

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**INFLUENCIA DE LA FORMA DE COLOCACIÓN DEL MORTERO EN EL
COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN UNIAXIAL DE LA
MAMPOSTERÍA DE BLOQUES HUECOS DE CONCRETO.**

QUE PRESENTA

M.C. RAMÓN GARCÍA CEDEÑO

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**INFLUENCIA DE LA FORMA DE COLOCACIÓN DEL MORTERO EN EL
COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN UNIAxIAL DE LA
MAMPOSTERÍA DE BLOQUES HUECOS DE CONCRETO.**

presenta

M.C RAMÓN GARCÍA CEDEÑO
como requisito parcial para obtener el grado de
Doctor En Ingeniería Con Orientación En Materiales De Construcción

DIRECTOR

DR. GERARDO DEL JESÚS FAJARDO-SAN MIGUEL

CODIRECTOR

DR. JOSÉ ÁLVAREZ PÉREZ

San Nicolás de los Garza, Nuevo León

Junio 2024

**INFLUENCIA DE LA FORMA DE COLOCACIÓN DEL MORTERO EN EL
COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN UNIAXIAL DE LA
MAMPOSTERÍA DE BLOQUES HUECOS DE CONCRETO.**

Aprobación de Tesis

Dr. Gerardo Fajardo del Jesús San-Miguel
Presidente y Director de Tesis

Dr. José Álvarez Pérez
Secretario y Co-director de Tesis

Dra. Milena Mesa Lavista
Vocal

Dr. Franco Antonio Carpio Santamaría
Vocal (Evaluador externo a la UANL)

Dr. Luis E. Fernández Baqueiro
Vocal (Evaluador externo a la UANL)

DEDICATORIA:

A mis hijos: Rafael y Marina

Quienes me dan fuerza y aliento cada día para superarme y ser un mejor ejemplo
para ellos, los amo.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Mercedes y Heriberto, por siempre confiar en mí y apoyarme en cada paso de mi desarrollo personal y profesional.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ingeniería Civil, por haberme permitido ser parte del programa de Doctorado en Ingeniería con Orientación en Materiales de Construcción.

Al Departamento de Ingeniería Estructural y Peritajes del Instituto de Ingeniería Civil por todo el apoyo que me brindó durante el desarrollo de mi investigación acogiéndome como uno de más de su colectivo.

Al CONACYT, por haberme otorgado el apoyo económico para que el desarrollo de mi investigación fuera posible.

A mi director de tesis, Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel por todo el apoyo, confianza y enseñanza y aprendizaje, que pacientemente me ha brindado durante mi formación doctoral.

Al Dr. José Álvarez Pérez y a la Dra. Milena Mesa Lavista, por todo el conocimiento adquirido mediante su enseñanza, por todos los consejos y apoyo en el ámbito académico y personal. Sin olvidar todo el apoyo que me brindaron a mi llegada a México y durante todo mi proceso de adaptación.

Muchas gracias al Dr. Franco, por mostrarme alternativas, indicarme caminos y ayudarme en el desarrollo de mi tesis. Por sus acertadas correcciones durante todo el proceso de confección de mi tesis.

Al personal administrativo de la Subdirección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil, por sus servicios y atenciones.

RESUMEN

En los últimos años el empleo del material compuesto denominado mampostería ha aumentado debido a las facilidades que ofrece tales como: variedad de espesores en los muros, la colocación de las instalaciones a través de los huecos de las piezas, la colocación del acero de refuerzo, así como de la lechada permitiendo edificaciones de mayor altura, entre otras. Asimismo, la creciente demanda de viviendas y de edificaciones como plazas comerciales han contribuido al aumento del uso de este sistema constructivo. Para el análisis y diseño de este tipo de estructuras son comúnmente empleadas propiedades mecánicas como: la resistencia uniaxial a la compresión y el módulo de Young. En ese sentido, la estimación confiable de dichos parámetros constituye el punto de partida en la valoración del desempeño de cualquier estructura fabricada con este material compuesto.

Las normativas mexicanas para el diseño y revisión de estructuras de mampostería contemplan la colocación del mortero en el área neta del bloque hueco de concreto (BHC). Asimismo, las propiedades de este material compuesto se determinan mediante ensayos experimentales siguiendo los requerimientos que establecen las normas (mortero sobre el área neta). No obstante, cada vez es más frecuente en el ámbito nacional e internacional del sector de la construcción, que el mortero se coloque en las caras laterales. Esto provoca que las estructuras de mampostería se diseñen (o revisen) bajo ciertas condiciones de servicio que se alejan de su comportamiento real durante su vida útil, ya que no existen expresiones analíticas que permitan tener en cuenta esta forma de colocación del mortero durante la etapa de diseño o revisión.

En la presente investigación se evaluó la influencia de la forma de colocación del mortero de pega en el comportamiento a compresión uniaxial de la mampostería elaborada con BHC.

Se llevó a cabo una campaña experimental combinada con la micro-modelación numérica (MEF) y un estudio estadístico basado en la estadística inferencial. En la campaña experimental se ensayaron BHC y pilas de varias configuraciones (dos, tres

y cuatro hiladas) para ambas configuraciones de mortero (mortero sobre el área neta y mortero sobre las caras laterales). Asimismo, se elaboraron los micro-modelos numéricos detallados, los que fueron calibrados y validados con los resultados experimentales. A partir de los modelos validados y calibrados se realizó un análisis paramétrico donde se evaluaron BHC con resistencias entre 6.77 a 28.66 MPa y morteros de pega con resistencias a la compresión entre 4.25 y 17.09 MPa.

Los resultados mostraron que la forma de colocación del mortero modificó el comportamiento a compresión de la mampostería elaborada con BHC. En los BHC donde se colocó el mortero sobre las caras laterales se redujo su capacidad de carga en un 13.29% en comparación a cuando se colocó el mortero sobre el área neta. Por su parte, en las pilas, la capacidad de carga disminuyó un 10.49%. En base a los resultados obtenidos se proponen nuevas expresiones analíticas para la predicción del esfuerzo máximo a la compresión y el módulo de Young de la mampostería de BHC que tienen en consideración ambas variantes de colocación del mortero.

GLOSARIO

Abreviatura	Definición
<i>BHC</i>	Bloque hueco de concreto
<i>MBHC</i>	Medio bloque hueco de concreto
<i>MEF</i>	Método de elementos finitos
γ_c	Peso volumétrico del BHC, kN/m ³
A_n	Área neta (cm ²)
A_b	Área bruta (cm ²)
A_e	Área efectiva (cm ²)
P_{pn}	Carga máxima del BHC sobre el área neta (kN)
P_{pe}	Carga máxima del BHC sobre el área efectiva (kN)
K_{pn}	Rigidez del BHC sobre el área neta (kN/mm)
K_{pe}	Rigidez del BHC sobre el área efectiva (kN/mm)
\bar{f}_{pn}	Esfuerzo máximo del BHC sobre el área neta (MPa)
\bar{f}_{pe}	Esfuerzo máximo del BHC sobre el área efectiva (MPa)
\bar{f}_{pb}	Esfuerzo máximo del BHC sobre el área bruta (MPa)
f_{tb}	Esfuerzo máximo del BHC a tensión (MPa)
E_{pn}	Módulo de Young del BHC sobre el área neta (MPa)
E_{pe}	Módulo de Young del BHC sobre el área efectiva (MPa)
E_{pb}	Módulo de Young del BHC sobre el área bruta (MPa)
f_{cm}	Resistencia media a compresión experimental del mortero, MPa.
f'_{cm}	Resistencia a compresión de diseño del mortero, MPa
f_{tm}	Resistencia a tensión del mortero, MPa.
E_m	Módulo de Young del mortero a compresión, MPa.
ν_m	Coefficiente de Poisson del mortero
ν_a	Coefficiente de Poisson del azufre
<i>COV</i>	Coefficiente de variación
h	Espesor de junta de mortero, mm.
ρ_b	Peso volumétrico del BHC, kgf/m ³ .
ρ_m	Peso volumétrico del mortero, kgf/m ³ .
ν_b	Coefficiente de Poisson del BHC

μ	Coefficiente de fricción
α	Relación de esbeltez del espécimen
a	Altura del espécimen, cm.
e	Espesor del espécimen, cm
FC	Factor de corrección por esbeltez según la NTCM
FC*	Propuesta de nuevos factores de corrección por esbeltez
f_{c_n}	Esfuerzo máximo a compresión de pilas (A_n)
E_n	Módulo de Young de pilas (A_n)
f_{c_e}	Esfuerzo máximo a compresión de pilas (A_e)
E_e	Módulo de Young de pilas (A_e)

CONTENIDO

DEDICATORIA:	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
GLOSARIO	v
CONTENIDO	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS	xii
INTRODUCCIÓN	15
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
JUSTIFICACIÓN	18
HIPÓTESIS	19
OBJETIVOS	19
Objetivo general	19
Objetivos específicos	19
CAPÍTULO I	22
1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO	22
1.1. Variables que intervienen en el comportamiento a compresión uniaxial de la mampostería de BHC.	22
1.2. Instrumentación para ensayos experimentales.	26
1.3. Ensayos con el mortero colocado en las caras laterales.	29
1.4. Micro-modelación numérica	31
CAPÍTULO II	36
2. Influencia de la forma de colocación del mortero sobre el comportamiento a compresión uniaxial en BHCs y MBHCs.	36

2.1. Experimentación	38
2.1.1. Materiales	38
2.1.2. Instrumentación	40
2.1.3. Resultados en BHCs	42
2.2. Micro-modelación numérica (MEF)	51
2.3. Análisis estadístico	54
2.4. Conclusiones preliminares	56
CAPÍTULO III	59
3. Influencia de la forma de colocación del mortero en el comportamiento a compresión uniaxial en Pilas	59
3.1. Experimentación	60
3.1.1. Materiales	60
3.1.2. Instrumentación y ensayo de pilas	64
3.2. Micro-modelación numérica (MEF)	71
3.2.1. Validación y calibración de los modelos (MEF)	71
3.2.2. Análisis paramétrico en pilas de tres hiladas	76
3.3. Factor de corrección por esbeltez	77
3.4. Análisis estadístico	82
3.5. Nuevas expresiones matemáticas para la predicción del esfuerzo máximo a la compresión y el módulo de Young	84
3.6. Comentarios finales	90
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
PRODUCTOS OBTENIDOS	94
REFERENCIAS	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de colocación del mortero: a) sobre el área neta, b) sobre las caras laterales.	17
Figura 2. Modo de falla en morteros débiles, tomado de [24].	25
Figura 3. Posición de los LVDTs en pilas de BHC, tomado de [7].	26
Figura 5. Colocación de los LVDT, tomado de [24].	27
Figura 6. Instrumentación empleada en la campaña experimental. a) LVDT en pilas, b) galgas extensométricas en BHC y cubos de mortero, tomado de [2].	28
Figura 7. Posición de los LVDTs en las pilas de BHC, adaptado de [8].	28
Figura 8. Cabeceo de los BHC empleando madera pretensada, a) cabeceo en caras laterales, b) cabeceo en área neta. (tomado de [1]).	30
Figura 9. Esquema de distribución de cargas y concentraciones de esfuerzos en la interfase BHC-madera.	31
Figura 10. Esquema de tareas de investigación.	36
Figura 11. Curva esfuerzo deformación de los BHC.	39
Figura 12. Cubos de azufre y ceniza volante (50 cm de lado).	39
Figura 13. Instrumentación: a) grieta en el Strain Gauge. b) desprendimiento de sección de BHC.	41
Figura 14. Ubicación de los LVDTs.	41
Figura 15. Curva esfuerzo-deformación de dos LVDT colocados a ambos lados del BHC.	42
Figura 16. Curvas Carga vs desplazamiento: a) cabeceo colocado en el área neta, b) cabeceo colocado en las caras laterales.	43
Figura 17. Comparación de las curvas medias experimentales para ambas formas de colocación del cabeceo: a) Carga-desplazamiento, b) Esfuerzo-deformación.	45
Figura 18. Comparación de las curvas medias experimentales para ambas formas de colocación del cabeceo a) Curva carga-desplazamiento, b) curva esfuerzo-deformación (Área bruta)	46
Figura 19. Fallas en los BHC con el mortero colocado en toda el área neta. Los incisos representan diferentes imágenes tomadas cronológicamente durante el ensayo.	47
Figura 20. Modos de falla en BHC con el cabeceo colocado en las caras laterales.	47

Figura 21. Modos de falla para ambas colocaciones del cabeceo: a) cabeceo en área neta, b) cabeceo en las caras laterales.....	50
Figura 22. Representación de las 81 simulaciones.....	52
Figura 23. Comparación entre daño experimental y MEF. a) BHC con el cabeceo en el área neta, b) BHC con el mortero en las caras laterales.....	53
Figura 24. Esquema metodológico estadístico, adaptado de [29].	54
Figura 25. Representación de los parámetros mecánicos notables en la curva esfuerzo-deformación, a) BHC y b) MBHC.	56
Figura 26. Tipos de pilas ensayadas en la campaña experimental: a) mortero en área neta, b) mortero en las caras laterales.....	59
Figura 27. Instrumentación de especímenes para ensayos: a) cubos, b) briquetas.....	61
Figura 28. Curvas esfuerzo-deformación del mortero a compresión.	62
Figura 29. Curvas esfuerzo-deformación del mortero a tensión.	63
Figura 30. Modos de falla del mortero: a) Cubos, b) briquetas.....	64
Figura 31. Instrumentación de pilas de tres hiladas.	65
Figura 32. Equipamiento para la realización de los ensayos.	65
Figura 33. Curvas Esfuerzo-deformación de pilas con el mortero colocado en el área neta: a) pilas de 2 hiladas, b) pilas de 3 hiladas, c) pilas de 4 hiladas.....	66
Figura 34. Modos de fallas en pilas con el mortero colocado en el área neta en: a) dos hiladas, b) tres hiladas y c) cuatro hiladas.	67
Figura 35. Curvas Esfuerzo vs deformación de pilas con el mortero colocado en las caras laterales: a) 2 hiladas, b) 3 hiladas, c) 4 hiladas.	68
Figura 36. Modos de fallas en pilas con el mortero colocado en las caras laterales: a) pilas de dos hiladas, b) pilas de tres hiladas.	69
Figura 37. Comparación entre las diferentes estructuras matemáticas analizadas.	72
Figura 38. Representación de densidad de malla vs errores y tiempo de simulación.	73
Figura 39. Parámetros: a) ángulo de dilatación, b) coeficiente de viscosidad.....	73
Figura 40. Representación de: a) coeficiente de forma, b) coeficiente de fricción.	74
Figura 41. Comparación entre la curva esfuerzo-deformación del modelo numérico calibrado y la curva esfuerzo-deformación experimental con el mortero colocado en el área neta. ...	75
Figura 42 Comparación de modos de falla en pilas de 3BHC: a) mortero en área neta, b) mortero en las caras laterales.....	76

Figura 43. Representación de los parámetros mecánicos notables en la curva esfuerzo-deformación de pilas de tres hiladas.....	84
Figura 44. Correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de Young para ambas formas de colocación del mortero.	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de las principales variables en los códigos de América del Norte.	23
Tabla 2. Intervalos de los principales parámetros analizados.....	24
Tabla 3. Propiedades de los materiales y consideraciones de los ensayos.	30
Tabla 4. Resumen de las principales variables que influyen en el comportamiento a compresión según la literatura.	33
Tabla 5. Propiedades del BHC.	38
Tabla 6. Resistencia a la compresión de la combinación azufre-ceniza volante.	40
Tabla 7. Comparación de los resultados en términos de carga para BHC.....	43
Tabla 8. Comparación de los resultados en términos de esfuerzo en BHC.	44
Tabla 9. Geometría de los MBHCs.	48
Tabla 10. Comparación de los resultados de los MBHC referente a la curva carga-desplazamiento para ambas formas de colocación del cabeceo.	48
Tabla 11. Comparación de los resultados obtenido de los MBHC referente a la curva esfuerzo-deformación para ambas formas de colocación del cabeceo.	49
Tabla 12. Comparación de los resultados obtenidos de los BHC y MBHC referente a la curva carga-desplazamiento.	50
Tabla 13. Comparación de los resultados obtenidos de los BHC y los MBHC referente a la curva esfuerzo-deformación.	51
Tabla 14. Variables y niveles empleados en la calibración de los modelos de BHC.	51
Tabla 15. Relación de los modelos que quedaron dentro del 10% de error.	53
Tabla 16. Pruebas de normalidad.	55
Tabla 17. Resultados de las pruebas paramétricas.....	55
Tabla 18. Resultados experimentales del mortero a compresión.....	61
Tabla 19. Resultados experimentales del mortero a tensión.....	63
Tabla 20. Parámetros de la curva esfuerzo-deformación de las pilas con el mortero colocado en el área neta.	67
Tabla 21. Parámetros de la curva esfuerzo-deformación de las pilas con el mortero colocado en las caras laterales.	69
Tabla 22. Comparación de los resultados de las pilas en función de la forma de colocación del mortero.	70

Tabla 23. Parámetros empleados en la calibración de los modelos numéricos.	71
Tabla 24. Parámetros de los modelos numéricos.....	74
Tabla 25. Variables empleadas en el análisis paramétrico.	76
Tabla 26. Resultado de las 36 combinaciones analizadas. (18 con el mortero colocado en el área neta y 18 con el mortero en las caras laterales).....	77
Tabla 27. Factor de corrección por esbeltez (FC) según la NTC-Mampostería.	78
Tabla 28. Parámetros empleados en la micro-modelación para la evaluación del factor de corrección por esbeltez.	79
Tabla 29. Resultados de las 32 simulaciones (análisis paramétrico).	79
Tabla 30. Valores de esfuerzos que le corresponden a los valores enteros de relación de esbeltez.	80
Tabla 31. Propuesta de nuevos factores de corrección por esbeltez (FC*) (mortero Tipo I).	81
Tabla 32. Propuesta de nuevos factores de corrección por esbeltez (FC*) (mortero Tipo II).	81
Tabla 33. Nuevos factores de corrección (FC*) aplicados a los resultados experimentales.	82
Tabla 34. Pruebas de normalidad.	83
Tabla 35. Resultados de las pruebas paramétricas.....	83
Tabla 36. Estimación de los parámetros para la variante del mortero colocado en el área neta.	85
Tabla 37. Estimación de los parámetros para la variante del mortero colocado en las caras laterales.....	86
Tabla 38. Errores relativos entre los valores de esfuerzo a la compresión obtenidos mediante MEF y aplicando la ecuación propuesta para la variante del mortero colocado en el área neta.	87
Tabla 39. Errores relativos entre los valores de esfuerzo a la compresión obtenidos mediante MEF y la ecuación propuesta para la variante del mortero sobre las caras laterales.....	88
Tabla 40. Errores relativos y absolutos entre MEF y las ecuaciones propuestas para ambas variantes de colocación del mortero.	90

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La construcción de estructuras empleando el material compuesto denominado mampostería es aceptada en muchos países del mundo [1, 2]. La mampostería de bloques huecos de concreto (BHC) es un material compuesto por: el BHC, que aporta mayor resistencia al conjunto y el mortero de pega, que además de mantener la pieza en su lugar, es el responsable de la deformabilidad de estas estructuras. En el diseño estructural o revisión de este tipo de estructuras, uno de los principales protagonistas es la resistencia a la compresión uniaxial, existiendo dos formas de determinar este nivel de sollicitación. La primera, mediante el ensayo experimental del BHC y el mortero de pega. Otra vía, es el ensayo de especímenes, tales como: pilas (prismas) o muretes; en este sentido no existe una uniformidad de criterios en cuanto a la configuración del espécimen de prueba. Los principales códigos nacionales e internacionales utilizan pilas con un mínimo de dos o tres hiladas [3-5] o muretes [6]. No solo los códigos de construcción emplean ambos especímenes para caracterizar mecánicamente a la mampostería, sino que, en el campo de la investigación se emplean de forma indistinta cualquiera de los modelos físico-experimentales, ya sea pilas [2, 7-13] o muretes [9, 10, 14].

En el estudio del comportamiento a compresión uniaxial de este material, una de las principales variables a tener en consideración es la resistencia a la compresión uniaxial y el módulo de Young de sus componentes, así como, la relación entre ellos. En este sentido existen dos vertientes fundamentales: a) la mampostería compuesta por BHC fuerte y mortero débil y b) la mampostería conformada por mortero fuerte y BHC débil. La mayoría de las investigaciones y publicaciones reflejan una mampostería donde el elemento más resistente es el BHC, sin embargo, es cada vez más frecuente encontrar estructuras de mampostería compuestas por BHC débil y mortero fuerte [1, 2, 13, 15].

Igualmente, el tipo de pieza (BHC, bloque macizo, ladrillo), la esbeltez del espécimen de prueba [16-19] y la forma de colocación del mortero [1, 2, 7, 8, 10, 20] influyen en el comportamiento a compresión de la mampostería. Colocar el mortero en las caras laterales es cada vez más frecuente en diferentes partes del mundo [10, 21]. En México, las normas técnicas complementarias para el diseño y la construcción de estructuras de mampostería

[3] y la NMX-C-464 [22] establecen que la colocación del mortero debe realizarse en el área neta del BHC. Sin embargo, en la práctica cotidiana la colocación se lleva a cabo únicamente en las caras laterales del BHC, aun cuando no existen expresiones en los códigos nacionales que tengan en cuenta esta variable en el diseño (y o revisión) de las estructuras de mampostería.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años el empleo del material compuesto denominado mampostería estructural de BHC ha aumentado debido a las facilidades que ofrece en la colocación del refuerzo, así como de la lechada[1]. Asimismo, la creciente demanda de viviendas y de edificaciones como plazas comerciales han contribuido al aumento del uso de este sistema constructivo. En la práctica profesional, para el análisis y diseño de las estructuras de mampostería son comúnmente empleadas algunas propiedades mecánicas como: la resistencia uniaxial a la compresión y el módulo de Young. En ese sentido, la estimación confiable de dichos parámetros constituye el punto de partida en la valoración del desempeño de cualquier estructura fabricada con este sistema constructivo.

Las propiedades mecánicas de la mampostería dependerán en gran medida de las propiedades de cada uno de sus componentes. En la mayoría de las investigaciones y normativas se emplea una mampostería compuesta de BHC fuerte y mortero débil[1, 15]. No obstante, en muchas regiones incluyendo el estado de Nuevo León predomina una mampostería donde el BHC es más débil que el mortero, no existiendo una normativa de diseño que refleje esta relación.

Para la estimación de la resistencia a la compresión de la mampostería a partir de ensayos experimentales a sus materiales componentes, se toman en cuenta las propiedades mecánicas de los BHC y el mortero y se establece una expresión analítica de predicción[10]. No obstante, en las estructuras de mampostería también se emplean medios bloques huecos de concreto (MBHC) y de estos existen pocos estudios que reflejen su comportamiento a compresión uniaxial.

Otra vía para la estimación de la resistencia a la compresión es mediante el ensayo de especímenes (pilas o muretes). Sin embargo, no existe un criterio unificado en cuanto a los múltiples factores que intervienen en la estimación del comportamiento mecánico. Esto provoca, que sea muy difícil obtener expresiones analíticas globales para la estimación de la resistencia a la compresión de la mampostería.

Uno de los factores que interviene en el comportamiento a compresión de la mampostería de BHC es la forma de colocación del mortero [1, 23, 24]. Tanto en los códigos de diseño como en la práctica profesional el mortero se puede colocar en el área neta (véase Figura 1a) o en las caras laterales (véase Figura 1b).

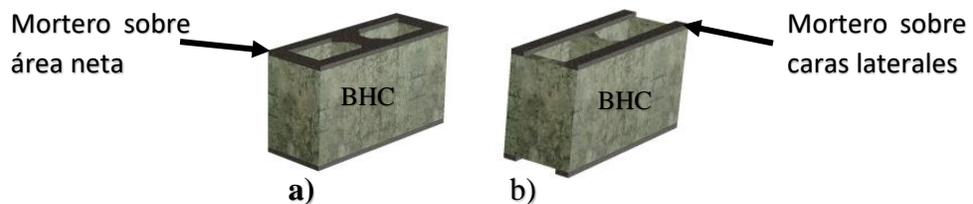


Figura 1. Tipos de colocación del mortero: a) sobre el área neta, b) sobre las caras laterales.

Existe una diversidad de criterios en los diferentes códigos referente a este tema. Por ejemplo, el ACI1530-11 (American Concrete Institute) [4] contempla que el mortero sea colocado en el área neta o en las caras laterales; la norma de diseño S304.1-04 (Design of Masonry Structures) de Canadá [5] establece que el mortero se aplique en las caras laterales; y las NTC-Mampostería (Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería) de México [3] determinan que el mortero debe colocarse en el área neta de la pieza.

Aun cuando las normativas mexicanas contemplan la colocación del mortero en el área neta, cada vez es más frecuente que en la práctica cotidiana del sector de la construcción el mortero se coloque en las caras laterales. Por otro lado, en los laboratorios las propiedades de la mampostería se determinan mediante ensayos experimentales siguiendo los requerimientos que establecen las normas (mortero sobre el área neta). Esto provoca que las estructuras de mampostería se diseñen (o revisen) bajo ciertas condiciones de

servicio que se alejan de su comportamiento real durante su vida útil, ya que no existen expresiones analíticas que permitan tener en cuenta esta forma de colocación del mortero durante la etapa de diseño.

