadísticamente significativa de la capacidad de carga y de la rigidez del BHC.
- Debido a las diferencias existentes entre las áreas (A_b , A_n y A_e) derivadas de la geometría del BHC, el cálculo de los esfuerzos uniaxiales promedio varía significativamente generando una alta incertidumbre en la fiabilidad del concepto de esfuerzo promedio como medida de la resistencia y el módulo de elasticidad de las unidades de mampostería. Las resistencias del BHC (f_{pb} , f_{pn} y f_{pe}), calculadas con un mismo denominador común (A_b , A_n y A_e) disminuyen cuando el cabeceo se aplica en el área lateral del BHC, mostrando coherencia con los resultados experimentales presentados en términos de carga vs desplazamientos. Sin embargo, la comparación de las resistencias calculadas utilizando un denominador variable ($A_n > A_e$), conduce a una interpretación errónea de la resistencia del BHC.
- Los procesos de agrietamiento para ambas formas de colocación del cabeceo originaron mecanismos de fallas diferentes, obteniéndose una mayor ductilidad en el BHC con la colocación del cabeceo sobre el área bruta.

6. EXPRESIONES DE GRATITUD

El primer autor agradece al CONAHCYT por la beca al doctorando, al Departamento de Ingeniería Estructural y Peritajes y la subdirección de Postgrado de la Facultad de Ingeniería Civil de la UANL.

Los autores agradecen también al programa PAICYT que ofrece la UANL.

7. REFERENCIAS

- Álvarez-Pérez, J., Chávez-Gómez, J. H., Terán-Torres, B. T., Mesa-Lavista, M., Balandrano-Vázquez, R. (2020), *Multifactorial behavior of the elastic modulus and compressive strength in masonry prisms of hollow concrete blocks*. Construction and Building Materials, 241: p. 18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118002>
- Al-Amoudi, M. A. A., Alwathaf, A. H. (2014), *The Behavior of Hollow Concrete Block Masonry under Axial Compression*. Journal of Engineering Sciences, 3(2): p. 32-53. ISSN 2312-9999.
- American Society for Testing and Materials International (2017), *ASTM-C-140-17A, Standard test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units*. p. 26.
- American Society for Testing and Materials International (2016), *ASTM-C-1552, Standard Practice for Capping Concrete Masonry Units, Related Units and Masonry Prisms for Compression Testing*.
- Australian Standard (2018), *AS 3700:2018, Masonry Structures*, Standards Australian Limited 2018.
- Barbosa, C. S., Hanai, J. B. (2005), *Strength and deformability of hollow concrete blocks and their correlations with mechanical properties of constituent material*, in 10th Canadian Masonry Symposium. Banff, Alberta, June p. 8-12.
- 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): p. 45-74.
- Barbosa, C. S., Lourenço, P. B., Hanai, J. B. (2010), *On the compressive strength prediction for concrete masonry prisms*. Materials and Structures, 43(3): p. 331-344. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-009-9492-0>
- Caldeira, F. E., et al. (2020), *Influence of joint thickness and strength of mortars on the compressive behavior of prisms made of normal and high-strength concrete blocks*. Construction and Building Materials, 234: p. 117419. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117419>
- Canadian Standards Association (CSA) (2004), *S304.1-04 - Design of Masonry Structures*, p. 139, Published in December, Canada, ISBN 1-55397-402-6. <https://es.slideshare.net/slideshow/csa-masonry-s304104/238765983>
- Eurocode (2005), *EN 1996-1 and 2: 2005, Eurocode 6-Design of masonry structures. Part 1-1: General rules for buildings—reinforced and unreinforced masonry, Design of masonry structures. Design Considerations, Selection of Materials and Execution of Masonry*. European Committee for Standardisation CEN, Brussels, 2006.
- Fortes, E. S., Parsekian, G. A., Camacho, J. S. (2017), *Compressive strength of masonry constructed with high strength concrete blocks*. Ibracon structures and materials journal, 10(6): p. 1273-1319. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952017000600008>
- García, J. M., Bonett, R. L., Ledezma, C. (2013), *Analytical Model for Compression Behavior of Hollow Concrete Blocks (In Spanish)*. Revista de la construcción, 12(3): p. 76-82. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-915X2013000300009>
- Henrique Nalon, G., Rezende Santos, C. F., Pedroti, L. G., Lopes Ribeiro, J. C., Veríssimo, G. S., Ferreira, F. A. (2020), *Strength and failure mechanisms of masonry prisms under compression, flexure and shear: Components' mechanical properties as design constraints*. Journal of Building Engineering, 28: p. 101038. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101038>
- Lima, T. E. S., Azevedo, A. R. G., Marvila, M. T., Zanelato, E. B., Paes, A. L. C., Alexandre, J., Monteiro, S. N. (2021), *Study of Face Shell Bedding Concrete Blocks Prisms with Different Laying Mortar Strength*. in Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2021. Cham: Springer