JUSTIFICACIÓN

A pesar de que se han realizado diversos estudios sobre el comportamiento a la compresión uniaxial de la mampostería estructural, todavía resulta difícil establecer expresiones de predicción de la capacidad de este con un enfoque global. Factores como la forma de colocación del mortero y la geometría de los especímenes tienen una gran influencia en el comportamiento a compresión uniaxial de dicho material. La NMX-C-464 [22] establece que la colocación del mortero debe realizarse en el área neta del BHC, no obstante, cada vez es más frecuente en la práctica cotidiana que el mortero se coloque solo en las caras laterales, no existiendo expresiones que permitan predecir el comportamiento mecánico del material cuando el mortero se coloca de esta manera. Esta situación provoca que las estructuras de mampostería se diseñen bajo ciertos criterios y trabajen de forma diferente durante su vida útil. Por otro lado, el comportamiento a la compresión de este material compuesto dependerá en gran medida de la relación entre la resistencia a la compresión de sus materiales componentes. La mayoría de las investigaciones y normativas consideran una mampostería donde el BHC tiene una mayor resistencia que el mortero, induciendo al material a comportarse bajo ciertas condiciones mecánicas. Sin embargo, en muchas otras regiones de Latinoamérica es cada vez más frecuente encontrar una mampostería estructural conformada por un BHC más débil que el mortero, cambiando el comportamiento mecánico del conjunto. La contribución científica del presente trabajo consiste en obtener expresiones analíticas para estimar el comportamiento mecánico a compresión uniaxial del material compuesto denominado mampostería teniendo en cuenta la aleatoriedad de sus materiales componentes. Para ello, se llevó a cabo una campaña experimental combinada con la micro-modelación numérica (MEF) y un estudio estadístico. El empleo de estas nuevas expresiones analíticas predictivas permitirá estimar de manera fiable la resistencia a la compresión y el módulo

de Young de la mampostería elaborada con BHC. Adicionalmente, se obtuvieron expresiones de predicción multivariada que permiten estimar la resistencia y el módulo de Young de la mampostería elaborada con el mortero sobre el área lateral. De igual manera, las nuevas expresiones constituirán un primer paso para la confección de las normativas técnicas para el diseño y construcción de estructuras de mampostería en el estado de Nuevo León.

HIPÓTESIS

Con la colocación del mortero en las caras laterales del bloque, se obtendrán diferencias significativas en la resistencia a la compresión uniaxial y el módulo de elasticidad en la mampostería de bloques huecos de concreto, comparado con la colocación del mortero en el área neta.

OBJETIVOS

Objetivo general

Obtener nuevas expresiones analíticas para la estimación de la resistencia a la compresión uniaxial y el módulo de Young en la mampostería de BHC, teniendo en cuenta la influencia de la forma de colocación del mortero.

Objetivos específicos

- Evaluar el estado actual del estudio a compresión uniaxial de la mampostería de BHC, para determinar aspectos relacionados con la experimentación, la micro-modelación numérica y los avances hasta la fecha en el tema a investigar.
- Analizar la influencia de la forma de colocación del mortero sobre el comportamiento a compresión uniaxial en BHC y MBHC, para determinar si las diferencias son significativas.

- Evaluar la influencia de la forma de colocación del mortero en el comportamiento a compresión uniaxial en pilas construidas con BHC, para determinar si las diferencias son significativas.
- Obtener nuevas expresiones analíticas que permitan estimar la resistencia a la compresión y el módulo de Young de la mampostería estructural de BHC con el mortero colocado sobre el área neta y sobre las caras laterales.

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO I

1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

En el presente capítulo se llevó a cabo una búsqueda y revisión bibliográfica sobre varios aspectos relacionados con el estudio de la mampostería de BHC. Inicialmente se determinaron cuáles son las principales variables que influyen en el comportamiento mecánico de la mampostería de BHC, de acuerdo con las normas de diseño de países como México, Estados Unidos y Canadá; y a otros autores. Posteriormente se analizaron aspectos relacionados con la experimentación que se realiza a especímenes para el estudio de la mampostería. En este sentido, se valoraron aspectos como: los tipos especímenes que se emplean, la construcción de estos y la instrumentación empleada en los ensayos. Igualmente, se realizó una búsqueda sobre investigaciones relacionadas con la forma de colocación del mortero de pega, así como, información sobre el empleo de la micro-modelación numérica MEF detallada altamente no lineal.

1.1. Variables que intervienen en el comportamiento a compresión uniaxial de la mampostería de BHC.

Primeramente, se analizó la forma en que abordan el diseño de la mampostería elaborada con BHC los diferentes códigos de la región, tales como: el ACI (American Concrete Institute) [4], la S304.1-04 (Design of Masonry Structures) [5] y las NTC-Mampostería (Normas Técnicas Complementarias de Mampostería) [3]. En este sentido, se comparó como los diferentes códigos de diseño consideran aspectos tales como: el tipo y la cantidad de especímenes requeridos para el estudio de la mampostería, la calidad (representada a partir de la resistencia a la compresión), espesor y forma de colocación del mortero de pega. De igual manera, se pudo identificar como cada código contempla ciertas expresiones para la determinación de la resistencia a la compresión experimental y de diseño. Estas expresiones consideran diferentes áreas en función de la forma en que se debe colocar el mortero de pega.

En la Tabla 1, se muestran las variables analizadas y la no uniformidad en el tratamiento de dichas variables por los diferentes códigos de diseño revisados.

Tabla 1. Resumen de las principales variables en los códigos de América del Norte.

Variable	NTC-Mampostería[3]- NMX-C-464 [22]	ACI 1530-11 [4]-ASTM- C140 [25]	S304.1-04 [5]
Tipo de espécimen	Pilas de 3 hiladas mínimo	Pilas de 2 hiladas mínimo	Pilas de 2 BHC mínimo
# de especímenes	9 pilas por cada lote de 3000m ²	Un conjunto de Pilas por cada combinación de materiales y por cada una de las edades a ensayar.	mín 5 Pilas COV < 15% mín 10 Pilas COV > 15%
Tipos de mortero	Tipo 1 ≥ 12.5MPa 7.5MPa ≤ Tipo 2 < 12.5MPa	6.2MPa ≤ Tipo N < 14.5MPa 14.5MPa ≤ Tipo S < 20.0MPa Tipo M: ≥ 20.0MPa	6.2MPa ≤ Tipo N < 14.5MPa 14.5MPa ≤ Tipo S ≤ 20.0MPa
Espesor de juntas de mortero (h)	6mm a 15mm	10mm ± 2mm	≈9.5mm
Colocación del mortero	 En toda la sección transversal del BHC	 En toda la sección transversal del BHC	 Solo en las caras laterales del BHC (face-shell bedding)
Resistencia a la compresión experimental	$f_m = \frac{P}{A_b} \cdot FC$ Se determina para cada Pila	$f_m = \frac{P}{A_n} \cdot FC$ Se determina para cada Pila	$f_m = \frac{P}{A_e} \cdot FC$ Se determina para cada Pila
Resistencia a la compresión de diseño	$f^*_m = \frac{\bar{f}_m}{1 + 2.5C_m}$	$f^*_m = \bar{f}_m$	$f^*_m = \bar{f}_m(1 - 1.64C_m)$
Módulo de elasticidad	$E_m = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - 0.00005}$	Entre 0.05f _m y 0.33f _m	Entre 0.05f _m y 0.33f _m
f_m : Esfuerzo a compresión experimental f[*]_m : Esfuerzo a compresión de diseño f̄_m : Promedio de esfuerzos a compresión P : Carga máxima aplicada FC : Coeficiente de corrección por esbeltez σ₁ : Esfuerzo axial correspondiente al 0.00005 de deformación σ₂ : Esfuerzo axial correspondiente al 40% de la carga máxima		A_b : Área bruta A_n : Área neta A_e : Área lateral C_m : Coeficiente de variación ε₂ : Deformación unitaria producida por σ₂ E_m : Módulo de elasticidad	

Por otro lado, el análisis de la literatura científica sobre el tema permitió identificar que, los autores presentan diferentes puntos de vista a cerca del comportamiento a la compresión de este material compuesto.

Gihad Mohamad et al. [7], plantearon que la resistencia a la compresión de la mampostería depende de la resistencia a la compresión de sus componentes. Para ello, realizaron ensayos en pilas construidas con BHC con una resistencia a la compresión de 18.2 y 27 MPa y cuatro tipos de mortero. Emplearon dos morteros de baja resistencia (2.9 y 4.2 MPa), uno de resistencia media (8.6 MPa) y otro más de alta resistencia (19.9 MPa). De acuerdo con los resultados, los autores plantearon que el mortero es el responsable del comportamiento no lineal de la mampostería. Asimismo, concluyeron que el modo de falla de la mampostería está relacionado con el tipo de mortero. Cuando se emplean morteros más débiles que los BHC las fallas estarán asociados al aplastamiento del mortero. Por otro lado, cuando el mortero es más resistente que los BHC las fallas estarán asociadas al desarrollo de grietas por tensión en las caras de los BHC.

Salah R. et al. [10], llevaron a cabo una recopilación de resultados experimentales de la literatura. De acuerdo con los datos, los factores que más influyeron en la resistencia a la compresión de la mampostería fueron: la resistencia a la compresión de sus componentes (BHC y mortero), así como la forma de colocación del mortero y la relación de esbeltez. Dichos parámetros fueron estudiados en los intervalos que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Intervalos de los principales parámetros analizados.

Parámetro	intervalos
Resistencia a la compresión de los BHC (MPa)	8.9 - 45.6
Espesor de los BHC (mm)	100 - 240
Resistencia a la compresión del mortero (MPa)	3.65 – 26.90
Relación de esbeltez de pilas	1.81 – 6.25

De acuerdo con los resultados, a medida que aumentó la resistencia a la compresión del BHC, aumentó la resistencia de la mampostería, para BHCs (10-30MPa). En el caso del mortero, mientras mayor fue la resistencia a la compresión, se indujeron menos esfuerzos laterales de tensión al BHC.

Gihad Mohamad et al.[24] analizaron la influencia de la resistencia a la compresión del mortero en el comportamiento de la mampostería de BHC. Durante su experimentación pudieron observar que en las pilas en donde se usó mortero de alta resistencia, los

esfuerzos de tensión generaron grietas que se prolongaron perpendicularmente hasta la junta de mortero. Por otro lado, en el caso de los morteros débiles, en la medida que se aplicó la carga, la interfaz superior de la junta de mortero experimentó una mayor expansión con aplastamientos localizados (véase Figura 2). Esta expansión del mortero en la parte superior generó tensiones en las caras de los BHCs provocando grietas verticales que llevaron a la falla de las pilas.

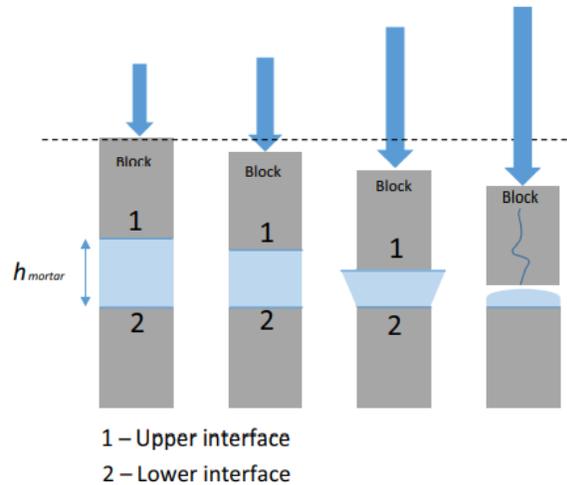


Figura 2. Modo de falla en morteros débiles, tomado de [24].

Por otro lado, los autores evidenciaron que la geometría del BHC y el espesor de la junta de mortero también influyeron en el comportamiento de la mampostería. La geometría del BHC insidió en la magnitud de los esfuerzos de tensión lateral, causante de grietas verticales en las pilas. Además, el aumento del espesor de la junta de mortero provocó grietas verticales en las pilas ante cargas bajas. De los resultados experimentales obtenidos, concluyeron que las interacciones que se producen en la interfaz del mortero y el BHC son las responsables por los modos de falla de la mampostería.

Por su parte, Filipe E. et al.[8] analizaron la influencia del espesor de la junta de mortero en la resistencia a la compresión de la mampostería elaborada con bloques de resistencia media (16.3 MPa) y alta (45.6 MPa). Este parámetro es uno que más variaciones presenta en función de la normativa que se emplee (véase Tabla 1). Los autores verificaron que se produce un aumento de la resistencia a la compresión y del módulo de elasticidad de la

mampostería, cuando se reduce el espesor de la junta de mortero. Igualmente, se hace referencia a estudios donde plantean que, al aumentar el espesor del mortero por encima de 10 mm, la resistencia a la compresión de la mampostería comienza a disminuir. De acuerdo con los autores, la influencia en el comportamiento estructural de la mampostería será mucho más marcada cuando el mortero es menos resistente que el BHC. Esto se debe a que mientras mayor sea el espesor de la junta de mortero, menor será el efecto de confinamiento lateral del mismo, disminuyendo su resistencia a la compresión. Por otro lado, mientras mayor sea la resistencia a la compresión del mortero, es posible que se produzca una falla por agrietamiento del BHC debido a los esfuerzos de tensión. En este caso, la influencia del espesor de la junta de mortero en la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de la mampostería no es estadísticamente significativa.

1.2. Instrumentación para ensayos experimentales.

Gihad Mohamad, et al. [7], emplearon cuatro LVDTs ubicados en el centro de cada una de las celdas del BHC en ambas caras laterales, como se ilustra en la . De esta forma pudieron tener una mejor visión de los desplazamientos que presentaron los especímenes durante el ensayo.

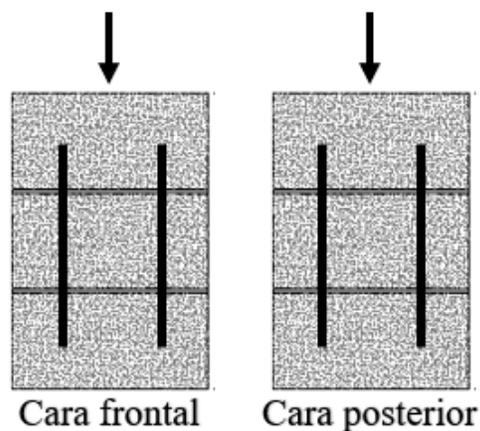


Figura 3. Posición de los LVDTs en pilas de BHC, tomado de [7]

Gihad Mohamad et al.[24], como se aprecia en la Figura 4, colocaron dos LVDTs simétricos en la misma cara del espécimen para medir los desplazamientos en las pilas.

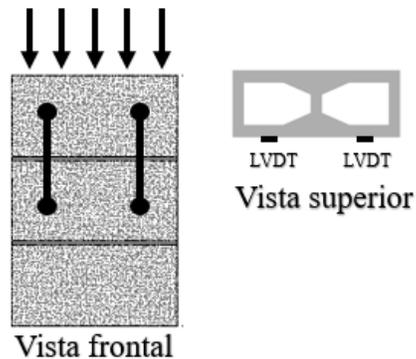


Figura 4. Colocación de los LVDT, tomado de [24].

Teniendo en cuenta el sistema de instrumentación empleado en otras publicaciones, así como la heterogeneidad del material, se puede plantear que colocar los dispositivos de medición en una misma cara no permitirá determinar si existen asimetrías en cuanto a deformaciones entre las caras de las pilas.

Álvarez-Pérez et al. [2] como parte de la campaña experimental que llevaron a cabo emplearon dos tipos de instrumentación. En primer lugar, colocaron LVDTs a cada lado de las pilas ensayadas para medir los desplazamientos durante la realización de los ensayos (véase Figura 5a). Asimismo, colocaron galgas extensométricas para medir las deformaciones tanto en los BHC como en los cubos de mortero, véase Figura 5b. Las galgas extensométricas fueron colocadas, una en posición horizontal para medir los desplazamientos horizontales, y otra en posición vertical para medir los desplazamientos en esa dirección, lo que permitió calcular la relación de Poisson de los BHC y el mortero.

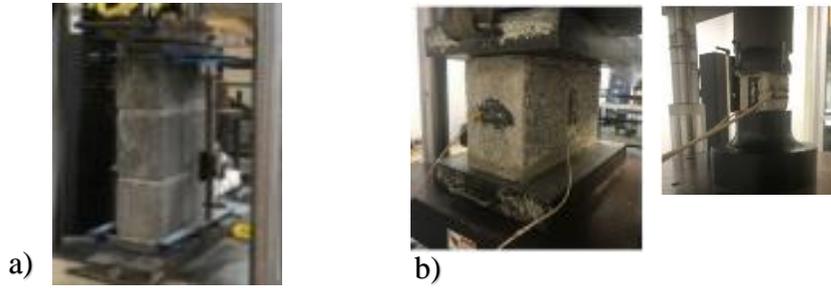


Figura 5. Instrumentación empleada en la campaña experimental. a) LVDT en pilas, b) galgas extensométricas en BHC y cubos de mortero, tomado de [2].

Filipe E. et al.[8] realizaron una campaña experimental donde ensayaron 120 pilas. Para medir los desplazamientos durante la realización de los ensayos emplearon LVDT. Como se muestra en la Figura 6, los LVDT fueron colocados en la cara más estrecha del espécimen. De acuerdo con la experiencia obtenida en la experimentación, aun cuando la instrumentación se colocó desde el centro de las platinas, la longitud para el cálculo de las deformaciones deberá ser la altura de la pila. De lo contrario, las deformaciones obtenidas no serían representativas del material, debido a que la longitud instrumentada abarca la longitud del espécimen y parte del espesor de las placas de acero.

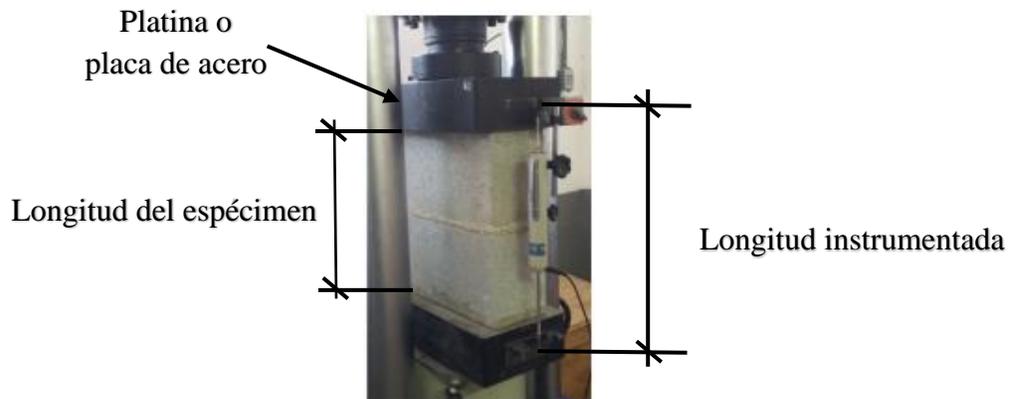


Figura 6. Posición de los LVDTs en las pilas de BHC, adaptado de [8]

1.3. Ensayos con el mortero colocado en las caras laterales.

Salah R. et al.[10] basados en los resultados de varias bases de datos, observaron que las pilas donde el mortero se colocó en las caras laterales fallaron ante esfuerzos a compresión mayores que las construidas con el mortero colocado en el área neta. El comportamiento observado, no infiere que la colocación del mortero en las caras laterales del bloque ocasione un aumento en la resistencia a la compresión de las pilas de mampostería, sino que, la medida del esfuerzo efectivo originó un valor mayor que la medida del esfuerzo neto. Como parte de los análisis realizados los autores proponen una ecuación para el cálculo de la resistencia a la compresión de la mampostería indicada en la ecuación (1).

$$0.8[1.107C_bC_h(f_{bl}^{0.750})(f_{mr}^{0.180})] \quad (1)$$

En dicha ecuación, C_b es un coeficiente que tiene en cuenta la forma de colocación del mortero, el mismo tendrá un valor igual a 1 cuando el mortero se coloca en las caras y a 0.91 cuando el mortero se coloca en el área neta del BHC. Por otra parte, el coeficiente C_h , tendrá en cuenta la relación de esbeltez (α), ecuación (2). Cuando $\alpha \geq 5$ el coeficiente C_h será igual a 1, si $\alpha < 5$ el valor del coeficiente C_h se calculará empleando la ecuación (3).

$$\alpha = a/e \quad (2)$$

$$C_h = \frac{1}{1 - 0.05(5 - \frac{h}{t})} \quad (3)$$

En la (3, (h) representa la altura y (t) el espesor menor de los especímenes.

Tatheer Zahra et al.[1] realizaron un estudio en pilas de tres hiladas de BHC empleando tres calidades de mortero y dos formas de colocación de estos. En la Tabla 3, se recogen los principales resultados obtenidos y algunas consideraciones que tuvieron en cuenta.

Tabla 3. *Propiedades de los materiales y consideraciones de los ensayos.*

Bloque sólido	15.4 MPa	Área bruta	3900x90	35100mm ²	Para simular en los ensayos la colocación del mortero en las caras laterales, emplearon listones de madera prensada de 6mm de espesor.
	21 MPa	Efectiva	3900X30X2	23400 mm ²	
BHC	16.6 MPa	Área neta		26100 mm ²	
	12.5 MPa	Efectiva	3900X30X2	23400 mm ²	
Mortero	2.5 MPa	Estas resistencias fueron determinadas mediante el uso de cilindros de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura. Para poder comparar estos valores con los obtenidos en cubo se deberá utilizar un coeficiente (1/0.85)[10]			
	3.4 MPa				
	6.0 MPa				

Cabe destacar que en la investigación, las resistencias de los morteros fueron inferiores a 7.5 MPa, que establece la NMX-C-464 [22] como valor mínimo para un mortero estructural. Por otro lado, para simular las dos variantes de colocación del mortero, emplearon láminas de madera prensada de 6 mm de espesor, como puede apreciarse en la Figura 7.

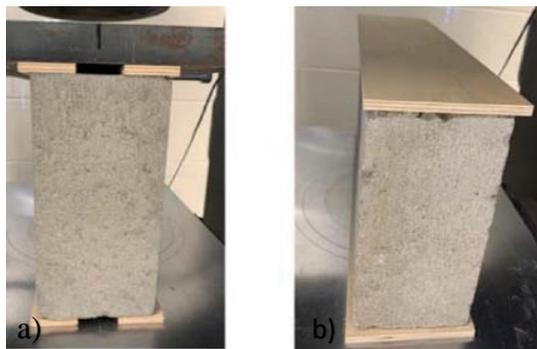


Figura 7. *Cabeceo de los BHC empleando madera pretensada, a) cabeceo en caras laterales, b) cabeceo en área neta. (tomado de [1])*

Los autores obtuvieron como resultado que, al aplicar la carga en la variante con el cabeceo en las caras laterales, se redujo la resistencia a la compresión de los BHC un 19.9%, en comparación a cuando se colocó el cabeceo en el área neta, debido al incremento de las tensiones en la web del BHC. En el caso de las pilas, la resistencia a la compresión obtenida en la variante con el mortero colocado sobre las caras laterales fue un 10.7% inferior.

Es importante comentar que el empleo de la madera como material para el cabeceo, podría no garantizar una correcta distribución de la carga debido a las discontinuidades en la superficie del BHC (como indicado esquemáticamente en la Figura 8), por lo que se generarían concentraciones de esfuerzos que pudieron influir en los resultados obtenidos.

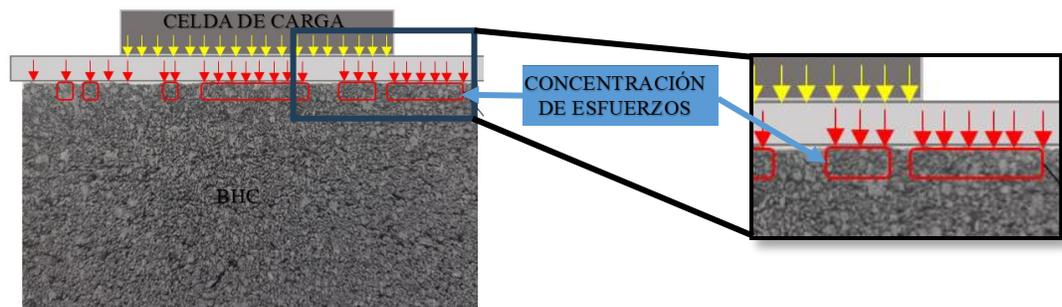


Figura 8. Esquema de distribución de cargas y concentraciones de esfuerzos en la interfase BHC-madera.

Referente a los modos de falla, en el caso de las pilas donde la carga se aplicó en el área neta, se presentaron grietas verticales desarrolladas en todos los laterales de éstas. Por otro lado, en las pilas donde la carga se aplicó en las caras, las fallas se presentaron en las caras interiores. Los modos de falla en pilas se atribuyeron a las tensiones generadas en los BHC por el aplastamiento del mortero, debido a la baja resistencia a compresión de los morteros utilizados.

1.4. Micro-modelación numérica

El estudio del comportamiento de la mampostería ante cargas a compresión es un proceso complejo debido al gran número de variables que intervienen. Llevar a cabo el mismo basado en ensayos experimentales es un proceso largo y costoso. Por este motivo la micro-modelación numérica representa una valiosa herramienta para el estudio de materiales. El empleo de esta permite evaluar un mayor número de variables sin incrementar los gastos de experimentación y disminuyendo las variables externas que interfieren en los ensayos experimentales.

Álvarez-Pérez et al. [2] combinaron la experimentación, la micro-modelación numérica y el análisis estadístico multifactorial, para la obtención de ecuaciones de estimación de la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de la mampostería de BHC. Los autores llevaron a cabo una campaña experimental donde ensayaron pilas de tres hiladas utilizando BHC con una resistencia baja a la compresión (3 MPa). Con el empleo del programa ABAQUS/CAE se modelaron por separado los BHC y el mortero aplicando el Concrete Damage Plasticity Model (CDPM) y considerando una relación no lineal entre el BHC y el mortero. Emplearon un nodo cuadrático de integración reducida (C3D20R) y una malla de 15 x 15 x 15 mm. A partir de los análisis realizados por los autores, obtuvieron la ecuación (4) para la resistencia a la compresión (f'_m) con un R^2 de 99.71% y la ecuación (5) para el módulo de elasticidad de la mampostería (E_m) con un R^2 de 85.30%.

$$|f'_m| = 4.29767f'_{cp} - 0.471467f'_{cp}{}^2 + 0.218868f'_{tp} \\ - 0.00902076f'_{tp}h + 0.000294597h^2 - 0.00495695h \\ - 6.8462 \quad (4)$$

$$|E_m| = 121.325f'_{cp}{}^2 - 788.887f'_{cp} + 2.27042f'_{tm}f'_{cp} + 2190.82 \quad (5)$$

Los autores tuvieron en consideración variables tales como: la resistencia a la compresión del BHC (f'_{cp}), la resistencia a tensión del BHC (f'_{tp}), el espesor de la junta de mortero (h) y la resistencia a la tensión del mortero (f'_{tm}).

Tatheer Zahra et al.[1] en un estudio llevado a cabo en el año 2021, emplearon la micro-modelación modelando el BHC, el mortero y las interacciones que ocurren entre ellos por separado. Para la modelación del BHC y del mortero emplearon un elemento finito C3D8 y un mallado de 10mm, mientras que para el comportamiento del material emplearon el Concrete Damage Plasticity Model (CDPM). Otros de los parámetros de plasticidad empleados fueron: ángulo de dilatación = 30^0 , parámetro de viscosidad = 0.01 y una excentricidad = 0.1. Con los modelos numéricos demostraron que la forma de colocación del mortero, así como, la calidad del mortero influye en el modo de falla y la deformabilidad de la mampostería de BHC.

1.5. Resumen del análisis bibliográfico.

De la revisión bibliográfica reportada en la literatura especializada, es posible establecer las siguientes aseveraciones:

- No existe un consenso entre los códigos de diseño analizados en parámetros relacionados con la experimentación como: la cantidad de especímenes, la cantidad de hiladas, el espesor y forma de colocación del mortero de pega.
- La resistencia a la compresión y el módulo de Young de la mampostería dependerá de las propiedades mecánicas de sus componentes (BHC y mortero de pega).
- Los modos de falla de la mampostería dependerán de la relación entre las propiedades mecánicas de sus componentes y a las interacciones que se producen en la interfaz entre ambos materiales. Al emplear morteros fuertes y BHC débiles la falla estará asociada a las grietas generadas por esfuerzos de tensión en las caras de los BHC. Por otro lado, al utilizar morteros débiles y BHC fuertes la falla estará asociada al aplastamiento del mortero.
- El espesor de la junta de mortero tendrá una influencia marcada en el comportamiento a la compresión uniaxial de la mampostería cuando se emplean morteros débiles y BHC fuertes. En este caso mientras mayor sea el espesor de la junta de mortero menor será la resistencia a la compresión y el módulo de Young de la mampostería.
- Las variables que influyen en el comportamiento a la compresión de la mampostería de BHC, de acuerdo con la bibliografía analizada, se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. *Resumen de las principales variables que influyen en el comportamiento a compresión según la literatura.*

Parámetro	intervalos
Resistencia a la compresión de los BHC (MPa)	8.9 - 45.6
Espesor de los BHC (mm)	100 - 240
Resistencia a la compresión del mortero (MPa)	3.65 – 26.90
Relación de esbeltez de pilas	1.81 – 6.25
Espesor de la junta de mortero	Más significativo cuando se utilizan mortero débiles y BHC fuertes
Forma de colocación del mortero	En área neta En las caras laterales

- Para medir los desplazamientos se emplean LVDT, dos o cuatro en función de la disponibilidad de estos. Se ubican en una misma cara permitiendo medir los desplazamientos en toda la cara del espécimen. De igual manera, se pueden colocar de forma simétrica lo que ayuda a determinar que no existan asimetrías en los desplazamientos y conocer si existen rotaciones en la platina durante la realización de los ensayos.
- Para obtener las deformaciones se emplean galgas extensométricas ubicadas, una en posición horizontal, y otra en posición vertical lo que permitirá el registro de las deformaciones en ambos sentidos y la determinación de la relación de Poisson.
- A nivel de BHC, existe muy poca información que tenga en cuenta la forma de colocación del mortero. No obstante, en los estudios publicados se demuestra una disminución de la capacidad de carga de las piezas cuando el mortero se coloca en las caras laterales de hasta un 19.8%.
- La micro-modelación numérica representa una poderosa herramienta para el estudio del comportamiento de la mampostería. No obstante, los modelos deben estar validados y calibrados con resultados experimentales.
- En los modelos descritos en la bibliografía se emplean parámetros como: el ángulo de dilatación, parámetro de viscosidad, tamaño de malla y tipo de elemento finito.
- Se realizó una recopilación de las principales variables empleadas en investigaciones relacionadas con BHC (ANEXO A) y pilas de mampostería elaboradas con BHC (ANEXO B).

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO II

2. Influencia de la forma de colocación del mortero sobre el comportamiento a compresión uniaxial en BHCs y MBHCs.

En el presente apartado, se recogen los procedimientos, ensayos y análisis realizados a BHCs y MBHCs con el fin de evaluar la influencia de la forma de colocación del mortero en el comportamiento a compresión ante cargas axiales. Para ello, se ejecutaron diferentes tareas como se muestra en la Figura 9.

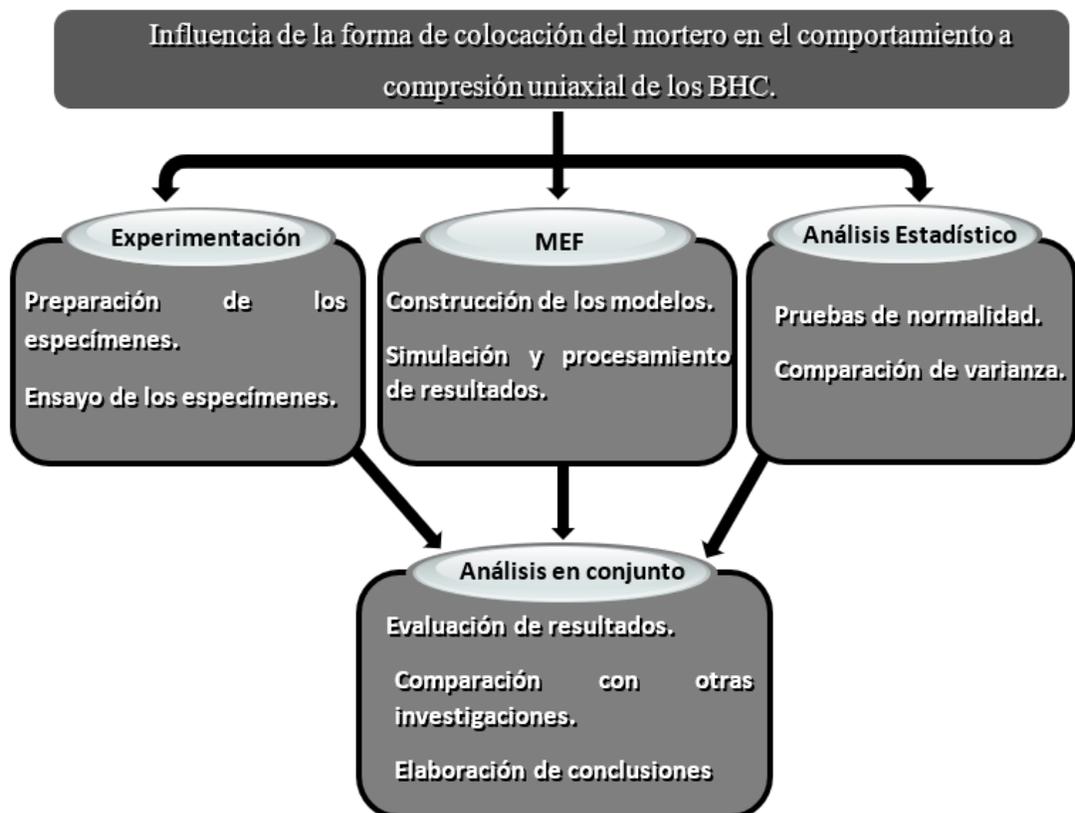


Figura 9. Esquema de tareas de investigación.

Primeramente, se prepararon y ensayaron BHCs y MBHCs con el cabeceo colocado en el área neta y en las caras laterales (simulando la forma de colocación del mortero). Con el fin de determinar la resistencia a la compresión y el módulo de Young, se ensayaron a compresión uniaxial los BHCs y los MBHCs cumpliendo los requerimientos establecidos en la NMX-C-036 [26]. Para la realización de los ensayos, se utilizó la máquina universal INSTRON DX 600 y la carga fue aplicada con un control por desplazamiento a una velocidad de 0.005mm/s.

Seguidamente, se procedió al desarrollo de la micro-modelación numérica de los BHCs. Para ello, se empleó el modelo constitutivo denominado Plasticidad Dañada del Concreto (MPDC). El MPDC, es un modelo continuo a través del cual se puede definir el comportamiento no lineal del material. Este modelo, ha sido empleado con éxito en investigaciones recientes y permite analizar los dos principales mecanismos de falla: el agrietamiento a tensión y el aplastamiento a compresión [2, 11]. Para la micro-modelación numérica, se empleó el Método de Elementos Finitos (MEF), y se utilizó como herramienta el programa ABAQUS/CAE, que es un programa de cálculo que permite soluciones de análisis y simulaciones 3D por elementos finitos.

De igual manera, se llevó a cabo un análisis estadístico con el fin de evaluar si las diferencias entre los principales parámetros de la curva esfuerzo-deformación para ambas formas de colocación del cabeceo fueron significativas. Para este fin, se realizaron las pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk con el objetivo de comprobar si los resultados obtenidos se ajustan a una distribución normal. Posteriormente, se aplicaron pruebas de homogeneidad de varianzas para determinar si se emplearían pruebas paramétricas o no paramétricas para evaluar si las diferencias obtenidas son estadísticamente significativas.

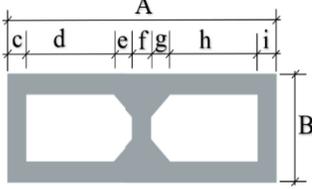
Finalmente, se realizó un análisis en del conjunto de los resultados experimentales, la micro-modelación (MEF) y el análisis estadístico. Se compararon los resultados obtenidos con los de otros investigadores y se elaboraron las conclusiones.

2.1. Experimentación

2.1.1. Materiales

En la campaña experimental se emplearon BHC con una geometría de dos celdas y dimensiones como las que se muestran en la Tabla 5. Para la caracterización de los BHC se llevó a cabo un estudio en una muestra de treinta BHCs, los que debieron cumplir con las especificaciones establecidas en la NMX-C-404 [27].

Tabla 5. Propiedades del BHC.

										γ_c (kN/m^3)	A_n (cm^2)	A_b (cm^2)	A_e (cm^2)	$\frac{A_n}{A_b}$	$\frac{A_e}{A_n}$	$\frac{A_e}{A_b}$
										19.50	327	580	213.3	0.56	0.65	0.37
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							

Como se muestra en la Tabla 5, tanto las paredes exteriores como las interiores de los BHCs cumplen con las dimensiones mínimas de 25 mm que establece la NMX-C-404[27].

Con el objetivo de evaluar la calidad de los BHCs, se realizaron ensayos a compresión obteniéndose la curva esfuerzo-deformación de cada pieza, y un esfuerzo medio máximo a compresión igual a 11.27 MPa. En la Figura 10 se presentan los resultados obtenidos en la muestra seleccionada.

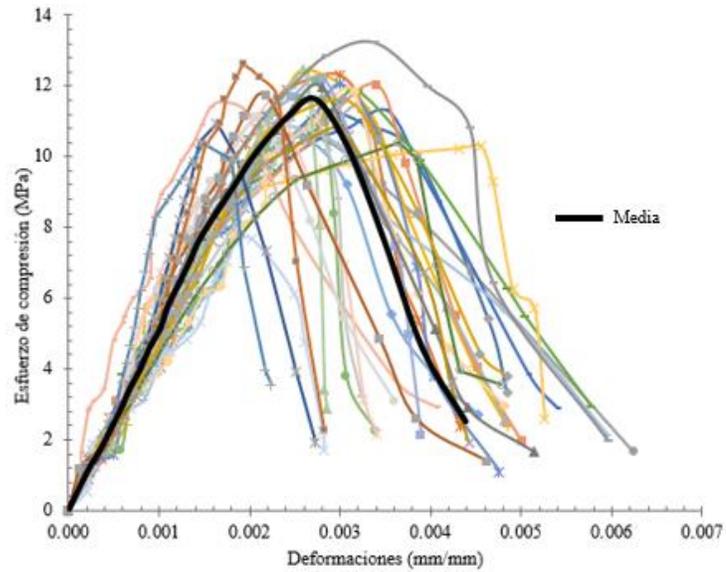


Figura 10. Curva esfuerzo deformación de los BHC.

Para el cabeceo, la NMX-C-036 [26] establece que se puede emplear azufre o pasta de yeso y cemento. Independientemente del material a utilizar, debe tener un espesor máximo de 5 mm y una resistencia a la compresión mínima de 35 MPa, medida en cubos de 50 mm [26].

Con el objetivo de verificar la resistencia mínima a la compresión que establece la normativa mexicana del material de cabeceo se ensayaron 9 cubos de 50 mm de lado instrumentados con strain gauges como se muestra en la Figura 11. Los especímenes ensayados fueron preparados usando una combinación de azufre y ceniza volante en una proporción 2:1.



Figura 11. Cubos de azufre y ceniza volante (50 cm de lado).

Como se muestran en la Tabla 6 se obtuvo una resistencia a la compresión media de 45.64 MPa, cumpliendo con lo que establece la NMX-C-036.

Tabla 6. Resistencia a la compresión de la combinación azufre-ceniza volante.

Dosificación	Probeta	P máx. (kgf)	f'_m (MPa)	Valor medio (f'_m)	ν_a
2:1	1	9648	38.59	45.64	0.28
	2	15120	60.60		
	3	13560	54.24		
	4	8915	35.66		
	5	12832	51.32		
	6	11598	46.39		
	7	9648	38.59		
	8	11125	44.50		
	9	10220	40.88		

2.1.2. Instrumentación.

Para la medición de las deformaciones se utilizaron galgas extensométricas (strain gauges). Estas se colocaron en posición horizontal y transversal lo que permitió realizar un registro de los desplazamientos en ambas direcciones con el fin de determinar el coeficiente de Poisson. Cabe resaltar que, no es posible obtener las mediciones en las zonas de ablandamiento del material a partir de las galgas. Esto se debe a la alta sensibilidad de estos dispositivos, por lo que ante una grieta (véase Figura 12a), o desprendimiento de secciones del BHC (véase Figura 12b) dejan de captar mediciones.

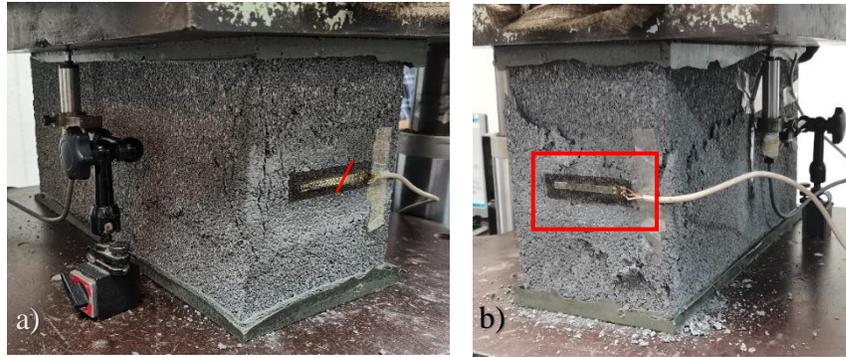


Figura 12. Instrumentación: a) grieta en el Strain Gauge. b) desprendimiento de sección de BHC.

Adicionalmente, como se muestra en la Figura 13, se colocaron LVDTs, uno a cada lado de la pieza. La disposición de los dispositivos cumplió dos objetivos: medir los desplazamientos del material y evaluar si ocurre rotación de la platina durante la ejecución del ensaye.

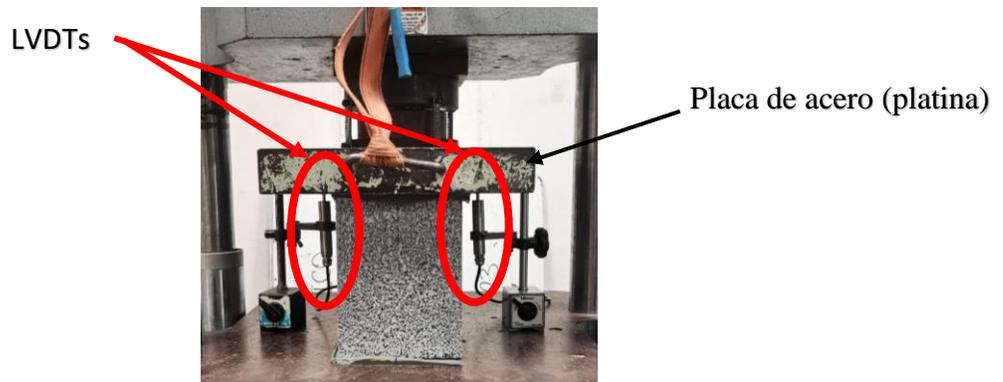


Figura 13. Ubicación de los LVDTs.

La colocación de los LVDTs a ambos lados tuvo el objetivo de evaluar el comportamiento del material en ambas caras durante la aplicación de la carga; lo que resultó vital para mejorar la visión del comportamiento del BHC, teniendo en cuenta la heterogeneidad del material.

En la Figura 14, se muestran las curvas de esfuerzo - deformación derivadas de los datos obtenidos de los LVDTs, en la variante donde el mortero se colocó en el área neta. Los resultados mostraron una simetría en términos de las deformaciones axiales en ambas caras del BHC.

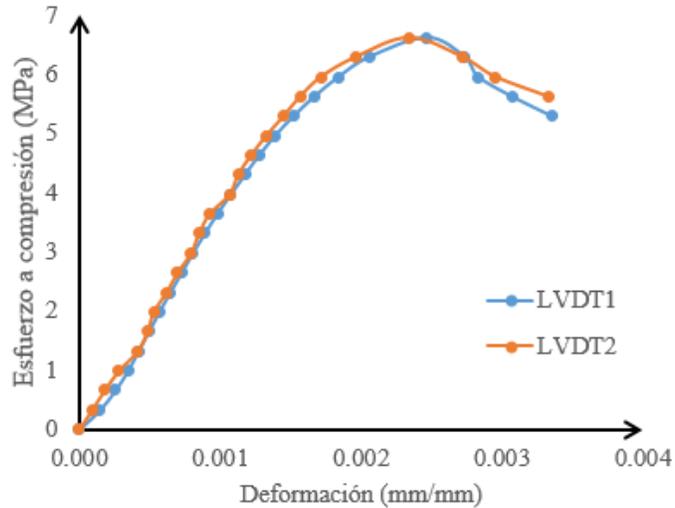


Figura 14. Curva esfuerzo-deformación de dos LVDT colocados a ambos lados del BHC.

2.1.3. Resultados en BHCs.

En una primera fase, se evaluó en términos de carga el comportamiento a compresión uniaxial de los BHC en función de la forma de colocación del cabeceo (representando la forma de colocación del mortero). Para ello, se ensayaron 10 BHC con el cabeceo en el área neta y 10 BHC con el cabeceo en las caras laterales.

En la Figura 15 se representan las curvas carga vs desplazamiento obtenida de los ensayos experimentales para ambas disposiciones del cabeceo.

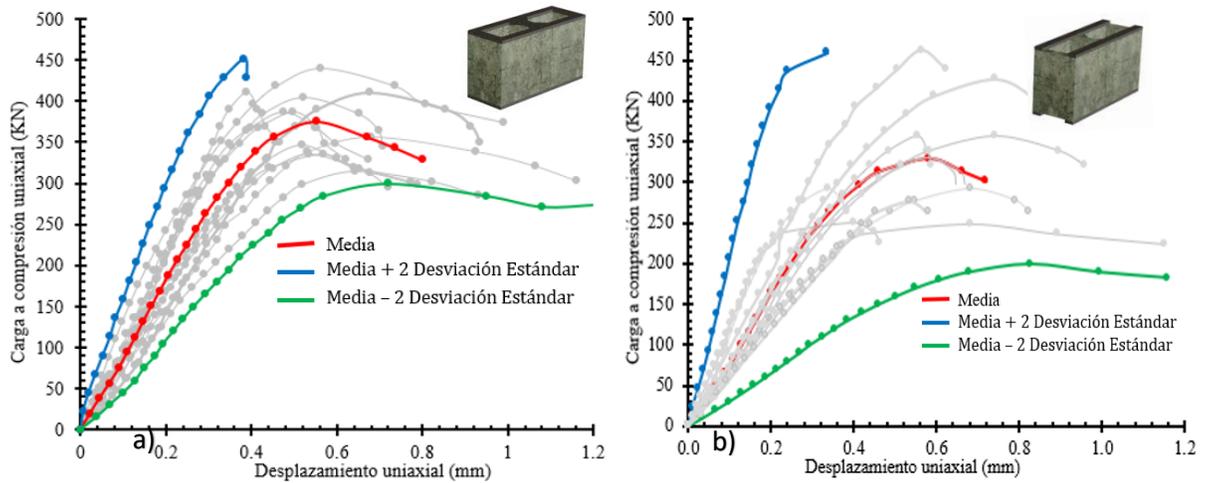


Figura 15. Curvas Carga vs desplazamiento: a) cabeceo colocado en el área neta, b) cabeceo colocado en las caras laterales.

En la Tabla 7, se recogen los valores de los principales parámetros mecánicos de la curva carga-desplazamiento, para cada una de las formas de colocación del cabeceo en los BHC.

Tabla 7. Comparación de los resultados en términos de carga para BHC.

Propiedades	Cabeceo sobre el área neta	COV	Cabeceo sobre las caras laterales	COV	Diferencias relativas (%)
Carga máxima, (kN)	376	0.10	329	0.20	12.50
Rigidez, (kN/mm)	927	0.19	822	0.22	11.33
Desplazamiento ante carga máxima, (mm)	0.55	0.15	0.58	0.21	-5.45
Desplazamiento último, (mm)	0.80	0.23	0.72	0.28	10.00

Para determinar las diferencias relativas entre los resultados obtenidos en cada variante de colocación del cabeceo, se aplicó la ecuación (6) y se tomó como patrón los resultados obtenidos con el cabeceo en área neta.

$$D_r = \frac{|R_{neta(i)} - R_{efectiva(i)}|}{R_{neta(i)}} \quad (6)$$

Donde:

D_r : Diferencia relativa

$R_{neta(i)}$: Resultados en la variante del cabeceo en el área neta (patrón)

$R_{efectiva(i)}$: Resultados en la variante del cabeceo en las caras laterales.

Como se evidencia en la Tabla 7, la colocación del cabeceo en las caras laterales de los BHC registró una disminución de 12.50% en capacidad de carga y un 11.33% en la rigidez. Dicho comportamiento se debió a una concentración de carga que se generó cuando se redujo el área de aplicación de esta, concentrándose en las paredes laterales del BHC.

Posteriormente, se extrapoló el análisis a términos de esfuerzos. Para la determinación de los esfuerzos se utilizó el área neta para los BHCs con el cabeceo en el área neta y el área efectiva para la variante donde se colocó el cabeceo sobre las caras laterales. El módulo de Young fue calculado siguiendo una recta tangente al 40% del esfuerzo máximo, de acuerdo a lo establecido en las normas mexicanas [22, 26].

En la Tabla 8 se recogen los valores de los principales parámetros mecánicos de la curva esfuerzo-deformación para ambas formas de colocación del cabeceo.

Tabla 8. Comparación de los resultados en términos de esfuerzo en BHC.

Propiedades	Cabeceo sobre el área neta	COV	Cabeceo sobre las caras laterales	COV	Diferencias relativas (%)
Esfuerzo a compresión, (MPa)	11.27	0.10	14.82	0.20	-31.5
Módulo de elasticidad, (MPa)	5486	0.21	7570	0.23	-37.99
Deformación al esfuerzo máximo, (mm/mm)	0.0028	0.15	0.0029	0.19	-3.57
Deformación última, (mm/mm)	0.0040	0.23	0.0035	0.28	12.50

Como se aprecia en los datos, se destaca un aumento del módulo de Young de un 38% en la variante con el cabeceo colocado en las caras laterales.

En la Figura 16 se representan las curvas de carga-desplazamientos y esfuerzo-deformación para ambas formas de colocación del cabeceo, así como, las diferencias relativas entre ellas.

Como se muestra en la Figura 16, en la variante con el cabeceo en las caras laterales los BHC fallaron ante esfuerzos superiores (Figura 16b), aun cuando la capacidad de carga fue inferior (Figura 16a).