International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65493-1_52

Mahamid, M., Westin, N. (2020), *Reevaluation of f'_m for the Unit-Strength Method with Application to Lightweight Concrete Block Masonry and Face Shell-Bedded Mortar Joints*. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 25(3): p. 10. [https://10.1061/\(asce\)sc.1943-5576.0000494](https://10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000494)

Martins, R. O. G., Nalon, G. H., Sant'Ana Alvarenga, R. C. S., Pedroti, L. G., Lopes Ribeiro, J. C. (2018), *Influence of blocks and grout on compressive strength and stiffness of concrete masonry prisms*. Construction and Building Materials, 182: p. 233-241. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.091>

Masonry Standards Joint Committee (MSJC) (2013), *Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures and Companion Commentaries (TMS 602/ACI 530.1/ASCE 6)*. Produced in the United States of America.

NTC-Mampostería (2023), *Norma técnica complementaria para diseño y construcción de estructuras de mampostería*. p. 119.

Mohamad, G., Fonseca, F. S., Vermeltfoort, T., Martens, D. R. W., Lourenço, P. B. (2017), *Strength, behavior, and failure mode of hollow concrete masonry constructed with mortars of different strengths*. Construction and Building Materials, 134: p. 489-496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.112>

Montgomery, D. C., Runger, G. C. (2003), *Applied Statistics and Probability for Engineers*, Third Edition: Printed in the United States of America.

Mohamad, G., Lourenço, P. B., Roman, H. R. (2007), *Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: Review and prospects*. Cement and Concrete Composites, 29(3): p. 181-192. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.003>

Nalon, G. H., Lopes Ribeiro, J. C., Pedroti, L. G., da Silva, R. M., Duarte de Araújo, E. N., Santos, R. F., Soares de Lima, G. E. (2022), *Review of recent progress on the compressive behavior of masonry prisms*. Construction and Building Materials, 320: p. 126181. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126181>

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación – ONNCCE (2010), *NMX-ONNCCE-C-464, Determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de cortante de muretes, así como determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o de concreto. Métodos de ensayo*. p. 24.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación – ONNCCE (2013), *NMX-ONNCCE-C-036, Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines– método de ensayo*. p. 10.

Sarhat, S. R., Sherwood, E. G. (2014), *The prediction of compressive strength of ungrouted hollow concrete block masonry*. Construction and Building Materials, 58: p. 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.025>

SPSS (2017), *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 25.0.*, N.Y. Armonk, Editor.

Thamboo, J. A., Dhanasekar, M., Yan, C. (2013), *Effects of Joint Thickness, Adhesion and Web Shells to the Face Shell Bedded Concrete Masonry Loaded in Compression*. Australian Journal of Structural Engineering, 14(3): p. 291-302. <https://10.7158/13287982.2013.11465139>.

Zahra, T., Thamboo, J., Asad, M. (2021), *Compressive strength and deformation characteristics of concrete block masonry made with different mortars, blocks and mortar beddings types*. Journal of Building Engineering, 38: p. 102213. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102213>

Zahra, T., Dhanasekar, M. (2018), *Characterisation and strategies for mitigation of the contact surface unevenness in dry-stack masonry*. Construction and Building Materials, 169: p. 612-628. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.002>