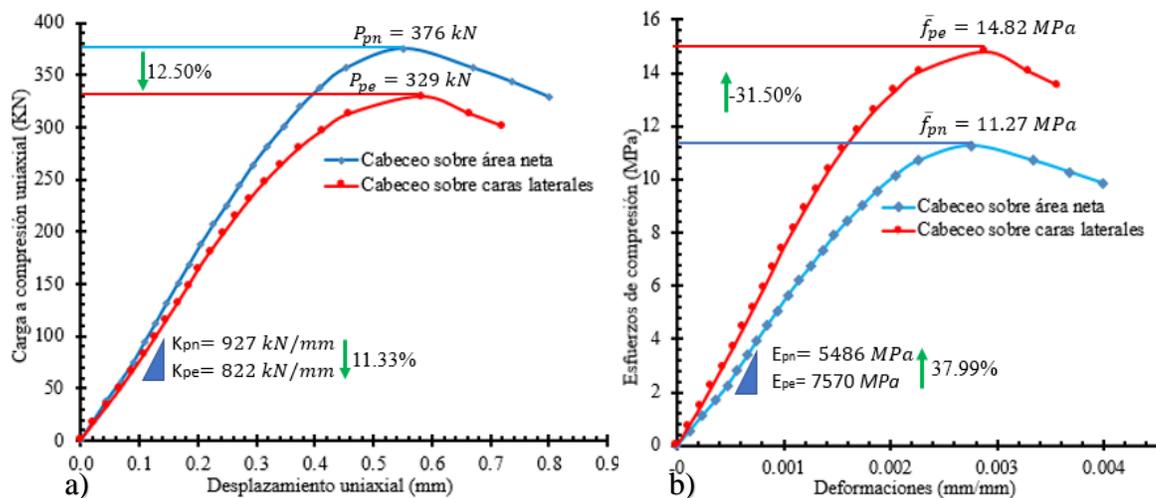


Figura 16. Comparación de las curvas medias experimentales para ambas formas de colocación del cabeceo: a) Carga-desplazamiento, b) Esfuerzo-deformación.

Esta contradicción está muy ligada a la expresión que se emplea para calcular los esfuerzos. Para ello, se utiliza la ecuación (7), en donde se divide la carga (P) entre el área (A) resultando el esfuerzo medio (σ) de la pieza.

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{7}$$

Al aplicar la ecuación (7) en los BHC debido a su geometría y a la heterogeneidad del material, los esfuerzos presentan una dispersión significativa, por lo que el esfuerzo medio obtenido no es representativo. Esto se acentúa en los BHC con el cabeceo colocado en las

caras laterales, donde se produce una mayor concentración de los esfuerzos y por tanto una concentración de las fallas.

Para evitar esta discordancia, se realizó la comparación determinando los esfuerzos sobre el área bruta (A_b), independientemente de la forma de colocación del cabeceo. Como se muestra en la Figura 17, al emplear la misma área de cálculo, se logra mantener la esencia del comportamiento, es decir, la colocación del cabeceo en las caras laterales disminuye la capacidad de carga y el esfuerzo máximo a la compresión.

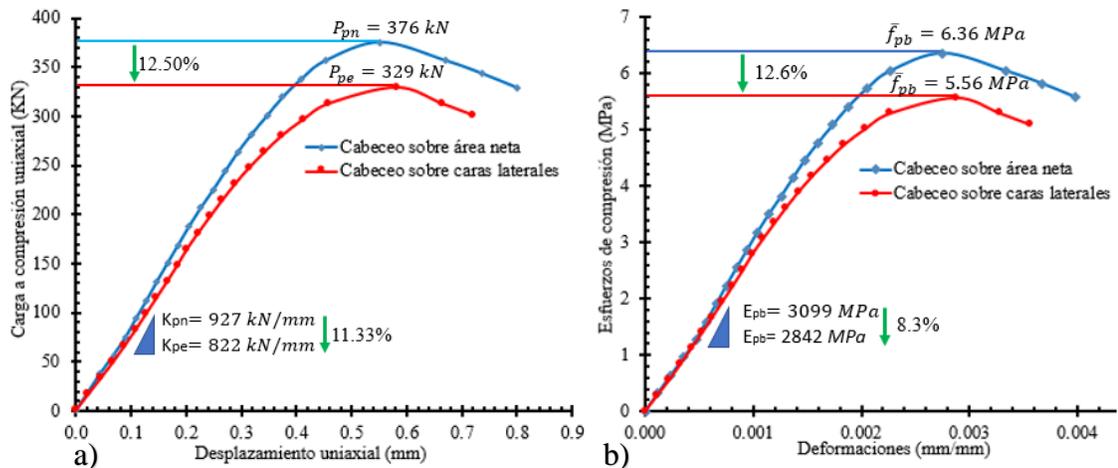


Figura 17. Comparación de las curvas medias experimentales para ambas formas de colocación del cabeceo a) Curva carga-desplazamiento, b) curva esfuerzo-deformación (Área bruta)

Referente a los modos de falla, cuando se colocó el cabeceo en el área neta, la falla inició con la aparición de grietas en las esquinas de los BHC, como se muestra en la Figura 18a. Estas grietas se fueron desarrollando de forma diagonal hacia el centro de las caras (Figura 18b y Figura 18c), provocando el desprendimiento de partes del BHC debido a las tensiones que se generan al expandirse el material y al efecto de confinamiento impuesto por la placa de acero en los extremos del bloque, véase Figura 18d.

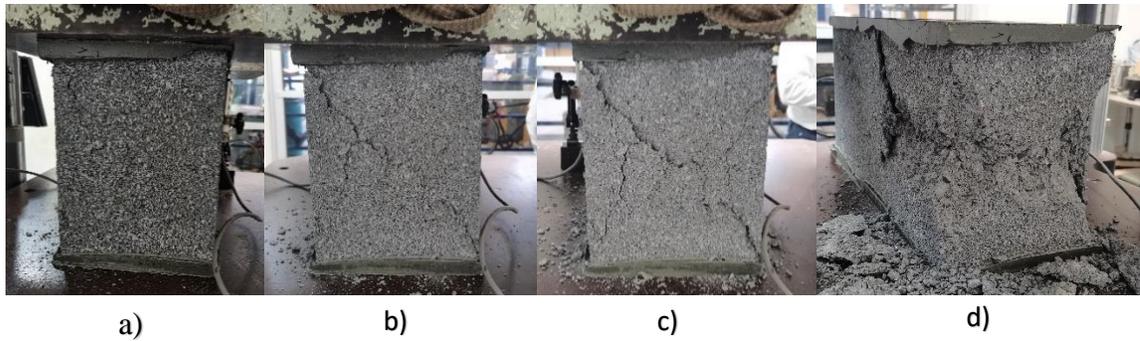


Figura 18. Fallas en los BHC con el mortero colocado en toda el área neta. Los incisos representan diferentes imágenes tomadas cronológicamente durante el ensayo.

Por otro lado, cuando el cabeceo se colocó en las caras laterales se generó una alta concentración de esfuerzos en las paredes laterales, Figura 19a. Posteriormente las grietas se desarrollaron en el sentido de las caras más alargadas del BHC provocando la pérdida de estabilidad local debido a las concentraciones de los esfuerzos que se producen en dichas caras (Figura 19b). Adicionalmente, como se constata en la Figura 19c, se producen grietas en las caras más cortas del BHC debido a la baja resistencia a la tensión de la pieza.

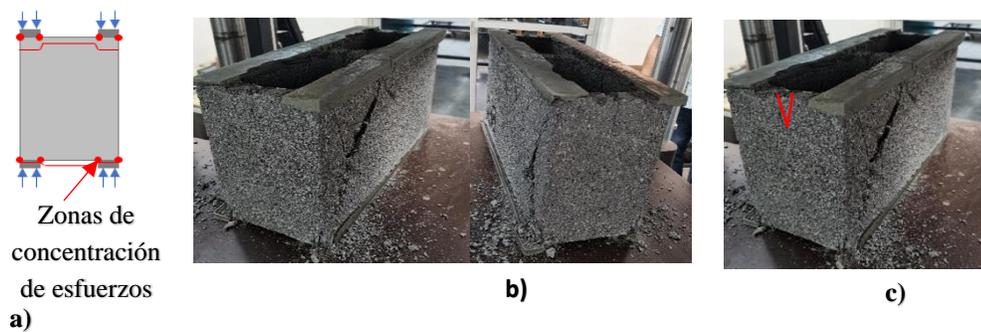


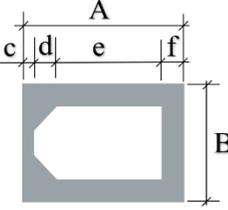
Figura 19. Modos de falla en BHC con el cabeceo colocado en las caras laterales.

2.1.4. Resultados en MBHCs.

Existen muy pocas investigaciones [28] que evalúan el comportamiento del caso frecuente del medio bloque hueco de concreto que se presenta en la construcción cotidiana. Por esto,

se decidió evaluar el comportamiento a compresión uniaxial de los BHC variando la geometría de la pieza. Para ello, se ensayaron medios bloques huecos de concreto (MBHC) para ambas variantes de colocación del cabeceo y se compararon los resultados con los obtenidos en los BHC. En la Tabla 9 se muestra las dimensiones de los MBHCs ensayados.

Tabla 9. Geometría de los MBHCs.

	γ_c	A_n	A_b	A_e	$\frac{A_n}{A_b}$	$\frac{A_e}{A_n}$	$\frac{A_e}{A_b}$
	kN/m^3	(cm^2)	(cm^2)	(cm^2)			
	19.50	152.24	283.95	107.33	0.54	0.70	0.38
A	B	c (cm)	d (mm)	e (mm)	f (mm)	altura (mm)	
19.70	14.60	14	62	97	27	19.50	

La **Tabla 10** recoge los valores en términos de carga de los principales parámetros mecánicos determinados en los MBHC, para ambas formas de colocación del cabeceo. De acuerdo con los resultados, el cabeceo en las caras laterales indujo una disminución de la capacidad de carga (P) y de la rigidez (k) en un 34.86% y un 44.77% respectivamente.

Tabla 10. Comparación de los resultados de los MBHC referente a la curva carga-desplazamiento para ambas formas de colocación del cabeceo.

Variables de la curva carga vs desplazamientos	Cabeceo sobre el área neta (COV)	Cabeceo en la cara lateral (COV)	Diferencia relativa (%)
Carga máxima (P) (kN)	259 (0.15)	169 (0.24)	+34.86
Rígidez (K) (kN/mm)	961 (0.17)	550 (0.23)	+44.77
Desplazamiento en la carga máxima δ_c (mm)	0.33 (0.16)	0.42 (0.15)	-27.27
Desplazamiento máximo δ_u (mm)	0.63 (0.19)	0.63 (0.14)	-
$\kappa = \delta_u/\delta_c$	1.89 (0.13)	1.54 (0.19)	+18.52

K: Pendiente de la recta secante al 40% de la carga máxima; *COV*: Coeficiente de variación (desviación típica o estandar /media arimética)
 κ : Índice de Ductilidad

En la Tabla 11, se muestran los resultados extrapolados a términos de esfuerzos para ambas variantes de colocación del cabeceo.

Tabla 11. Comparación de los resultados obtenidos de los MBHC referente a la curva esfuerzo-deformación para ambas formas de colocación del cabeceo.

VARIABLES DE LA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN	Cabeceo sobre el área neta (COV)	Cabeceo sobre las caras laterales (COV)	Diferencia relativa (%)
Esfuerzo de compresión f_c (MPa)	15.98 (0.17)	15.21 (0.23)	+4.82
Módulo de elasticidad E (MPa)	11743 (0.18)	10009 (0.22)	+14.77
Deformación al esfuerzo máximo ϵ_c (mm)	0.0017 (0.16)	0.002 (0.10)	-17.65
Deformación última ϵ_u (mm)	0.0024 (0.30)	0.003 (0.13)	-25.00

De acuerdo con los datos experimentales, se produjo una disminución en el módulo de elasticidad (E) y del esfuerzo máximo a la compresión (f_p) en un 14.77% y un 4.82% respectivamente. Como muestran los resultados la forma en que se coloca el cabeceo tuvo un menor impacto en el comportamiento a compresión de los MBHC. Esto se debe a la geometría de los especímenes, en los MBHC la contribución del refuerzo en la cara interior tiene una mayor contribución en la capacidad de carga del espécimen.

En contraposición a lo que ocurre en los BHC, en el caso de los MBHC se mantuvo la esencia del comportamiento, pues la colocación del cabeceo en las caras laterales disminuyó la capacidad de carga y el esfuerzo máximo a compresión.

En cuanto a los modos de falla de los MBHC, en ambas colocaciones del cabeceo se desarrolló en los BHC, la falla típica descrita en la sección anterior, véase Figura 20.

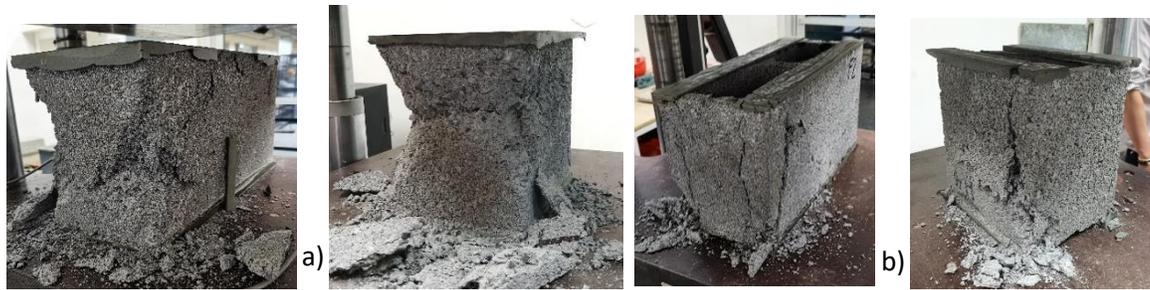


Figura 20. Modos de falla para ambas colocaciones del cabeceo: a) cabeceo en área neta, b) cabeceo en las caras laterales.

2.1.5. Comparación entre BHC y MBHC.

En esta sección se comparó el comportamiento a compresión uniaxial de los BHC y los MBHC. En términos de carga, la capacidad de carga se vio más afectada en la variante donde se colocó el cabeceo sobre las caras laterales. Como se muestra en la Tabla 12, las diferencias relativas son mayores cuando se coloca el cabeceo sobre las caras laterales debido a la disminución del área del espécimen en contacto con la platina.

Tabla 12. Comparación de los resultados obtenidos de los BHC y MBHC referente a la curva carga-desplazamiento.

Variables de la curva carga vs desplazamientos	Cabeceo sobre el área neta (COV)			Cabeceo sobre la cara lateral (COV)		
	BHC	MBHC	$Dr(\%)$	BHC	MBHC	$Dr(\%)$
Carga máxima (P) (kN)	376 (0.1)	259 (0.15)	31.12	319 (0.12)	169 (0.24)	+47.02
Rígidez (K) (kN/mm)	927 (0.19)	961 (0.17)	-3.67	730 (0.10)	550 (0.23)	+24.66
Desplazamiento en la carga máxima δ_c (mm)	0.55 (0.15)	0.33 (0.16)	+40.00	0.64 (0.10)	0.42 (0.15)	+34.38
Desplazamiento máximo δ_u (mm)	0.79 (0.23)	0.63 (0.19)	+20.25	0.80 (0.20)	0.63 (0.14)	+21.25

$Dr(\%)$: Diferencias relativas empleando como patrón el área neta

Como muestran los datos en la Tabla 13, en término de esfuerzo las diferencias relativas fueron superiores cuando se colocó el cabeceo en el área neta influenciado por la geometría de las piezas.

Tabla 13. Comparación de los resultados obtenidos de los BHC y los MBHC referente a la curva esfuerzo-deformación.

Variables de la curva esfuerzo vs deformación	Cabeceo sobre el área neta			Cabeceo sobre las caras laterales		
	BHC	MBHC	Dr(%)	BHC	MBHC	Dr(%)
Esfuerzo de compresión $f_c(MPa)(COV)$	11.27 (0.10)	15.98 (0.17)	-41.79	14.82 (0.20)	15.21 (0.23)	-6.07
Módulo de elasticidad $E(MPa)(COV)$	5486 (0.21)	11743 (0.18)	-114.05	7570 (0.23)	10009 (0.22)	-46.24
Deformación al esfuerzo máximo $\varepsilon_c(mm)(COV)$	0.0027 (0.15)	0.0017 (0.16)	+37.04	0.0029 (0.21)	0.002 (0.10)	+35.5
Deformación última $\varepsilon_u(mm)(COV)$	0.0039 (0.23)	0.0024 (0.30)	+38.46	0.0035 (0.30)	0.003 (0.13)	+23.1

Dr(%): Diferencias relativas empleando como patrón el área neta

2.2. Micro-modelación numérica (MEF)

Se realizó la modelación y la calibración de los modelos numéricos (MEF) de los BHC para ambas formas de colocación del mortero. Para la calibración del modelo se aplicó un diseño experimental del tipo factorial, formulado como un (3^4) , donde (4) representa el número de variables independientes y (3) representa el número de variaciones de dichas variables. En la Tabla 14, se muestran las variables que se tuvieron en consideración y los niveles de variación que se emplearon.

Tabla 14. Variables y niveles empleados en la calibración de los modelos de BHC.

Variables	Niveles de variación		
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Ángulo de dilatación	30	20	15
Daño en compresión	Sin daño	dc_1	dc_2
Daño en tensión	Sin daño	dt_1	dt_2
Tipo de elemento finito	C3D8R-C3D6	C3D8-C3D6	C3D8I-C3D6

dc_1 : Daño a partir del límite de fluencia

σ_i : Esfuerzo

dc_2 : Daño a partir del esfuerzo máximo

dt_1 : Daño a partir de la energía de fractura (GFI)

$$dt_2: 1 - \frac{\sigma_i/E}{0.9\varepsilon_i + \sigma_i/E}$$

ε_i : Deformación

E : Módulo de elasticidad

A partir del diseño factorial, se realizaron 81 simulaciones (véase Figura 21a), de las cuales 24 se mantuvieron dentro del margen del 10% de error que contempla la literatura.

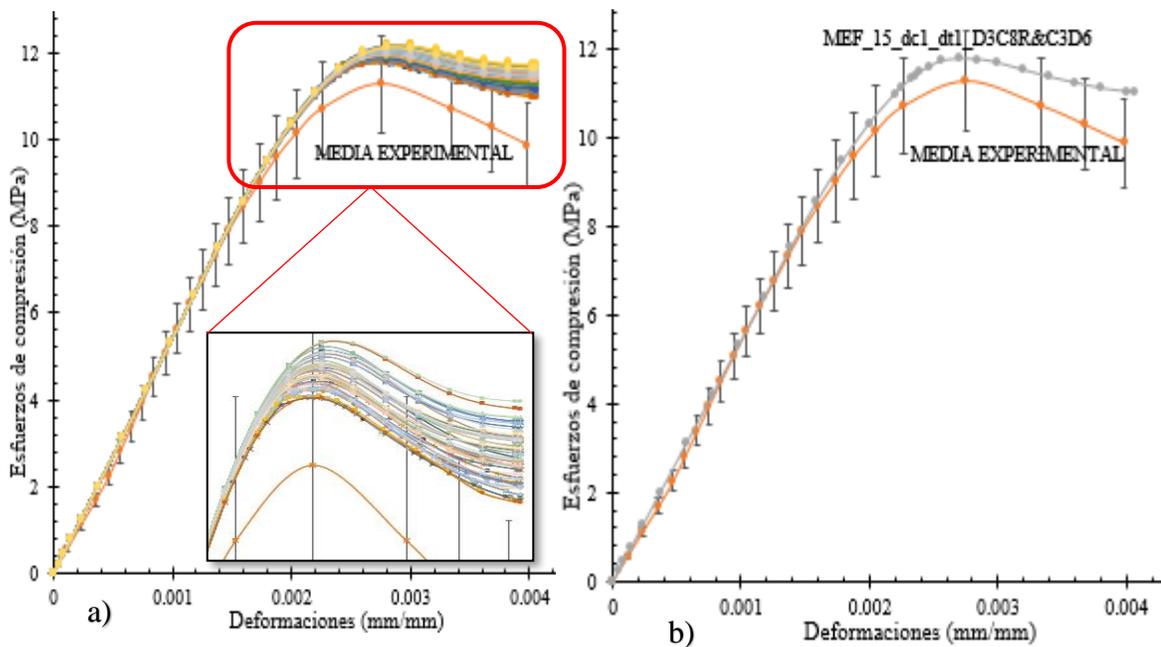


Figura 21. Representación de las 81 simulaciones.

En la Tabla 15, se muestra la relación de los 18 modelos que se mantuvieron dentro del intervalo del 10% de error, siendo el modelo MEF_15_0.9_GFI_C3D8R & C3D6 el que más se acercó a la media experimental, véase Figura 21b.

Tabla 15. Relación de los modelos que quedaron dentro del 10% de error.

Modelo	Ángulo de dilatación	Daño en compresión	Daño en tensión	Elemento finito
SP_full_MEF	30	0.9	GFI	C3D8R&C3D6
	15	0.9	GFI	C3D8R&C3D6
	15	0	GFI	C3D8R&C3D6
	20	0.9	0	C3D8R&C3D6
	20	0.9	GFI	C3D8R&C3D6
	15	0.9	0	C3D8R&C3D6
	15	0	0	C3D8R&C3D6
	15	dc_2	0	C3D8R&C3D6
	20	dc_2	0	C3D8R&C3D6
	15	dc_2	GFI	C3D8R&C3D6
	20	dc_2	GFI	C3D8R&C3D6
	20	dc_2	dt_2 :	C3D8R&C3D6
	15	dc_2	dt_2 :	C3D8R&C3D6
	15	dc_2	dt_2 :	C3D8I&C3D6
	15	0	dt_2 :	C3D8R&C3D6
	15	dc_1 :	dt_2 :	C3D8R&C3D6
	20	dc_1 :	dt_2 :	C3D8R&C3D6
	15	dc_1 :	dt_2 :	C3D8I&C3D6

En la Figura 22, se muestra una comparación entre los daños que mostraron los BHC durante los ensayos experimentales y el modelo de daño en compresión obtenido de las simulaciones (DAMAGEC) para ambas formas de colocación del cabeceo. Como se observa, el modelo de daños en compresión que mostraron las simulaciones representan en gran medida los daños realmente observados al finalizar el ensayo en los BHC.

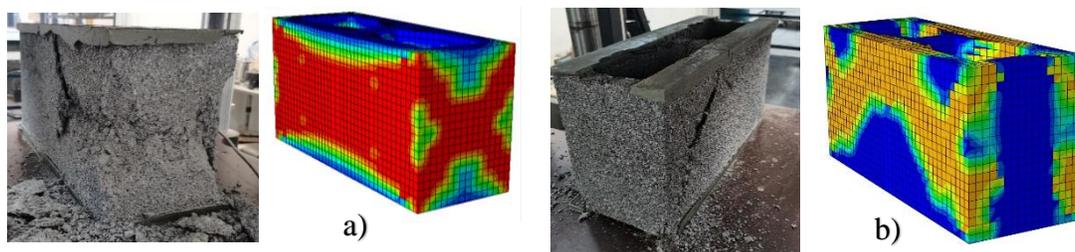


Figura 22. Comparación entre daño experimental y MEF. a) BHC con el cabeceo en el área neta, b) BHC con el mortero en las caras laterales.

2.3. Análisis estadístico

En este apartado se representa una descripción del análisis estadístico usado para determinar si las diferencias relativas obtenidas de los principales parámetros de la curva esfuerzo-deformación fueron estadísticamente significativas. Dentro de la curva esfuerzo-deformación se evaluaron el módulo de elasticidad, el esfuerzo máximo a compresión, la deformación al esfuerzo máximo y la deformación última.

Para ello, se realizaron varias pruebas tomando como referencia el esquema que se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, adaptado de [29].

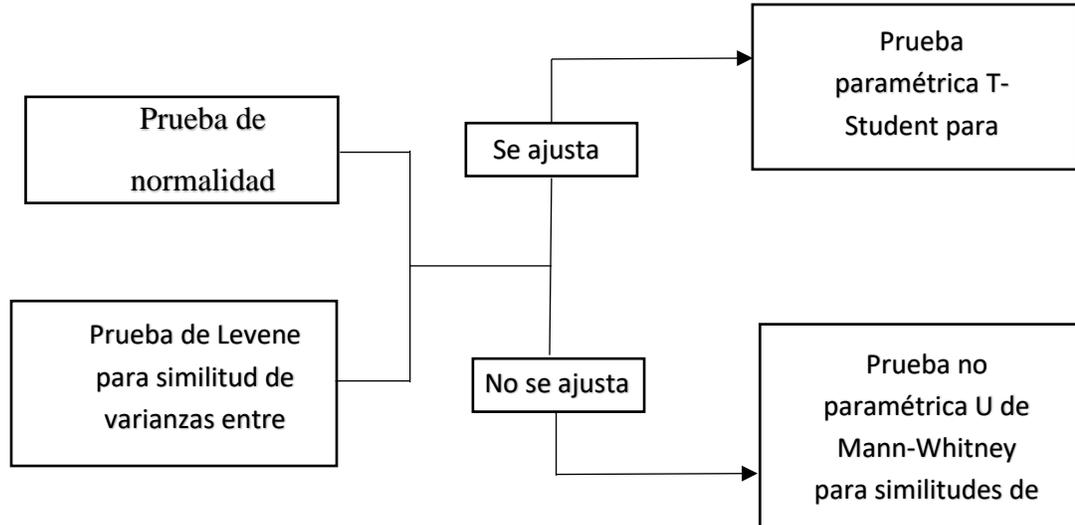


Figura 23. Esquema metodológico estadístico, adaptado de [29].

En primer lugar, se llevaron a cabo las pruebas de Shapiro-Wilk con el objetivo de demostrar que las muestras se ajustan a una distribución normal. Como se muestra en la Tabla 16, las ocho variables analizadas en los BHC mostraron un nivel de significación superior al asumido ($\alpha = 0.05$) lo que indica que las mismas se ajustan a una distribución normal [30, 31]. En el caso de lo MBHC, de las ocho variables siete mostraron una distribución normal con un nivel de significación superior al 5%, solo el esfuerzo máximo mostró una significancia inferior.

Tabla 16. Pruebas de normalidad.

Variables aleatorias	N	BHC				MBHC			
		Media	Shapiro-Wilk			Media	Shapiro-Wilk		
			Estadístico	gl.	Sig.		Estadístico	gl.	Sig.
f_{pn}	11	11.27	0.917	11	0.296	15.98	0.828	9	0.043
f_{pe}	11	14.82	0.921	11	0.328	15.21	0.959	9	0.971
E_{pn}	11	5486	0.912	11	0.258	11743	0.931	9	0.488
E_{pe}	11	7570	0.918	11	0.303	10009	0.979	9	0.960
ε_{cn}	11	0.0028	0.980	11	0.964	0.0017	0.914	9	0.348
ε_{ce}	11	0.0030	0.902	11	0.198	0.0020	0.976	9	0.940
ε_{un}	11	0.0040	0.965	11	0.831	0.0024	0.853	9	0.080
ε_{ue}	11	0.0037	0.978	11	0.951	0.0030	0.896	9	0.232

Posteriormente, se realizaron pruebas de homogeneidad de varianza con el objetivo de determinar la hipótesis a emplear para determinar si las diferencias entre las variables aleatorias son estadísticamente significativas.

Tabla 17. Resultados de las pruebas paramétricas.

Variables aleatorias	Prueba de Levene Sig.	Comparación de medias Sig.(bilateral)	Diferencias estadísticamente
BHC			
f_{pn} y f_{pe}	0.027	U de Mann-Whitney (0.002)	Significativa
E_{pn} y E_{pe}	0.309	Prueba t-Student (0.005)	Significativa
ε_{cn} y ε_{ce}	0.490	Prueba t-Student (0.568)	No Significativa
ε_{un} y ε_{ue}	0.779	Prueba t-Student (0.290)	No Significativa
MBHC			
f_{pn} y f_{pe}	N/A	U de Mann-Whitney (0.825)	No significativa
E_{pn} y E_{pe}	0.956	Prueba t-Student (0.132)	No significativa
ε_{cn} y ε_{ce}	0.672	Prueba t-Student (0.03)	Significativa
ε_{un} y ε_{ue}	0.028	U de Mann-Whitney (0.068)	Significativa

Como se observa en la Figura 24, de los parámetros de la curva esfuerzo-deformación analizados en los BHC, el módulo de Young y el esfuerzo máximo mostraron diferencias estadísticamente significativas. Por su parte, en los MBHC la deformación correspondiente al esfuerzo máximo y las deformaciones últimas fueron los parámetros de la curva esfuerzo-deformación que mostraron una diferencia significativa.

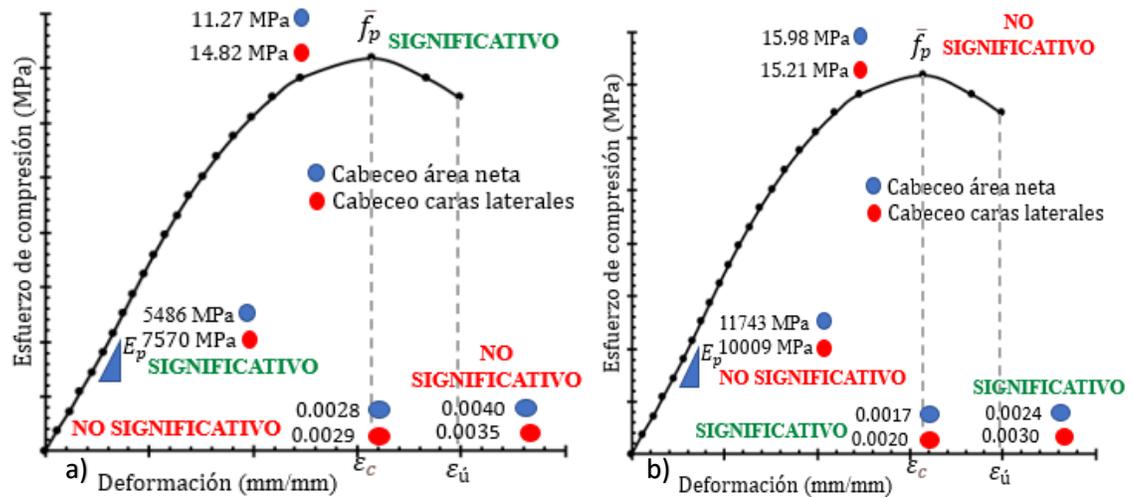


Figura 24. Representación de los parámetros mecánicos notables en la curva esfuerzo-deformación, a) BHC y b) MBHC.

2.4. Conclusiones preliminares

Del análisis de los resultados hasta ahora obtenidos en el presente capítulo, se llega a las siguientes conclusiones:

- Los BHC empleados en la experimentación resistieron un esfuerzo medio a la compresión de 6.36 MPa (sobre área bruta), por lo que no cumplen con los 9 MPa que establece la NTC-Mampostería [3].
- Colocar el cabeceo en las caras laterales provocó una disminución estadísticamente significativa de la rigidez y la capacidad de carga de los BHC. En

este sentido se redujo la capacidad de carga a compresión y la rigidez en un 13.29% y un 11.33% respectivamente.

- La forma de colocación del cabeceo modificó los mecanismos de falla de los BHC.
- En el caso de los MBHC, la colocación del cabeceo en las caras laterales tuvo una incidencia marcada en la disminución de la capacidad de carga y de la rigidez en un 34.86% y un 44.77% respectivamente.
- Se calibraron y validaron los modelos numéricos de los BHC, logrando reproducir mediante la micro-modelación numérica el comportamiento a compresión mostrado en los ensayos experimentales.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO III

3. Influencia de la forma de colocación del mortero en el comportamiento a compresión uniaxial en Pilas

En el presente apartado se recogen los procedimientos, ensayos y análisis realizados a las pilas construidas con BHC. En la Figura 25, se muestran una representación de la geometría de los especímenes ensayados (pilas).

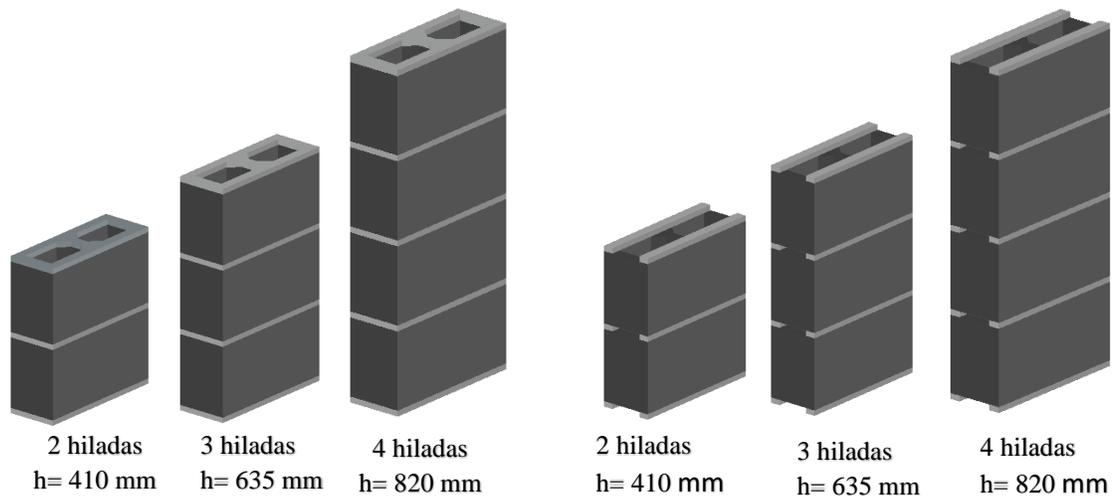


Figura 25. Tipos de pilas ensayadas en la campaña experimental: a) mortero en área neta, b) mortero en las caras laterales.

En una primera fase se realizaron ensayos experimentales para obtener las propiedades físico-mecánicas de las pilas con el mortero colocado en el área neta y en las caras laterales. Se ensayaron 40 pilas con el mortero colocado sobre el área neta y 40 pilas con el mortero colocado sobre las caras laterales. Para ambas configuraciones del mortero se dividió la muestra en cuatro grupos de pilas, con la variante de 2, 3 y 4 hiladas (Figura 25).

Posteriormente, se llevó a cabo la micro-modelación numérica de las pilas mediante el empleo del Método de Elementos Finitos (MEF), empleando como herramienta el programa ABAQUS/CAE.

Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico con el fin de evaluar si las diferencias entre los principales parámetros de la curva esfuerzo-deformación para ambas formas de colocación del mortero fueron significativas. Para ello, se realizaron pruebas de normalidad y de homogeneidad de varianza.

Finalmente, se realizó el análisis en conjunto de los resultados experimentales, la micro-modelación (MEF) y el análisis estadístico. Se compararon los resultados obtenidos con los de otros investigadores y se elaboraron las conclusiones.

3.1. Experimentación

3.1.1. Materiales

Para la construcción de las pilas se emplearon BHC con una geometría de dos celdas y dimensiones como las mostradas en la Tabla 5. Las propiedades físico-mecánicas de los BHC fueron analizadas en el capítulo 2.

Para el mortero de pega se utilizó un mortero tipo I, con una relación cemento-arena 1:6 y una resistencia a la compresión a los 28 días superior a 12.5 MPa, de acuerdo a lo que establecen las NTC-Mampostería [3]. El mezclado del mortero se realizó de forma mecánica, siguiendo los requerimientos estipulados en la NMX-C-085 [32]. Con el objetivo de obtener las propiedades mecánicas del mortero se llevaron a cabo pruebas a compresión y a tensión para obtener las curvas esfuerzo-deformación, a los 28 días. Para los ensayos a compresión del mortero se construyeron 10 cubos de 5cm de lado acorde a lo establecido por la NMX-C-061 [33]. Mientras que, para los ensayos de tensión se construyeron 12 briquetas respetando lo establecido en ASTM-C307 [25].

Todos los especímenes fueron instrumentados con galgas extensiométricas (strain gauges) con el objetivo de medir las deformaciones. En la Figura 26 es posible apreciar la colocación de las galgas en la superficie de los especímenes.

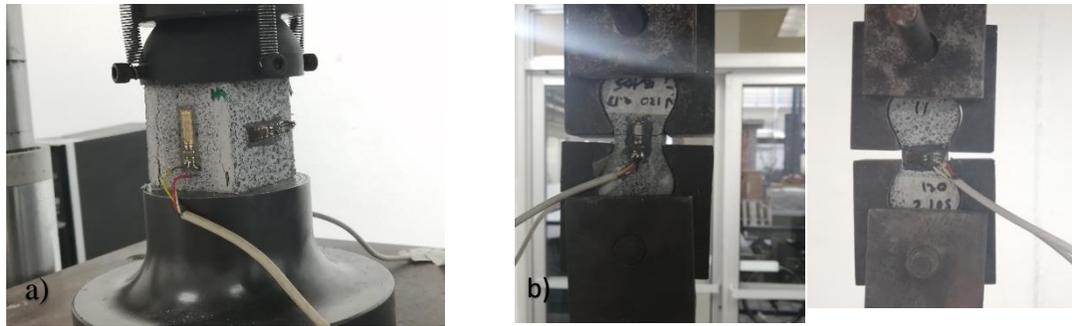


Figura 26. Instrumentación de especímenes para ensayos: a) cubos, b) briquetas.

A partir de las curvas de esfuerzo-deformación se obtuvieron propiedades mecánicas como: la resistencia a la compresión (f_{cm}), la resistencia a la tensión (f_{tm}), el módulo de Young (E_m) y el coeficiente de Poisson (ν_m). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Resultados experimentales del mortero a compresión.

Especímen	f_{cm} (MPa)	f'_{cm} (MPa)	E_{cm} (MPa)	ν_m	Deformación al esfuerzo máximo	Deformación última	Factor de ductilidad
1	19.49		16111	0.11	0.0011	0.0033	2.93
2	19.58		12312	0.33	0.0013	0.0034	2.46
3	13.42		10285		0.0017	0.0034	2.03
4	18.91		12694		0.0014	0.0042	2.95
5	13.81	12.90	11560		0.0010	0.0034	3.40
6	14.87		16896		0.0010	0.0034	3.71
7	19.27		16609		0.0011	0.0034	3.07
8	17.56		14049		0.0011	0.0035	3.12
9	17.5		6959		0.0019	0.0048	2.28
10	16.5		7091		0.0020	0.0046	1.94
Promedio	17.09		12457		0.0014	0.0037	2.79
Desv.St.	2.23		3427		0.0003	0.0005	0.56
Coef. Var.	0.13		0.28		0.26	0.14	0.20

Los resultados de resistencia a la compresión mostraron una media experimental igual a 17.09 MPa con un coeficiente de variación del 13%. El módulo de Young se calculó según

una recta tangente al 40% del esfuerzo máximo. una media experimental igual a 17.09 MPa, con un coeficiente de variación del 13%. El módulo de Young se calculó según una recta tangente al 40% del esfuerzo máximo.

A partir del esfuerzo máximo a compresión experimental y mediante el empleo de la ecuación (8) se calculó el esfuerzo máximo a compresión de diseño del mortero.

$$f'_{cm} = \frac{f_{cm}}{1 + 2.5COV} \quad (8)$$

Como se muestra en la Tabla 18 la resistencia a la compresión de diseño fue superior a los 12.5 MPa por lo que el mortero se clasifica como Tipo I [33]. **Tabla 18.** Resultados experimentales del mortero a compresión.

En la Figura 27 se muestran las curvas esfuerzo-deformación de los cubos, así como, la media experimental obtenida en los ensayos.

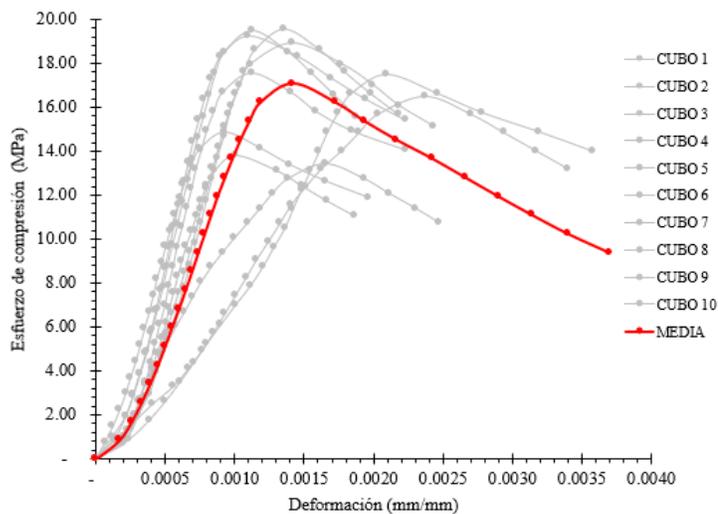


Figura 27. Curvas esfuerzo-deformación del mortero a compresión.

De igual manera, se ensayaron 12 briquetas con el objetivo de obtener el comportamiento del mortero a tensión y se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 19 y la Figura 28.

Tabla 19. Resultados experimentales del mortero a tensión.

Espécimen	f_{tm} (MPa)	E_{tm} (MPa)	Deformación al esfuerzo máximo
1	3.39	1808	0.0012
2	2.10	1575	0.0008
3	3.12	3335	0.0007
4	3.75	2814	0.0010
5	2.67	3042	0.0007
6	3.73	4424	0.0007
7	3.54	2849	0.0008
8	2.70	2136	0.0010
9	3.06	3563	0.0008
10	3.54	3818	0.0007
11	2.85	2075	0.0009
12	3.10	2816	0.0008
Promedio	3.13	2855	0.0008
Desv.St.	0.47	817	0.0002
Coef. Var.	0.15	0.29	0.19

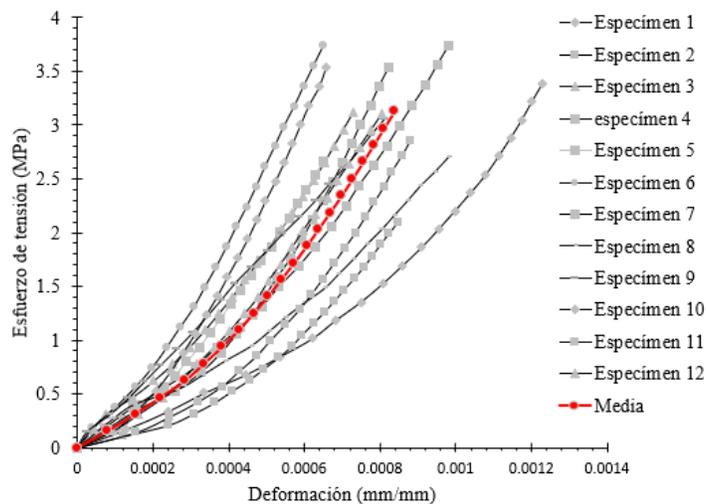


Figura 28. Curvas esfuerzo-deformación del mortero a tensión.

Como se muestra, se obtuvo un esfuerzo máximo a la tensión medio experimental de 3.13 MPa y un módulo de Young de 2855 MPa con un coeficiente de variación de 15% y 29% respectivamente.

Los modos de falla observados representan los esperados de acuerdo con la bibliografía[10, 15]. En efecto, conforme se incrementaba la carga aplicada, los cubos presentaron grietas desde la base, que se fueron desarrollando hacia el centro a 45°, provocando el desprendimiento de secciones del cubo hasta alcanzar una falla de forma cónica (Figura 29a). En el caso de las briquetas, la falla comenzó con grietas en el centro de la probeta y perpendiculares al sentido de aplicación de la carga. Estas grietas se desarrollaron hasta provocar el fallo brusco de la probeta, separando la briqueta en dos secciones (Figura 29b).

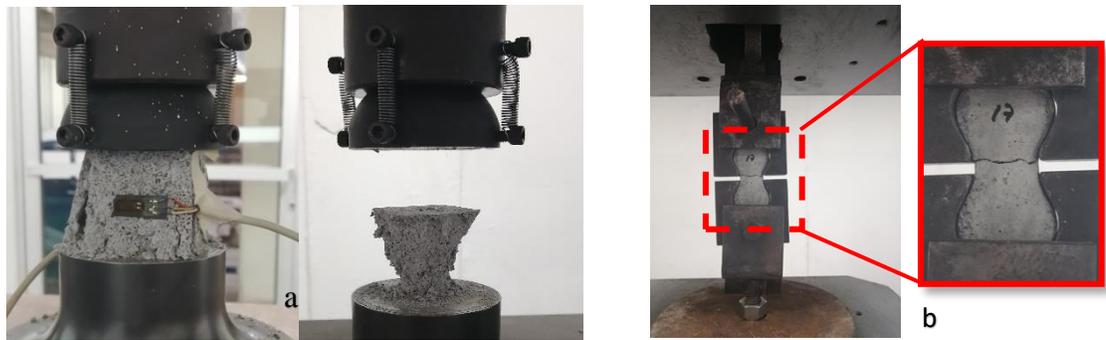


Figura 29. Modos de falla del mortero: a) Cubos, b) briquetas.

3.1.2. Instrumentación y ensayo de pilas.

Las pilas fueron instrumentadas con LVDTs (linear variable differential transformer), para medir los desplazamientos en el sentido de aplicación de la carga. Asimismo, se colocaron galgas extensiométricas (strain gauges) para medir las deformaciones, véase Figura 30. La recolección de los resultados se realizó mediante un adquisidor de datos, lo que permitió descargar y procesar la información una vez finalizado los ensayos.

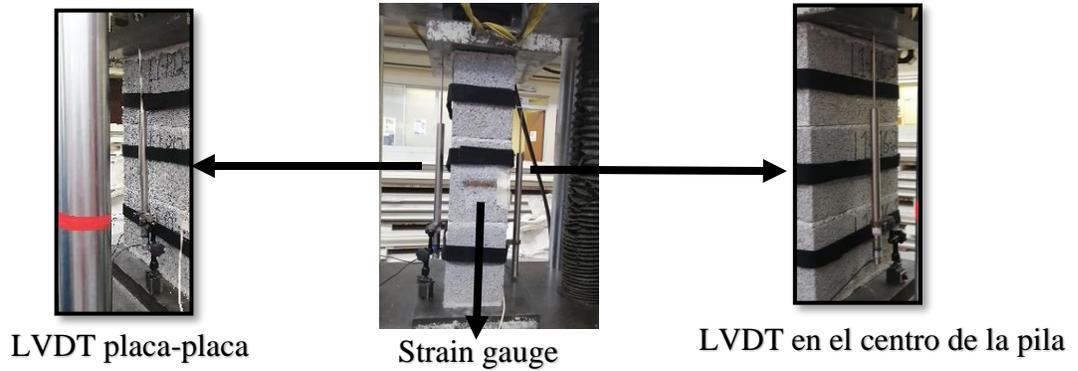


Figura 30. Instrumentación de pilas de tres hiladas.

El ensayo de las pilas a compresión axial, se realizó siguiendo lo establecido en la NMX-C-464 [22]. El equipo empleado para los ensayos estuvo en función de la altura máxima permisible de cada uno. La INSTRON permite una altura máxima de 60 cm, mientras que la Tinius OLSEN solo admite especímenes con una altura máxima de 80 cm. Por ello, teniendo en cuenta la altura de las pilas, unido a la altura del resto de la instrumentación tales como: placas metálicas y asiento esférico se requirió el empleo de varios equipos (Figura 31).



Figura 31. Equipamiento para la realización de los ensayos.

Para las pilas de dos hiladas, se utilizó la máquina universal INSTRON DX 600 (véase Figura 31a), lo que permitió realizar un control por desplazamiento con una velocidad de aplicación de la carga de 0.005 mm/s . Las pilas de tres hiladas se ensayaron en la Tinius

Olsen (véase Figura 31b) con una capacidad de carga de hasta 200 T. El resto de los especímenes conformados por pilas cuatro y cinco hiladas, se ensayaron empleando un actuador hidráulico con capacidad de carga 60t, sujeto a un marco de carga (véase Figura 31c). El marco de carga estuvo compuesto por dos columnas metálicas (IPN-30) y dos vigas canales unidos por pernos. En el caso de las pilas de tres a cinco hiladas se llevó a cabo un control por carga.

En un primer momento se obtuvieron las curvas esfuerzo-deformación de cada una de las configuraciones de pilas con el mortero colocado en el área neta, véase Figura 32.

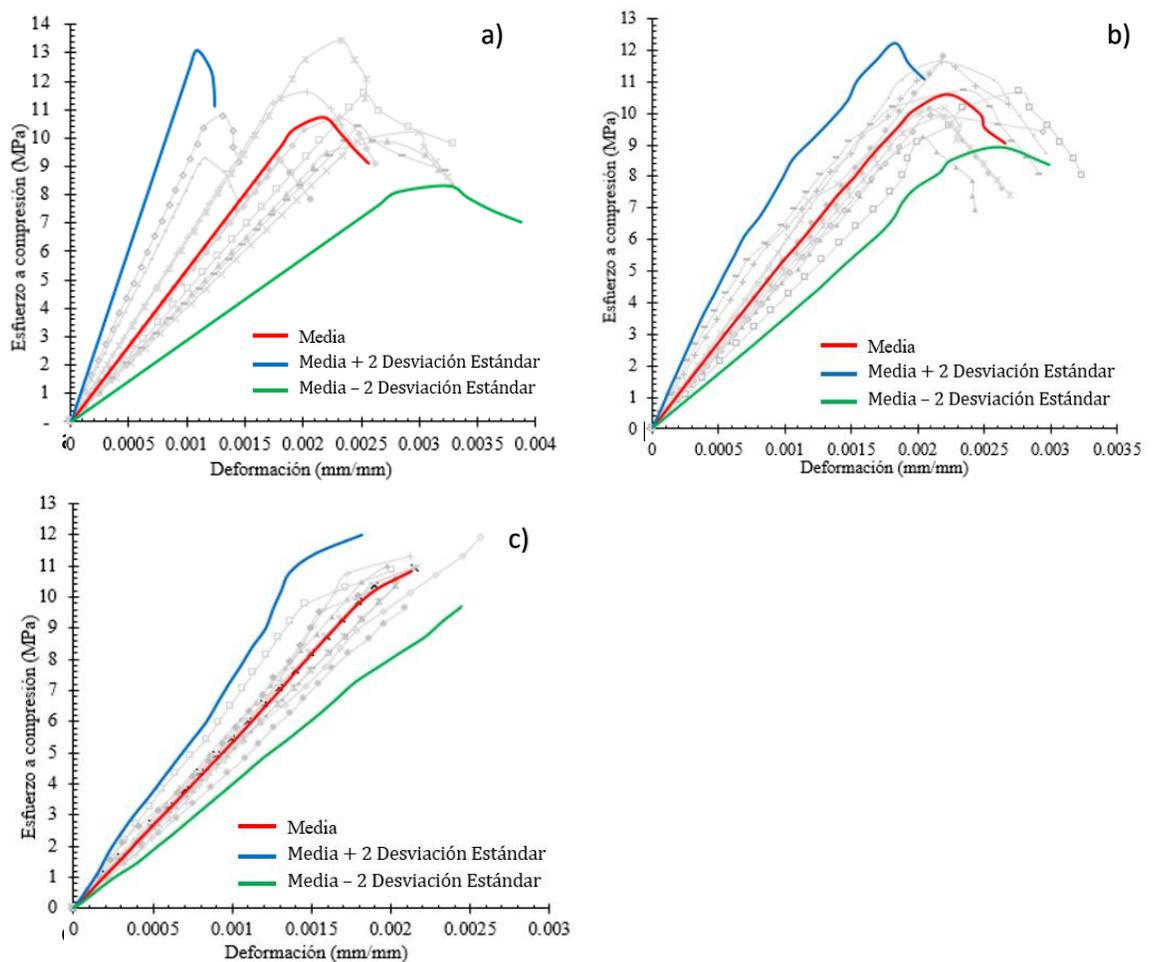


Figura 32. Curvas Esfuerzo-deformación de pilas con el mortero colocado en el área neta: a) pilas de 2 hiladas, b) pilas de 3 hiladas, c) pilas de 4 hiladas.

En la Tabla 20 se recogen los datos resultantes de los ensayos experimentales.

Tabla 20. *Parámetros de la curva esfuerzo-deformación de las pilas con el mortero colocado en el área neta.*

Parámetros de la curva esfuerzo vs deformación	Pilas de 2 hiladas	Pilas de 3 hiladas	Pilas de 4 hiladas
Esfuerzo de compresión $f_c(MPa)(COV)$	10.70 (0.11)	10.58 (0.08)	10.30 (0.05)
Módulo de elasticidad $E(MPa)(COV)$	5738 (0.28)	5543 (0.18)	5391 (0.11)
Deformación al esfuerzo máximo $\epsilon_c(mm)(COV)$	0.0022 (0.26)	0.0022 (0.09)	0.0019 (0.10)
Deformación última $\epsilon_u(mm)(COV)$	0.0026 (0.27)	0.0028 (0.11)	0.0021 (0.07)

Como se observa, el esfuerzo máximo a la compresión disminuyó en la medida en que aumentó la altura de las pilas, lo que demuestran la relación entre la esbeltez de los especímenes y el comportamiento a compresión de la mampostería.

Referente a los modos de falla, se observó el aplastamiento del mortero en la interfaz con la platina de acero debido al afecto de confinamiento. Esto provocó esfuerzos de tensión en las caras de los BHC ocasionando grietas verticales (Figura 33). En el caso de las pilas de cuatro hiladas este fenómeno se intensificó debido a la influencia de la esbeltez induciendo la pérdida de estabilidad de la pila.

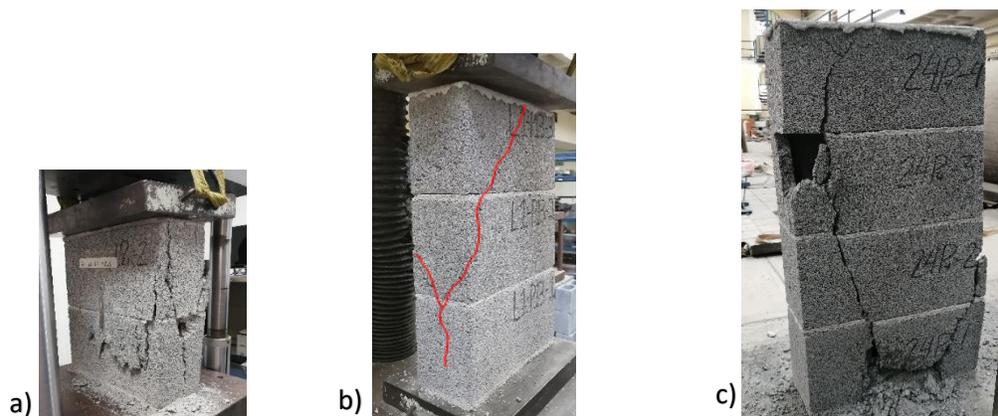


Figura 33. *Modos de fallas en pilas con el mortero colocado en el área neta en: a) dos hiladas, b) tres hiladas y c) cuatro hiladas.*

De manera general, las fallas que se presentaron en las muestras fueron similares a las reportadas en diferentes publicaciones para una mampostería conformada por bloque débil y mortero fuerte [2, 7, 15].

En un segundo momento se obtuvieron las curvas esfuerzo-deformación de las pilas con el mortero colocado en las caras laterales.

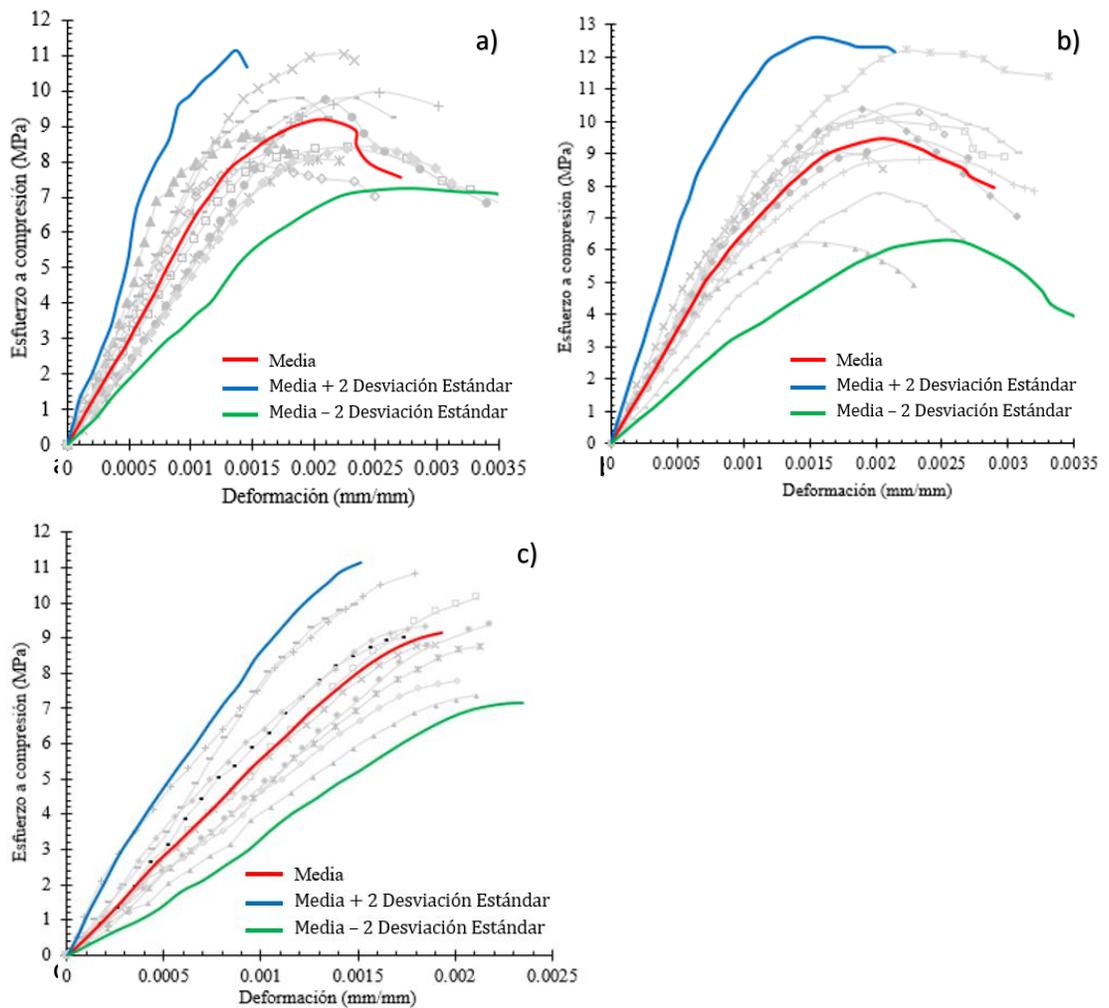


Figura 34. Curvas Esfuerzo vs deformación de pilas con el mortero colocado en las caras laterales: a) 2 hiladas, b) 3 hiladas, c) 4 hiladas.

En la Tabla 21 se recogen los valores medios de los principales parámetros de la curva esfuerzo-deformación para cada una de las tipologías de pilas ensayadas.

Tabla 21. Parámetros de la curva esfuerzo-deformación de las pilas con el mortero colocado en las caras laterales.

Parámetros de la curva esfuerzo vs deformación	Pilas de 2 hiladas	Pilas de 3 hiladas	Pilas de 4 hiladas
Esfuerzo de compresión $f_c(MPa)(COV)$	9.19 (0.11)	9.47 (0.17)	9.14 (0.11)
Módulo de elasticidad $E(MPa)(COV)$	6169 (0.19)	7071 (0.15)	5690 (0.24)
Deformación al esfuerzo máximo $\epsilon_c(mm)(COV)$	0.0021 (0.17)	0.0021 (0.13)	0.0019 (0.11)
Deformación última $\epsilon_u(mm)(COV)$	0.0027 (0.28)	0.0028 (0.14)	0.0019 (0.11)

Como demuestran los datos, la colocación del mortero sobre las caras laterales tuvo incidencia en el esfuerzo máximo a la compresión y en el módulo de Young. Por otro lado, la forma de colocación del mortero no incidió notablemente en las deformaciones.

Referente a los modos de falla, cuando el mortero se colocó en las caras laterales de los BHC las principales fallas se generaron en las caras alargadas, asociadas a las concentraciones de esfuerzo que se generan, Figura 35. En este sentido, aparecieron grietas en las esquinas inducidas por los esfuerzos de tensión, las que se extendieron en forma diagonal hacia el centro de las caras laterales de las pilas. Por su parte, las pilas de cuatro hiladas fallaron de forma explosiva.



Figura 35. Modos de fallas en pilas con el mortero colocado en las caras laterales: a) pilas de dos hiladas, b) pilas de tres hiladas.

Para analizar la influencia de la posición del mortero en el comportamiento a compresión de la mampostería, se seleccionó como espécimen, la pila de tres hiladas de acuerdo con lo establecido en las normativas mexicanas. Al comparar los resultados para ambas formas de colocación del mortero, se observó una disminución de 10.49% del esfuerzo máximo en las pilas donde el mortero se colocó en las caras laterales, véase Tabla 22.

Tabla 22. Comparación de los resultados de las pilas en función de la forma de colocación del mortero.

Propiedades	Cabeceo colocado sobre el área neta	COV	Cabeceo colocado sobre las caras laterales	COV	Diferencias relativas (%)
Esfuerzo a compresión, (MPa)	10.58	0.08	9.47	0.17	10.49
Módulo de elasticidad, (MPa)	5543	0.18	7071	0.15	-27.57
Deformación al esfuerzo máximo, (mm/mm)	0.0022	0.09	0.0021	0.13	4.54
Deformación última, (mm/mm)	0.0028	0.11	0.0028	0.14	-

La disminución de la resistencia a compresión en las pilas con el mortero colocado en las caras laterales es consistente con el comportamiento observado por otros autores. En efecto, Salah R et Edward G [10], reportaron una disminución del esfuerzo máximo a la compresión en pilas cuando el mortero se colocó en las caras laterales. De manera similar, Tatheer et al [34] en el año 2021 obtuvieron una disminución de un 10.71% en el esfuerzo máximo a la compresión cuando se colocó el mortero en las caras laterales. La diferencia entre ambas investigaciones puede atribuirse a la geometría y las propiedades de los materiales empleados.

Por otro lado, cuando se colocó el mortero en las caras laterales se generaron concentraciones de esfuerzo que conllevaron a un aumento del módulo de Young en un 27.57%.

Sin embargo, las deformaciones (al esfuerzo máximo y última) no variaron independientemente de la forma en que se colocó el mortero.

3.2. Micro-modelación numérica (MEF)

3.2.1. Validación y calibración de los modelos (MEF)

Adicionalmente a los ensayos experimentales, se realizó la micro-modelación numérica (MEF), calibración y validación de los modelos de las pilas de BHC. Para la calibración se realizó un análisis paramétrico donde se evaluó la influencia de diferentes parámetros en la curva esfuerzo-deformación de las pilas con el mortero colocado en las caras laterales. Para ello, se realizaron 93 simulaciones analizando parámetros como: el ángulo de dilatación (ϕ), parámetro de viscosidad, el coeficiente de forma (k), el coeficiente de fricción y la densidad de malla. En la Tabla 23, se muestran los parámetros y sus niveles de variación, basados en investigaciones anteriores [1, 2, 11, 35-37] y en los resultados obtenidos en cada simulación.

Tabla 23. *Parámetros empleados en la calibración de los modelos numéricos.*

Parámetros	Niveles de variación					
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6
Ángulo de dilatación (ϕ)	45	30	25	15	-	-
Parámetro de viscosidad	0.0005	0.0001	0.001	0.01	-	-
Coeficiente de forma (k)	1	0.85	0.66	0.50	-	-
Formulación matemática del elemento finito	C3D8	C3D8R	C3D8I	-	-	-
Tamaño de malla	8	10	15	20	25	30
Coeficiente de fricción	0.95	0.85	0.75	0.60	-	-

Para la modelación de los especímenes se utilizó un elemento finito cuadrático de 8 nodos con tres grados de libertad (C3D8). Dentro de este tipo de elemento finito se analizaron las variantes matemáticas de integración reducida (C3D8R) y no compatible (C3D8I).

Como se observa en la Figura 36, el C3D8 fue el que mejor se ajustó a la curva media experimental.

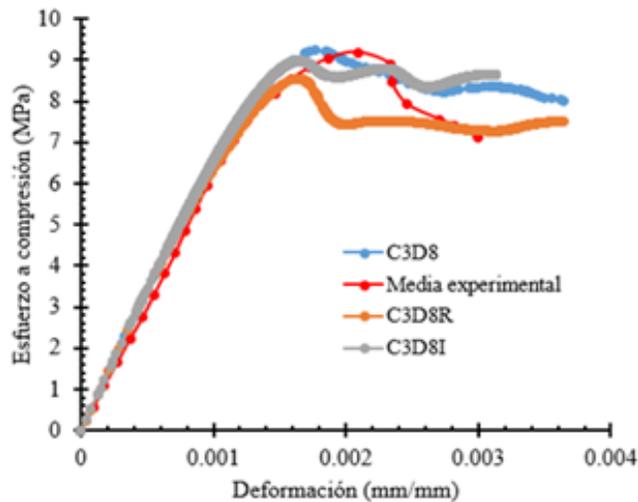


Figura 36. Comparación entre las diferentes estructuras matemáticas analizadas.

El tamaño de malla fue otra de las variables analizadas, ya que tiene un impacto en los errores obtenidos y en el tiempo de duración de las simulaciones. Este parámetro se varió en un intervalo de 8 a 30mm, y para determinar el más adecuado, se tuvo en cuenta el error obtenido y el tiempo de duración de cada simulación. Como se observa en la Figura 37, a medida que aumenta el tamaño de malla disminuye el error, pero aumentan los tiempos y con ello el uso de los recursos computacionales. Desde el punto de vista de los errores, es posible emplear mallas en el intervalo de 8 a 15mm, obteniéndose un error inferior al 5%. Buscando un balance entre los errores obtenidos y el tiempo de duración de las simulaciones, se seleccionó un tamaño de malla de 10mm con un error inferior al 1% y un tiempo de duración de las simulaciones intermedio entre los obtenidos con los mallados de 8 y 15mm, véase Figura 37.

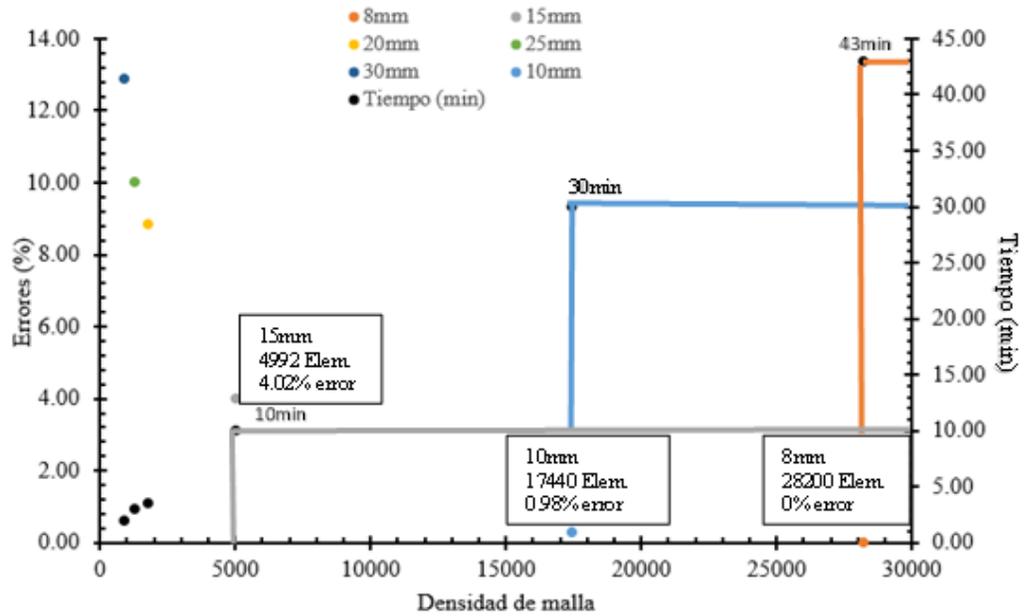


Figura 37. Representación de densidad de malla vs errores y tiempo de simulación.

Referente al ángulo de dilatación y el parámetro de viscosidad se eligieron los valores de 300 y 0.0005 respectivamente, al ser los que más se ajustan a la curva media experimental, véase Figura 38a y b.

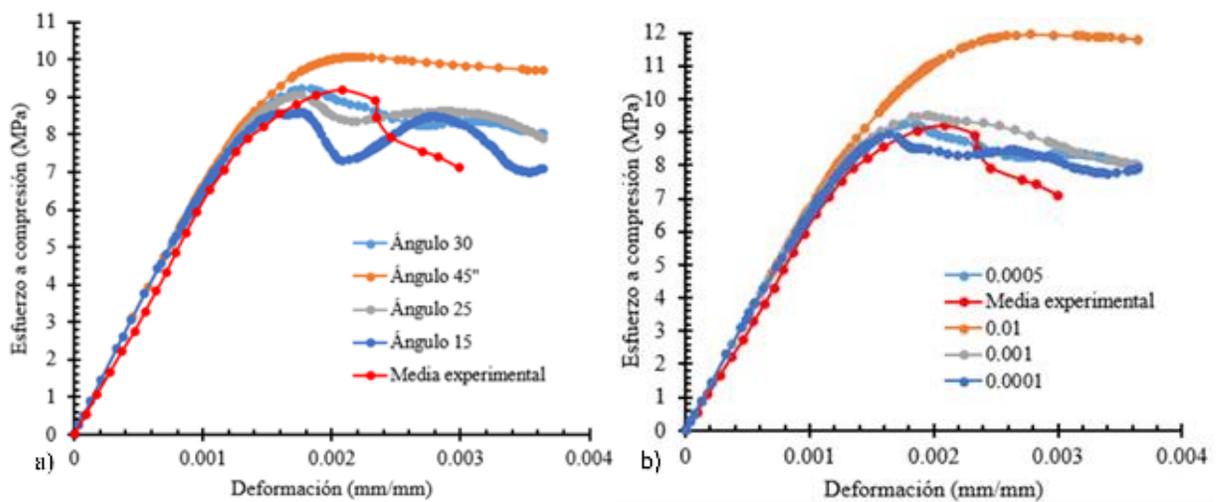


Figura 38. Parámetros: a) ángulo de dilatación, b) coeficiente de viscosidad.

En el caso de los coeficientes de forma (k) (Figura 39a) y de fricción (Figura 39b), no se manifestaron diferencias significativas en los resultados obtenidos, se consideró el 0.66 y 0.75 respectivamente por ser los valores más empleados en investigaciones anteriores [1, 2].

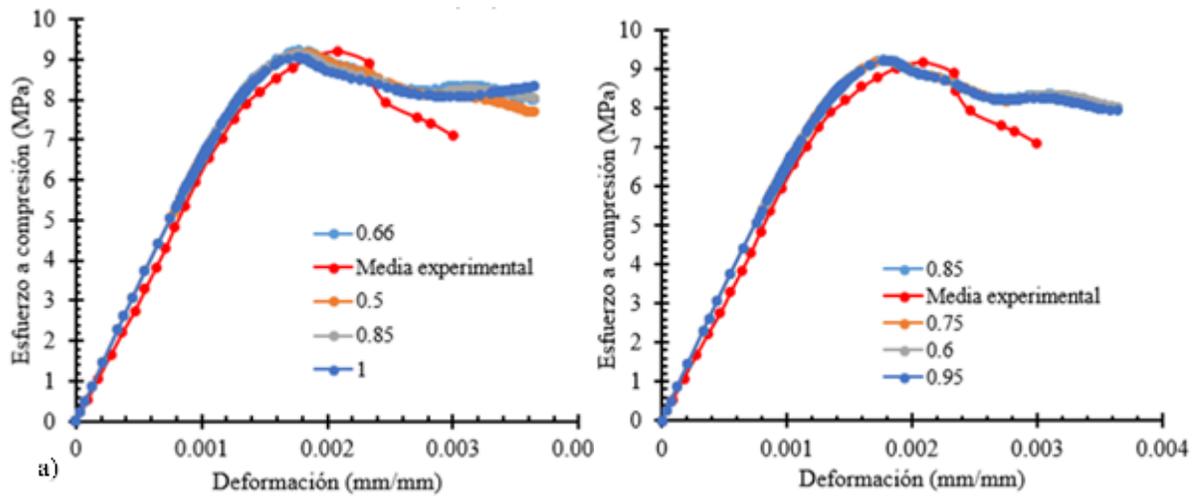


Figura 39. Representación de: a) coeficiente de forma, b) coeficiente de fricción.

Los parámetros usados para el modelo calibrado se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Parámetros de los modelos numéricos.

Parámetros	Valores	Parámetros	Valores
Ángulo de dilatación (φ)	30	Formulación matemática del elemento finito	C3D8
Parámetro de viscosidad	0.0005	Tamaño de malla	10 mm
Coefficiente de forma (k)	0.66	Coefficiente de fricción	0.75

Para la validación del modelo, se cambió la posición del mortero colocándolo en el área neta y se mantuvieron los parámetros y las propiedades de los materiales del modelo calibrado. Los resultados obtenidos se compararon con la curva esfuerzo-deformación

resultante de los ensayos experimentales de las pilas con el mortero colocado en el área neta. Como se muestra en la Figura 40, se logró una representación aproximada entre el comportamiento del modelo numérico y los resultados experimentales.

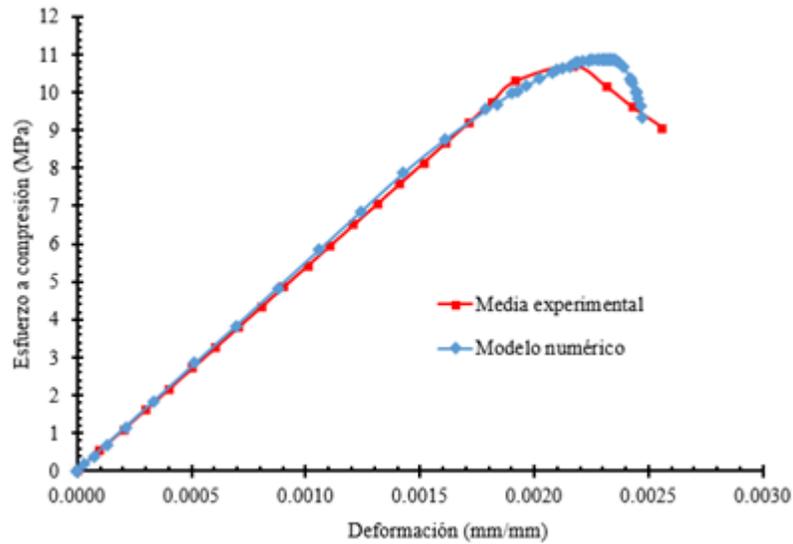


Figura 40. Comparación entre la curva esfuerzo-deformación del modelo numérico calibrado y la curva esfuerzo-deformación experimental con el mortero colocado en el área neta.

Otra manera de validar el modelo fue mediante la comparación de los modos de falla mostrados por los modelos numéricos con los modos de falla de las pilas en los ensayos experimentales. Como se muestra en la Figura 41, el modo de falla mostrado por los modelos numéricos representa los modos de falla obtenidos en la campaña experimental.

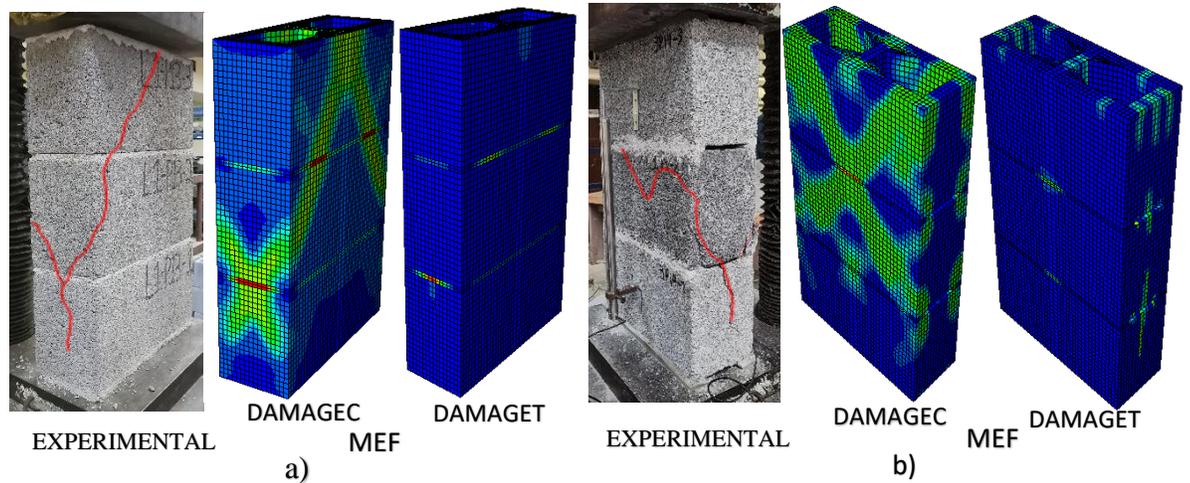


Figura 41 Comparación de modos de falla en pilas de 3BHC: a) mortero en área neta, b) mortero en las caras laterales.

3.2.2. Análisis paramétrico en pilas de tres hiladas

Una vez calibrados y validados los modelos de pilas de tres hiladas, se realizó un análisis paramétrico donde se tuvieron en cuenta la resistencia a la compresión del bloque (\bar{f}_{pn}), la resistencia a la tensión del bloque (f_{tb}), la resistencia a la compresión del mortero (f_{cm}) y la resistencia a la tensión del mortero (f_{tm}). En la Tabla 25 se muestran los niveles de variación de los parámetros analizados, mismos que están basados en los resultados de los ensayos realizados como parte de esta investigación, así como, en resultados tomados de otros autores(referencia).

Tabla 25. Variables empleadas en el análisis paramétrico.

\bar{f}_{pn} (MPa)	f_{tb} (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{tm} (MPa)
6.77	0.51	4.25	0.765
11.27	0.90	7.50	1.35
15.40	1.155	17.09	3.13
18.10	1.3575	-	-
19.80	1.485	-	-
28.66	2.18	-	-

A partir de estas variables se realizaron 18 combinaciones para cada variante de colocación del mortero: en el área neta y en las caras laterales. Para ello, se utilizó el programa ABAQUS CAE y se obtuvieron el esfuerzo máximo a la compresión y el módulo de Young para cada una de las combinaciones.

Tabla 26. Resultado de las 36 combinaciones analizadas. (18 con el mortero colocado en el área neta y 18 con el mortero en las caras laterales)

\bar{f}_{pn} (MPa)	f_{tb} (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{tm} (MPa)	f_{c_n} (MPa) (Mortero en área neta)	E_n (MPa) (Mortero en área neta)	f_{c_e} (MPa) (Mortero en caras laterales)	E_e (MPa) (Mortero en caras laterales)
6.77	0.51	4.25	0.765	5.3	2003	4.88	2449
6.77	0.51	7.5	1.35	5.56	2036	5.21	2499
6.77	0.51	17.09	3.13	5.87	2061	5.46	2547
11.27	0.9	4.25	0.765	8.97	5120	8.16	6136
11.27	0.9	7.5	1.35	9.82	5354	8.64	6525
11.27	0.9	17.09	3.13	11.02	5502	9.35	6802
15.40	1.155	4.25	0.765	11.41	6657	10.36	7875
15.40	1.155	7.5	1.35	12.56	7045	11.05	8512
15.40	1.155	17.09	3.13	14.49	7310	11.79	8994
18.10	1.3575	4.25	0.765	13.06	8528	11.76	9992
18.10	1.3575	7.5	1.35	14.22	9168	12.89	10985
18.10	1.3575	17.09	3.13	16.59	9494	14.25	11761
19.80	1.485	4.25	0.765	14.21	8560	13.22	9988
19.80	1.485	7.5	1.35	15.62	9205	13.92	11017
19.80	1.485	17.09	3.13	18.75	9682	14.39	11904
28.66	2.18	4.25	0.765	19.64	8678	18.63	10032
28.66	2.18	7.5	1.35	20.76	9340	18.96	11127
28.66	2.18	17.09	3.13	23.99	9846	20.79	12015

3.3. Factor de corrección por esbeltez.

Otro de los aspectos que se analizó fue la influencia del factor de corrección por esbeltez (FC) que establece la NTC-Mampostería [3] en la estimación de la resistencia a la compresión de la mampostería elaborada con BHC.

Para medir la resistencia a la compresión de la mampostería, se realizan pruebas de compresión uniaxial utilizando máquinas de prueba de compresión y empleando placas metálicas que garanticen la distribución de la carga, estas imponen fricción en los extremos superior e inferior de las pilas. Esta fricción provoca el confinamiento lateral de las pilas en sus extremos. Si la altura de la pila es lo suficientemente grande con respecto a otras dimensiones, el efecto de confinamiento lateral en los extremos de las pilas tiene una menor influencia en la resistencia a la compresión obtenida.

La NTC-Mampostería [3] establece un mínimo de tres piezas a utilizar en los especímenes que se emplean para determinar experimentalmente la resistencia a la compresión de la mampostería.

Por ello, se tomó como patrón de referencia las pilas de 3 hiladas y se determinaron las diferencias relativas entre los resultados obtenidos experimentalmente para cada una de las relaciones de esbeltez, obteniéndose valores que llegan hasta un 13.18%, véase Tabla 27.

Tabla 27. Factor de corrección por esbeltez (FC) según la NTC-Mampostería.

Espécimen	$f''_{cp} (MPa)$	a/e	FC	$f''_{cp} (MPa)$ Corregida	Diferencias relativas (%)
2 hiladas	10.70	2.79	0.868	9.29	13.18
3 hiladas	10.58	4.32	1.016	10.75	Patrón
4 hiladas	10.30	5.54	1.055	10.87	-5.53

Empleando los modelos numéricos ya calibrados y validados se realizó un análisis paramétrico obteniendo el esfuerzo máximo a la compresión de la mampostería para diferentes combinaciones de propiedades. Para ello, se realizaron 32 simulaciones variando cuatro aspectos de los modelos. En primer lugar, se varió la geometría de las pilas empleando configuraciones empleadas en otras investigaciones. De igual manera se tuvieron en consideración las dos resistencias a compresión del mortero que dan clasificación al mismo y dos resistencias de BHC tomadas de ensayos experimentales realizados previamente en las instalaciones del Instituto de ingeniería civil de la UANL. Por último, se consideraron las dos formas de colocación del mortero de pega analizadas

durante toda esta investigación. Los niveles de variación de cada una de las propiedades se recogen en la Tabla 28.

Tabla 28. *Parámetros empleados en la micro-modelación para la evaluación del factor de corrección por esbeltez.*

Parámetros	Niveles de variación			
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Número de hiladas de las pilas	2 hiladas	3 hiladas	4 hiladas	5 hiladas
Resistencia a la compresión del BHC (MPa)	6.77	11.27	-	-
Resistencia a la compresión del mortero (MPa)	7.5	17.09	-	-
Forma de colocar el mortero de pega	FULL	FACE	-	-

FULL: Mortero colocado en el área neta del BHC
FACE: Mortero colocado en las caras laterales del BHC

En la Tabla 29 se recogen los valores de resistencia a la compresión para cada una de las combinaciones propuestas en el análisis paramétrico.

Tabla 29. *Resultados de las 32 simulaciones (análisis paramétrico).*

Pilas	Mortero de 7.5 MPa				Mortero de 17.09 MPa			
	BHC (6.77 MPa)		BHC (11.27 MPa)		BHC (6.77 MPa)		BHC (11.27 MPa)	
	FULL	FACE	FULL	FACE	FULL	FACE	FULL	FACE
2 hiladas	5.47	5.24	10.01	8.89	5.75	5.32	10.90	9.24
3 hiladas	5.56	5.21	9.82	8.53	5.86	5.49	10.94	9.22
4 hiladas	5.64	5.03	9.74	8.25	6.07	5.47	10.92	8.93
5 hiladas	5.22	4.98	9.06	8.27	5.63	5.49	9.83	8.95

Como muestran los datos, en el esfuerzo máximo a la compresión determinado para cada pila, además de la esbeltez de las pilas, también incidió la relación entre la resistencia a la compresión del BHC y el mortero. Cuando se empleó un mortero con una resistencia a la compresión de 7.5 MPa y un BHC de 6.77 MPa la variación de la resistencia a la compresión de las pilas en función de la altura estuvo en el rango de 0.08 a 0.42 MPa. Por otro lado, al emplear un mortero con una resistencia a la compresión de 7.5 MPa y un BHC de 11.27 MPa la variación estuvo en el rango de 0.08 a 0.68 MPa.

A partir de los resultados obtenidos se propondrán nuevos factores de corrección (FC*) que abarquen una mayor muestra en cuanto a calidades de BHC y morteros, así como, la forma de colocación del mortero de pega.

En la Tabla 30, se muestran en rojo los valores de esfuerzo correspondientes a las relaciones de esbeltez de los especímenes ensayados. A partir de estos valores se realizó una interpolación y se obtuvieron los valores de esfuerzo correspondientes a los números enteros de relaciones de esbeltez.

Tabla 30. Valores de esfuerzos que le corresponden a los valores enteros de relación de esbeltez.

BHC resistencia baja		
$f'_{cp}(MPa)$	a/e	FC
3.86	2	0.66
5.75	2.98	0.99
5.75	3	0.99
5.83	4	1
5.86	4.21	1
5.98	5	1.03
6.07	5.62	1.04
5.95	6	1.02
5.64	7	0.98
5.63	7.03	0.96

Con los valores obtenidos y manteniendo como patrón de referencia la relación de esbeltez con valor igual a 4, se determinaron las nuevas propuestas de factores de corrección de esbeltez (FC*) para morteros Tipo I (Tabla 31) y morteros Tipo II (Tabla 32).

Tabla 31. Propuesta de nuevos factores de corrección por esbeltez (FC*) (mortero Tipo I).

a/e	Mortero en área neta		Mortero en caras laterales	
	BHC bajo	BHC medio	BHC bajo	BHC medio
2	0.66	0.57	0.65	0.67
3	0.99	1	0.97	1
4	1	1	1	1
5	1.03	1	1	1.02
6	1.02	0.97	1	0.97
7	0.98	0.90	1	0.97

Tabla 32. Propuesta de nuevos factores de corrección por esbeltez (FC*) (mortero Tipo II).

a/e	Mortero en área neta		Mortero en caras laterales	
	BHC bajo	BHC medio	BHC bajo	BHC medio
2	0.66	0.68	0.67	0.69
3	0.99	1.01	1	1.03
4	1	1	1	1
5	1	0.99	0.98	0.97
6	1	0.97	0.96	0.96
7	0.94	0.92	0.95	0.96

Con los nuevos factores de corrección se determinó el esfuerzo máximo a compresión de diseño. En la Tabla 33 se muestra la comparación entre los esfuerzos máximos a la compresión de diseño calculados empleando los factores de corrección por esbeltez de la normativa mexicana (FC) y los nuevos factores (FC*).

Tabla 33. Nuevos factores de corrección (FC*) aplicados a los resultados experimentales.

Espécimen	f''_{cp} (MPa)	a/e	FC	f''_{cp} (MPa) Corregida	Diferencias relativas (%)	FC*	f''_{cp} (MPa) Corregida	Diferencias relativas (%)
2 hiladas	10.70	2.79	0.868	9.29	13.18	0.91	9.34	11.72
3 hiladas	10.58	4.32	1.016	10.75	Patrón	1	10.58	Patrón
4 hiladas	10.30	5.54	1.055	10.87	-5.53	0.984	10.13	4.25

Como muestran los datos, al emplear los nuevos factores (FC*) se logra una disminución de las diferencias relativas al emplear diferentes tipologías de pilas, tomando como referencia las pilas de tres hiladas como lo establece la normativa mexicana. Cabe resaltar que los nuevos factores de corrección por esbeltez (FC*) son válidos para las tipologías de pilas con analizadas, utilizando BHC y morteros dentro del rango de resistencias establecidos en el análisis paramétrico (Tabla 28).

3.4. Análisis estadístico

En este apartado se describirá el análisis estadístico llevado a cabo para determinar si las diferencias relativas entre los principales parámetros de la curva esfuerzo-deformación fueron estadísticamente significativas. Al igual que en el caso de los BHC, las propiedades de la curva esfuerzo-deformación evaluadas fueron: el módulo de elasticidad, el esfuerzo máximo a compresión, la deformación al esfuerzo máximo y la deformación última.

En primer lugar, se llevaron a cabo las pruebas de Shapiro-Wilk con el objetivo de comprobar que las muestras se ajustan a una distribución normal, Para ello, se utilizó el programa IBM SPSS Statistics 19.

Como se muestra en la Tabla 34, de las ocho variables analizadas solo el esfuerzo a compresión, para ambas formas de colocación del mortero (f_{pn} , f_{pe}) mostró un nivel de significación superior al asumido ($\alpha = 0.05$) lo que indica que las mismas se ajustan a una distribución normal [30, 31].

Tabla 34. Pruebas de normalidad.

Variables aleatorias	N	Media	Shapiro-Wilk		
			Estadístico	gl.	Sig.
Mortero colocado en área neta					
f_{pn}	18	13.44	0.972	18	0.828
E_{pn}	18	6977	0.850	18	0.009
ε_{cn}	18	0.0024	0.861	18	0.013
ε_{un}	18	0.0026	0.826	18	0.004
Mortero colocado en caras laterales					
f_{pe}	18	11.88	0.958	18	0.571
E_{pe}	18	8397	0.871	18	0.019
ε_{ce}	18	0.0021	0.822	18	0.003
ε_{ue}	18	0.0028	0.880	18	0.026

Posteriormente, se realizaron pruebas de homogeneidad de varianza con el objetivo de determinar cuál prueba de hipótesis emplear para determinar si las diferencias entre las variables aleatorias son estadísticamente significativas, véase Tabla 35.

Tabla 35. Resultados de las pruebas paramétricas.

Variables aleatorias	Prueba de Levene Sig.	Comparación de medias Sig.(bilateral)	Diferencias estadísticamente
f_{pn} y f_{pe}	0.555	Prueba t-Student (0.354)	No Significativa
E_{pn} y E_{pe}	N/A	U de Mann-Whitney (0.066)	No Significativa
ε_{cn} y ε_{ce}	N/A	U de Mann-Whitney (0.019)	Significativa
ε_{un} y ε_{ue}	N/A	U de Mann-Whitney (0.921)	No Significativa

N/A: No aplica

Como se observa en la Figura 42, de los parámetros de la curva esfuerzo deformación analizados, la deformación al esfuerzo máximo mostró diferencias estadísticamente significativas.

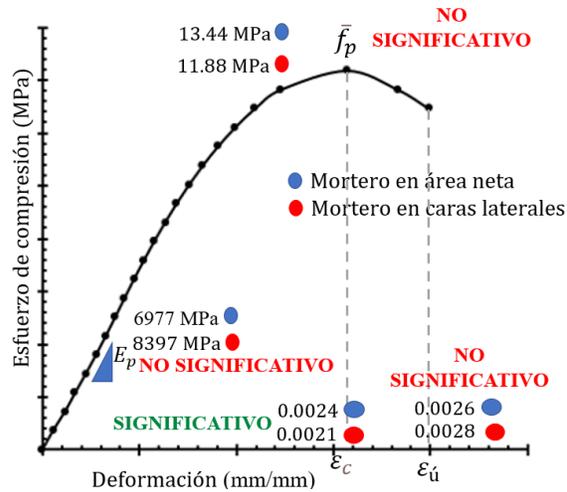


Figura 42. Representación de los parámetros mecánicos notables en la curva esfuerzo-deformación de pilas de tres hiladas.

3.5. Nuevas expresiones matemáticas para la predicción del esfuerzo máximo a la compresión y el módulo de Young.

En este apartado se describen los métodos empleados para la obtención de los modelos matemáticos a partir de la técnica de regresión lineal. Empleando esta técnica y teniendo en cuenta la información obtenida en el análisis paramétrico realizado, se obtuvieron nuevas expresiones matemáticas. Dichas expresiones serán capaces de predecir el esfuerzo máximo a la compresión y el módulo de Young, en función de las variables independientes definidas.

Se proponen dos ecuaciones para la estimación de la resistencia a la compresión, una para cada variante de colocación del mortero (área neta y área efectiva).

Para ello, se empleó el modelo matemático (véase (9) que plantea el código Europeo [6], el cual ha sido utilizado por otros autores [1] para comparar con los resultados obtenidos de la micro-modelación numérica (MEF).

$$f_{cn} = K * f_{cb}^{\alpha} * f_{cm}^{\beta} \tag{9}$$

Donde:

f_{cn} : Resistencia a la compresión de pilas con el mortero en área neta

f_{cb} : Resistencia a la compresión del bloque

f_{cm} : Resistencia a la compresión del mortero

Posteriormente, se realizó el modelo de regresión no lineal obteniéndose los parámetros k^* , α^* y β^* que conformarán la ecuación propuesta. En la Tabla 36, se muestran los valores obtenidos para cada uno de los parámetros con el correspondiente estadístico (R^2). Como se aprecia en la tabla, el valor obtenido indica que el modelo explica el 99.2% de la variabilidad del esfuerzo máximo a la compresión.

Tabla 36. Estimación de los parámetros para la variante del mortero colocado en el área neta.

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%		R^2 (%)
			Límite inferior	Límite Superior	
K^*	0.831	0.063	0.696	0.965	99.2
α^*	0.869	0.023	0.820	0.918	
β^*	0.165	0.014	0.135	0.195	

Para la variante del mortero colocado en el área neta se propone la ecuación (10):

$$f_{*cn} = 0.831 * f_{cb}^{0.869} * f_{cm}^{0.165} \quad (10)$$

Posteriormente, el proceso fue replicado para obtener los valores de los parámetros para la variante del mortero colocado en las caras laterales. Como se muestra en la Tabla 37, el estadístico (R^2) indica que el modelo explica el 99.7% de la variabilidad del esfuerzo máximo a la compresión.

Tabla 37. Estimación de los parámetros para la variante del mortero colocado en las caras laterales.

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%		R ² (%)
			Límite inferior	Límite Superior	
K	0.804	0.041	0.717	0.891	99.7
α	0.893	0.015	0.860	0.926	
β	0.089	0.009	0.69	0.109	

Para la variante con el mortero colocado en las caras laterales se propone la ecuación (11):

$$f *_{ce} = 0.804 * f_{cb}^{0.893} * f_{cm}^{0.089} \quad (11)$$

Una vez obtenidas las ecuaciones se calculó el por ciento de error relativo entre los resultados obtenidos aplicando la ecuación propuesta y los resultados de la micro-modelación numérica (MEF). Para ello, se aplicó la ecuación (12).

$$E_r = \frac{|R_{MEF(i)} - R_{n(i)}|}{R_{MEF(i)}} \quad (12)$$

Donde:

E_r : Error relativo

$R_{MEF(i)}$: Resultados MEF (patrón)

$R_{n(i)r}$: Resultados del modelo numérico

En la Tabla 38 se muestran los errores relativos, así como, el error medio absoluto (EMA, obtenido con la ecuación (13) entre los valores de esfuerzo a compresión determinados mediante la micro modelación numérica y la aplicación de la ecuación propuesta para la variante del mortero colocado en el área neta.

Tabla 38. Errores relativos entre los valores de esfuerzo a la compresión obtenidos mediante MEF y aplicando la ecuación propuesta para la variante del mortero colocado en el área neta.

\bar{f}_{pn} (MPa)	f_{tb} (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{tm} (MPa)	f_{cn} (MPa) (MEF)	f_{cn} (MPa) (Ecuación(10))	E_r (%)
6.77	0.51	4.25	0.765	5.3	5.56	4.61
6.77	0.51	7.5	1.35	5.56	6.10	8.89
6.77	0.51	17.09	3.13	5.87	6.99	16.04
11.27	0.9	4.25	0.765	8.97	8.65	3.7
11.27	0.9	7.5	1.35	9.82	9.50	3.36
11.27	0.9	17.09	3.13	11.02	10.88	1.25
15.40	1.155	4.25	0.765	11.41	11.34	0.57
15.40	1.155	7.5	1.35	12.56	12.46	0.80
15.40	1.155	17.09	3.13	14.49	14.28	1.5
18.10	1.3575	4.25	0.765	13.06	13.05	0.05
18.10	1.3575	7.5	1.35	14.22	14.34	0.82
18.10	1.3575	17.09	3.13	16.59	16.43	1.00
19.80	1.485	4.25	0.765	14.21	14.11	0.69
19.80	1.485	7.5	1.35	15.62	15.50	0.77
19.80	1.485	17.09	3.13	18.75	17.76	5.57
28.66	2.18	4.25	0.765	19.64	19.46	0.93
28.66	2.18	7.5	1.35	20.76	21.37	2.86
28.66	2.18	17.09	3.13	23.99	24.49	2.02
					EMA	3.08 %

$$EMA = \frac{\sum \frac{|R_{MEF(i)} - R_{n(i)}|}{R_{MEF(i)}}}{N} \quad (13)$$

Donde:

EMA: Error medio absoluto

N: número de iteraciones

De igual manera se determinaron los errores relativos y el error medio absoluto (EMA, ecuación (13)) entre los valores de esfuerzo máximo a compresión obtenidos mediante la

micro modelación numérica y la aplicación de la ecuación propuesta para la variante del mortero colocado en las caras laterales, Tabla 39.

Tabla 39. Errores relativos entre los valores de esfuerzo a la compresión obtenidos mediante MEF y la ecuación propuesta para la variante del mortero sobre las caras laterales.

\bar{f}_{pn} (MPa)	f_{tb} (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{tm} (MPa)	f_{ce} (MPa) (MEF)	f_{ce} (MPa) (Ecuación(10(11))	E_r (%)
6.77	0.51	4.25	0.765	4.88	5.05	3.31
6.77	0.51	7.5	1.35	5.21	5.31	1.87
6.77	0.51	17.09	3.13	5.46	5.71	4.44
11.27	0.9	4.25	0.765	8.16	7.96	2.46
11.27	0.9	7.5	1.35	8.64	8.37	3.23
11.27	0.9	17.09	3.13	9.35	9.01	3.80
15.40	1.155	4.25	0.765	10.36	10.52	1.47
15.40	1.155	7.5	1.35	11.05	11.06	0.10
15.40	1.155	17.09	3.13	11.79	11.90	0.96
18.10	1.3575	4.25	0.765	11.76	12.15	3.19
18.10	1.3575	7.5	1.35	12.89	12.78	0.87
18.10	1.3575	17.09	3.13	14.25	13.75	3.62
19.80	1.485	4.25	0.765	13.22	13.16	0.45
19.80	1.485	7.5	1.35	13.92	13.84	0.54
19.80	1.485	17.09	3.13	14.39	14.90	3.42
28.66	2.18	4.25	0.765	18.63	18.31	1.74
28.66	2.18	7.5	1.35	18.96	19.26	1.58
28.66	2.18	17.09	3.13	20.79	20.73	0.28
					EMA	2.07 %

Para la obtención de las expresiones de estimación del módulo de Young se realizó una correlación entre los valores de resistencia a la compresión y el módulo de Young obtenidos en la micro-modelación numérica (MEF). Para ello, se tomó como variable dependiente el módulo de Young quedando el esfuerzo a compresión como variable independiente.

Como se observa en la Figura 43, el estadístico (R^2) indica que la línea de tendencia se ajustó un 95.45% en la variante donde se colocó el mortero en el área neta y un 95.73% cuando se colocó el mortero en las caras laterales.

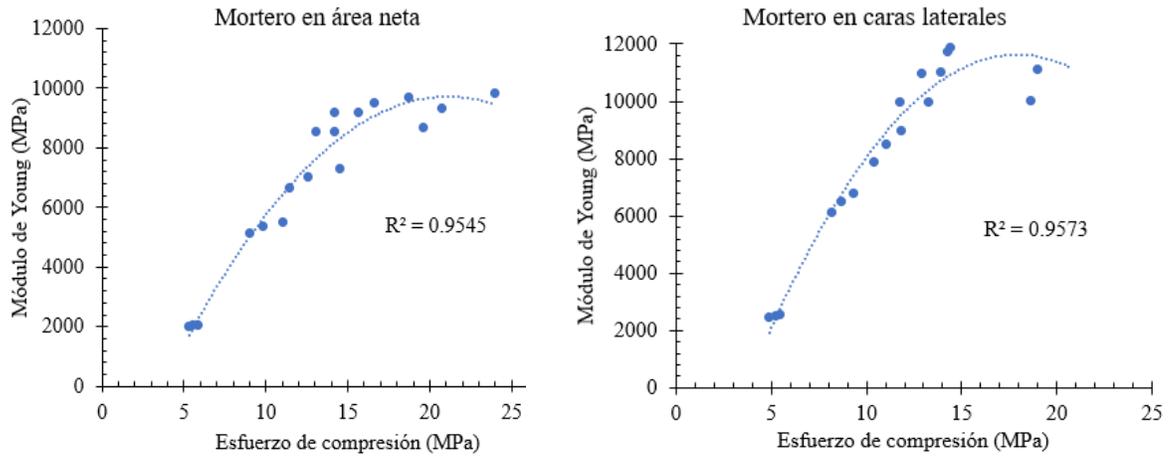


Figura 43. Correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de Young para ambas formas de colocación del mortero.

Como resultado de la correlación se propone para la estimación del módulo de Young la ecuación (14 para la variante del mortero colocado en el área neta y la ecuación (15 para la variante del mortero colocado en las caras laterales.

$$E_{mn} = -31.925f *_{cn} + 1349.6f *_{cn} - 4544.5 \quad (14)$$

$$E_{me} = -57.333f *_{ce} + 2052.3f *_{ce} - 6732 \quad (15)$$

Donde:

E_{mn} : Módulo de Young variante con el mortero colocado en área neta.

$f *_{cn}$: Esfuerzo a compresión variante con el mortero colocado en área neta

E_{me} : Módulo de Young variante con el mortero colocado en las caras laterales.

$f *_{ce}$: Esfuerzo a compresión variante con el mortero colocado en las caras laterales.

Posteriormente se calcularon los errores relativos y absolutos entre los resultados obtenidos empleando las expresiones propuestas y los resultados de la micro-modelación numérica (MEF), Tabla 40.

Tabla 40. Errores relativos y absolutos entre MEF y las ecuaciones propuestas para ambas variantes de colocación del mortero.

Mortero sobre área neta			Mortero sobre caras laterales		
E_n (MPa) (MEF)	E_{mn} (MPa) (14)	E_r (%)	E_e (MPa) (MEF)	E_{mn} (MPa) (14Ecuación (15)	E_r (%)
2003	1712	14.55	2449	1918	21.69
2036	1972	3.13	2499	2404	3.79
2061	2278	10.51	2547	2764	8.53
5120	4993	2.49	6136	6197	1.00
5354	5630	5.15	6525	6720	2.99
5502	6451	17.25	6802	7445	9.45
6657	6698	0.62	7875	8376	6.37
7045	7370	4.62	8512	8945	5.09
7310	8308	13.66	8994	9495	5.57
8528	7636	10.46	9992	9474	5.18
9168	8191	10.65	10985	10196	7.18
9494	9059	4.58	11761	10871	7.57
8560	8187	4.36	9988	10379	3.92
9205	8747	4.98	11017	10727	2.63
9682	9537	1.50	11904	10929	8.19
8678	9647	11.17	10032	11603	15.66
9340	9714	4.01	11127	11569	3.98
9846	9459	3.93	12015	11155	7.16
	EMA	7.09 %		EMA	7.00

3.6. Comentarios finales

Una vez analizados los resultados del presente capítulo se llega a los siguientes comentarios:

- Cuando el mortero se colocó en las caras laterales el esfuerzo máximo soportado por las pilas de tres hiladas disminuyó en un 10.49%, similar a los resultados alcanzados por Tatheer et al [34] donde para especímenes similares obtuvieron una disminución del 10.71%.
- En la micro-modelación numérica los parámetros mecánicos y geométricos utilizados fueron: ángulo de dilatación (ϕ) 45° , parámetro de viscosidad 0.0005, coeficiente de forma 0.66, elemento finito tipo C3D8, tamaño de malla 10 mm y coeficiente de fricción 0.75.
- Referente a los modos de falla, cuando el mortero se colocó en el área neta la falla predominante se manifestó en forma de grietas verticales condicionadas por los esfuerzos a tensión generados en el BHC, y en menor medida se observó aplastamiento del mortero en las esquinas. Por otra parte, cuando el mortero se colocó en las caras laterales las principales fallas se generaron en las caras laterales de los BHC, originados por la pérdida de estabilidad local, debido a la concentración de esfuerzos.
- Al aplicar los coeficientes de corrección por esbeltez a las pilas elaboradas con bloques huecos de concreto, se obtienen valores con diferencias relativas que oscilan desde 5.53% a 13.18%.
- Basado en los resultados experimentales se realiza una primera propuesta de factores de corrección por esbeltez registrados en la Tabla 32 y Tabla 31.
- Se proponen ecuaciones para la estimación de la resistencia a la compresión para dos variantes de colocación del mortero (mortero en el área neta y mortero en las caras laterales). Las ecuaciones fueron obtenidas mediante un análisis paramétrico donde se evaluaron BHC con resistencias entre 6.77 a 28.66 MPa y morteros de pega con resistencias a la compresión entre 4.25 y 17.09 MPa.
- Se obtuvieron ecuaciones para la estimación del módulo de Young a partir de la resistencia a la compresión de la mampostería.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez concluida la campaña experimental, la micro-modelación numérica, así como, la comparación de los resultados con investigaciones previas se arribó a las siguientes conclusiones:

1. La mayoría de las investigaciones sobre la influencia de la forma de colocación del mortero en el comportamiento a compresión uniaxial de la mampostería de BHC se centran en pilas. Existe muy poca información en la literatura sobre el comportamiento a compresión del BHC cuando se coloca el mortero en las caras laterales.
2. Al colocar el cabeceo (simulando el mortero de colocación) en las caras laterales de los BHC, se obtuvieron diferencias significativas en el comportamiento de estos en términos de esfuerzos, rigidez y modos de falla; en comparación a los BHC con el cabeceo colocado en el área neta. En la variante donde se colocó el cabeceo en las caras laterales se produjeron concentraciones de esfuerzos que, ligadas a la heterogeneidad del material provocaron una disminución significativa de la capacidad de carga del BHC.
3. La forma de colocación del mortero de pega modificó significativamente el comportamiento a compresión uniaxial y el modo de falla de la mampostería de BHC.
4. Se proponen nuevas expresiones para la predicción de la resistencia a la compresión y el módulo de Young de la mampostería de BHC que toman en consideración la forma de colocación del mortero de pega.

Una vez concluido los trabajos de la presente investigación se plantean las siguientes recomendaciones:

1. Continuar con los trabajos de investigación, extendiéndose a otros especímenes de ensayo (muretes) lo que permitirán obtener más información para elaborar las normativas de diseño y revisión de estructuras de mampostería para el Estado de Nuevo León.
2. Implementar otras técnicas como el DIC (Digital Image Correlation), para la obtención de los desplazamientos y las deformaciones de la mampostería durante los ensayos experimentales.

PRODUCTOS OBTENIDOS

Conferencias impartidas en eventos de difusión

11 al 13 de octubre 2021: 2° Encuentro de Ciencia, Tecnología e Ingeniería de estudiantes de Posgrado de la FIC-UANL. (Ponencia).

García-Cedeño Ramón, Álvarez-Pérez José, Mesa-Lavista Milena “*Efecto de la esbeltez, en la obtención del módulo de elasticidad y la resistencia a compresión en pilas de bloques huecos de concreto*”.

10 al 12 de octubre 2022: 3° Encuentro de Ciencia, Tecnología e Ingeniería de estudiantes de Posgrado de la FIC-UANL. (Ponencia).

García-Cedeño Ramón, Álvarez-Pérez José, Mesa-Lavista Milena. “*Influencia de la forma de colocación del mortero en el comportamiento a compresión del bloque hueco de concreto*”.

4 de mayo 2023: Ciclo de Seminarios de Investigación, FIC, UANL. (Ponencia).

García-Cedeño Ramón, Fajardo-San Miguel Gerardo, Álvarez-Pérez José, Mesa-Lavista Milena. “*Análisis multifactorial de la mampostería de bloques huecos de concreto a compresión axial, mediante el empleo de la micro-modelación numérica detallada*”.

Artículos publicados en Revistas científicas

J.H Chávez-Gómez, J. Álvarez-Pérez, M. Mesa-Lavista, R. García-Cedeño, F. A. Carpio-Santamaría, G. Fajardo-San Miguel and F.D. Yépez-Rincón, “*Experimental dataset of masonry prisms with hollow concrete blocks*”, Data in Brief, Vol. 53. 110207. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110207>.

Congresos

Noviembre 2022: XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, en Zacatecas. (Ponencia).

García-Cedeño Ramón, Fajardo-San Miguel Gerardo, Álvarez-Pérez José, Mesa-Lavista Milena, Carpio-Santamaría Franco A. *“Influencia de la forma de colocación del mortero en el comportamiento a compresión del bloque hueco de concreto”*.

Carteles

25 y 26 de mayo 2023: 2^{do} Congreso Estatal de Ciencia en Materiales UANL.

García-Cedeño Ramón, Fajardo-San Miguel Gerardo, Álvarez-Pérez José, Mesa-Lavista Milena. *“Empleo de la micro-modelación numérica (MEF) en el estudio del comportamiento a compresión de la mampostería de bloques huecos de concreto”*.

Premios y Reconocimientos.

25 y 26 de mayo 2023: 2^{do} Congreso Estatal de Ciencia en Materiales UANL - 3^{er} lugar.

REFERENCIAS

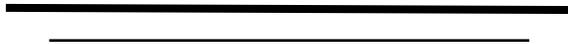
- [1] Z. T. Tatherr, Julian; Mohammad, Asad, "Compressive strength and deformation characteristics of concrete block masonry made with different mortars, blocks and mortar beddings types," *Journal of Building Engineering*, 2021, doi: doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102213.
- [2] J. Álvarez-Pérez, J. H. Chávez-Gómez, B. T. Terán-Torres, M. Mesa-Lavista, and R. Balandrano-Vázquez, "Multifactorial behavior of the elastic modulus and compressive strength in masonry prisms of hollow concrete blocks," *Construction and Building Materials*, vol. 241, p. 118002, 2020/04/30/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118002>.
- [3] *Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería*, 2023.
- [4] *Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures (TMS 402-13/ACI 530-13/ASCE 5-13) and (TMS 602-13/ACI 530.1-13/ASCE 6-13)*, T. M. S. J. C. (MSJC), 2013.
- [5] *S304.1-04. Desing of masonry structures*, C. S. Association, 2014.
- [6] *Desing of masonry structures, in Part 1-1: general rules for reinforced and unreinforced masonry structures*, C. E. 6, 2005.
- [7] G. Mohamad, P. B. Lourenço, and H. R. Roman, "Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: Review and prospects," *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 3, pp. 181-192, 2007/03/01/ 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.003>.
- [8] F. E. Caldeira *et al.*, "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*, vol. 234, p. 117419, 2020/02/20/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117419>.
- [9] E. S. fortes, "Compressive strenght of masonry constructed with high strenght concrete blocks," *IBRACON structures and materials journal*, vol. 10, pp. 1273-1319, Diciembre 2017, doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952017000600008>
- [10] S. R. Sarhat and E. G. Sherwood, "The prediction of compressive strength of ungrouted hollow concrete block masonry," *Construction and Building Materials*, vol. 58, pp. 111-121, 2014/05/15/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.025>.
- [11] R. Balandrano-Vázquez, "Análisis multifactorial del comportamiento a compresión axial de pilas de mampostería elaboradas con bloques huecos de concreto," MsC, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2019.
- [12] H. O. C. K. H. Yildirim, "Compression behavior and failure mechanisms of concrete masonry prism," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 17, pp. 107-105, 2005, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:1(107).
- [13] G. V. Rivera Jorge Luis, Fernandez Luis E., Vargas Gabriel, "Determinación de la resistencia a compresión axial y el modulo de elasticidad de la mampostería de

- bloques huecos de concreto," presented at the XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Veracruz, 2008.
- [14] K. R. T. P. Ganesan, "Behavior of concrete hollow-block masonry prisms under axial compression," *Journal of Structural Engineering*, vol. 118, 1992.
- [15] G. H. Nalon *et al.*, "Review of recent progress on the compressive behavior of masonry prisms," *Construction and Building Materials*, vol. 320, p. 126181, 2022/02/21/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126181>.
- [16] C. Fernando Flores García, "Análisis de los factores de corrección por esbeltez geométrica en prismas elaboradas con bloques huecos de concreto de la región de Nuevo León.," Máster, Autónoma de Nuevo León, 2022.
- [17] R. D. M. V. Shivaraj kumar H Y, Sandeep, Manjunath S, Somanath M B, "EFFECT OF PRISM HEIGHT ON STRENGTH OF REINFORCED HOLLOW CONCRETE BLOCK MASONRY," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 03, 2014.
- [18] A. Abasi, R. Hassanli, T. Vincent, and A. Manalo, "Influence of prism geometry on the compressive strength of concrete masonry," *Construction and Building Materials*, vol. 264, p. 120182, 2020/12/20/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120182>.
- [19] R. Hassanli, Mohamed A, E. Mills Julie, "Effect of dimensions on the compressive strength of concrete masonry prism," *ASTM International*, vol. 4, 2015, doi: doi:10.1520/ACEM20150001.
- [20] R. O. G. Martins, G. H. Nalon, R. d. C. S. S. A. Alvarenga, L. G. Pedroti, and J. C. L. Ribeiro, "Influence of blocks and grout on compressive strength and stiffness of concrete masonry prisms," *Construction and Building Materials*, vol. 182, pp. 233-241, 2018/09/10/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.091>.
- [21] T. E. S. Lima *et al.*, "Study of Face Shell Bedding Concrete Blocks Prisms with Different Laying Mortar Strength," in *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2021*, Cham, J. Li *et al.*, Eds., 2021// 2021: Springer International Publishing, pp. 517-522.
- [22] *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,*, NMX-C-464-ONNCCE, 2010.
- [23] A.-A. Mohammed A.A, Ahmed. H., "The behavior of hollow concrete block masonry under axial compression," *Journal of Engineering Sciences*, vol. 32-53, 2014.
- [24] G. Mohamad, F. S. Fonseca, A. T. Vermeltfoort, D. R. W. Martens, and P. B. Lourenço, "Strength, behavior, and failure mode of hollow concrete masonry constructed with mortars of different strengths," *Construction and Building Materials*, vol. 134, pp. 489-496, 2017/03/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.112>.
- [25] *Standard test method for tensile strength of chemical-resistant mortar, grouts and monolithic surfacing*, ASTM-C307, 2012.
- [26] *Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines*, NMX-C-036-ONNCCE, 2013.
- [27] *Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural,*, NMX-C-404-ONNCCE, 2012.

- [28] M. K. James Bristow, Mahmoud Motahari, Moses Karakouzian, "A possible replacement to masonry prism test: calibrating a numerical model with experimental compressive strength data.," presented at the 14th North American Masonry conference, Omaha, NE, USA, 2023.
- [29] M. L.-F. Mesa-Lavista, Francisco; Tejeda-Piusseaut, Eduardo, "Overview of the Constitutive Model and Numerical Calibration by FEM to compute bearing capacity and embankment-core deformability," *Ingeniería e Investigación*, vol. 42, 2022, doi: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v42n1.93712>.
- [30] D. C. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*. 1991.
- [31] *SPSS Statistics for Window*. (2017).
- [32] *Cemento hidráulico-Determinación estándar para el mezclado de pastas y morteros de cementantes hidráulicos.*, NMX-C-085-ONNCCE, 2002.
- [33] *Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos.*, NMX-C-061-ONNCCE, 2015.
- [34] T. Zahra, J. Thamboo, and M. Asad, "Compressive strength and deformation characteristics of concrete block masonry made with different mortars, blocks and mortar beddings types," *Journal of Building Engineering*, vol. 38, p. 102213, 2021/06/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102213>.
- [35] B. Zeng, Y. Li, and C. Cruz Noguez, "Modeling and parameter importance investigation for simulating in-plane and out-of-plane behaviors of un-reinforced masonry walls," *Engineering Structures*, vol. 248, p. 113233, 2021/12/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113233>.
- [36] D. Ferretti, "Dimensional analysis and calibration of a power model for compressive strength of solid-clay-brick masonry," *Engineering Structures*, vol. 205, p. 110064, 2020/02/15/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110064>.
- [37] A. I. J. M. G. N. S. H. R. León, "Parámetros de modelación numérica mediante elementos finitos para un bloque hueco de concreto bajo carga a compresión uniaxial," presented at the 15th Iberian Conference on information Systems and Technologies, Seville, Spain, 2020.
- [38] J. Álvarez-Pérez, J. H. Chávez-Gómez, B. T. Terán-Torres, M. Mesa-Lavista, and R. Balandrano-Vázquez, "Multifactorial behavior of the elastic modulus and compressive strength in masonry prisms of hollow concrete blocks," *Construction and Building Materials*, vol. 241, p. 18, 2020/04/30/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118002>.
- [39] R. O. G. Martins, G. H. Nalon, R. d. C. S. Sant'Ana, L. G. Pedroti, and J. C. L. Ribeiro, "Influence of blocks and grout on compressive strength and stiffness of concrete masonry prisms," *Construction and Building Materials*, vol. 182, pp. 233-241, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.091>.
- [40] G. H. Nalon, C. F. R. Santos, L. G. Pedroti, J. C. L. Ribeiro, G. de Souza Veríssimo, and F. A. Ferreira, "Strength and failure mechanisms of masonry prisms under compression, flexure and shear: Components' mechanical properties as design constraints," *Journal of Building Engineering*, vol. 28, p. 101038, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101038>.

- [41] E. Fortes, G. Parsekian, J. Camacho, and F. Fonseca, "Compressive strength of masonry constructed with high strength concrete blocks," *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, vol. 10, pp. 1273-1319, 2017, doi: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952017000600008>.
- [42] N. W. M. Mahamid, "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*, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000494.
- [43] M. D. J. A. Thamboo, C. Yan, "Effects of joint thickness, adhesion and web shell to the face shell bedded concrete masonry loads in compression," *Australian Journal of structural Engineering*, vol. 14, pp. 291-302, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.7158/S12-035.2013.14.3>.
- [44] Maurenbrecher, "Effect of test procedures on compressive strength of masonry prism," presented at the 2nd Canadian masonry symposium, Carleton University, Ottawa, 1980.
- [45] L. Barbosa, Hanai, "On the compressive strength prediction for concrete masonry prism.," *Materials and Structures*, pp. 331-44, 2010.
- [46] *Standard test method for tensile strength of chemical-resistant mortar, grouts and monolithic surfacing*, ASTM-C-307, 2012.

ANEXOS



ANEXO A “PARÁMETROS EN BHC”

Authors	Geometría					Hollow concrete block					Mortar						
	(Length x height x thickness) (mm). HCB	λ_{block}	A_n/A_b	Bedding type and area (mm ²)		Parámetros elásticos			Esfuerzos últimos		Mortar type	Mortar mix proportion n: (cement: lime: sand) [a/c]	Parámetros elásticos			Esfuerzos últimos	
						$E_{b,net}$ (MPa)	$E_{b,face}$ (MPa)	ν_b	$f_{b,net}$ (MPa)	$f_{b,face}$ (MPa)			$E_{m,cub}$ (MPa)	$E_{m,cyl}$ (MPa)	ν_m	$f_{m,cub}$ (MPa)	f_{mt} (MPa)
[23]	(400*200*100)	2	0.74	Full	29693.5	NR	NR	NR	18.08	NP	I	1:3	NR	NR	NR	29.53	NR
	(200*200*100) ½ BHC	2	0.72	Full	14346.7 50	NR	NR	NR	17.15	NP							
[24]	(390*190*140)	1.35	0.62	Full face	NR	20900	NP	NR	23.1	NP	I	1:0.25:3	NP	12800	NR	25.37	NR
											II	1:0.5:4.5	NP	4800	NR	9.25	NR
											III	1:1:6	NP	3200	NR	5.62	NR
[34]	(390 *190*90)	2.11	0.74	Full bed	26100	NR	NR	NR	15,6 (2.9%)	12.5 (4.9%)	M2	2:9 [NR]	NR	NR	NP	3.12 (15.4%)	NP
				Face shell bed	23400						M3	1:6 [NR]	NR	NR		4.25 (9.9%)	
											M4	5:4.5 [NR]	NR	NR		7.5 (8.2%)	
[38]	(393 *193*144)	1.34	0.556	Full bed	25020	1899.28 (*) (6.83%)	NP	0.155 ()	6.73 (8.01%) ()	NP	MI	0:3 [0.55]	1495 (*) (9.04%)	NP	0.210 (0.01%)	11.96 (9.2%)	1.41 (**) (9.83%)
[8]	(390*188*137)	1.37	0.56	Full bed	30230	NR	NR	NR	16.3	NP	AM1	1:2:75	NP	9700 (40.55%) ()	NR	7 (2.76%)	NR
	(391*187*139)	1.36	0.59	Full bed	31416	NR	NR	NR	45.6	NP	AM2	1:1:6	NP	10500 (12.82%) ()	NR	12.75 (7.63%)	NR
											AM3	1:0.5:4.5	NP	15400 (6.27%)	NR	23.75 (3.16%)	NR
[7]	B1 (390*190*140)	1.35	0.58	Full bed	NR	NR	NR	NR	18.2	NP	I	1:0.25:3	NP	11230	NR	24.87	NR

	B2 (390*190*140)	1.35	0.58	Full bed	NR	NR	NR	NR	27	NP	II	1:0.50:4.5	NP	6406	NR	10.75	NR
											III	1:1:6	NP	4527	NR	5.25	NR
											IV	1:2:9	NP	2042	NR	3.60	NR
[39]	(390*190*138)	1.37	0.54	Full bed	NR	NR	NP	NR	10.9	NP	M-P4.5	1:0.39:6.44	NR	NP	NR	5.80 (1.25)	NR
	(390*190*140)	1.36	0.55	Full bed	NR	NR	NP	NR	14.8	NP	M-P8	1:0.32:5.25	NR	NP	NR	10.40 (1.07)	NR
	(390*190*141)	1.35	0.57	Full bed	NR	NR	NP	NR	21.2	NP	M-P12	1:0.20:3.39	NR	NP	NR	15.5 (0.74)	NR
[21]	(390*190*140)	1.36	NR	FACE	NR	NR	NR	NR	12.97	NR	I	1:0.5:4.5	NR	NP	NR	8.93 (0.90)	NP
											II	1:1:6	NR	NP	NR	5.72 (1.26)	NP
[40]	(390*190*138)	1.37	0.54	FULL	NR	7310	NP	NR	14.1	NP	$< 40\%f_b$	1:2.2:8.5	NR	NR	NR	3.7	NR
	(390*190*140)	1.36	0.55	FULL	NR	15769	NP	NR	17.1	NP	$\approx 70\%f_b$	1:0.39:6.44	NR	NR	NR	7	NR
											$> f_b$	1:0.25:4.22	NR	NR	NR	12.3	NR
											$< 40\%f_b$	1:0.45:7.48	NR	NR	NR	5.9	NR
											$\approx 70\%f_b$	1:0.32:5.25	NR	NR	NR	9.3	NR
	$> f_b$	1:0.2:3.40	NR	NR	NR	17.1	NR										
[41]	B1	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	18.7	NR	A1	1:0.42:4.25	NR	NR	NR	13.4 (1.05 %)	NR
	B2	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	27.3	NR	A2	1:0.21:3.40	NR	NR	NR	21.8 (0.86 %)	NR
	B3	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	34.5	NR	A3	1:0.21:2.98	NR	NR	NR	26.90 (0.77 %)	NR
[42]	U19 (406.4*203.2*203.2)	1	NR	NR	NR	NR	NR	NR	14.10	NR	S	NR	NR	NR	NR	13.2 (NR)	NR
											N	NR	NR	NR	NR	4.8 (NR)	NR
[43]	(390*190*90)	2.11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	M-3	1:1:6	NR	NR	NR	NR	NR

[44]	(397*194*194)	1	NR	NR	NR	NR	NR	22.00	NR	N	NR	NR	NR	NR	6.60 (NR)	NR
[45]	(390*190*140)	1.36	NR	FULL	NR	NR	NR	24.5 (3%)	NR	N	NR	NR	NR	NR	11.75 (11%)	NR
					NR	NR	NR	20.0 (4.5%)	NR	N	NR	NR	NR	NR	9.62 (14%)	NR
					NR	NR	NR	26.8 (2.5%)	NR	S	NR	NR	NR	NR	19.35 (2%)	NR
					NR	NR	NR	38.9 (2.5%)	NR	M	NR	NR	NR	NR	27.75 (7%)	NR

Notas: Las probetas cilíndricas de mortero son de dimensiones de 50 mm de diámetro x 100 mm de altura.

Los valores entre paréntesis representan el coeficiente de variación.

(*) Módulo secante al 40% del esfuerzo máximo

(**) Estimado con el ensayo de briqueta [46]

$(f_{b,net})$ es la resistencia a la compresión del área neta de las unidades, $(f_{m,cub})$ es la resistencia a la compresión del mortero obtenido a partir de probetas cúbicas de 50 mm de lado.

NP: No se llevaron a cabo

NR: No fue reportado.

Se utilizó una relación de resistencia cubo/cilindro de 1,25 [34] para convertir la resistencia de los cilindros de mortero en cubos de mortero.

$$\lambda_{block} = \frac{H_{block}}{t_{block}}$$

ANEXO B. “PARÁMETROS EN PILAS DE BHC”

Authors	Relaciones (%)			Prisms										Failure mode
	$E_{m,cub} / E_{b,net}$	$f_{m,cub} / f_{b,net}$	$f_{m,cub} / f_{b,face}$	Five Course (Number of samples)	Four Course (Number of samples)	Two Course (Number of samples)	$\left(\frac{H_{prisms}}{t_{prisms}}\right)$	Three Course (Number of samples)		$E_{prisma,net}$ (MPa)	$f_{prisma,net}$ (MPa)	$\epsilon_{prisma,ps}$ (mm/mm)	$\epsilon_{prisma,us}$ (mm/mm)	
[23]	NR	1.63	NR	NR	NR	NR	NR	NR		NR	NR	NR	NR	NR
	NR	1.72	NR											
[24]	0.61	1.09	NP	NP	NP	NP	NR	II	3	24000	14.9	0.0008	NR	grietas que se prolongan perpendicularmente hasta la junta de mortero, donde se abren y continúan desarrollándose de forma horizontal por toda la junta
	0.23	0.40	NP				NR	II	4	19900	14.3	0.0024	NR	tensiones en la cara del BHC provocando grietas verticales debido a la expansión y aplastamientos localizados en el mortero
	0.15	0.24	NP				NR	III	4	20400	14.8	0.0013	NR	
[34]	NR	-	24.96	NP	NP	NP	NR	HB-M2-FSB	4	6112 (10.2%) (*)	5.8 (4.8%)	0.0017 (8.6%)	0.0026 (11.3%)	.
		20	-					HB-M2-FB	3	934 (3.2%) (*)	6.2 (16%)	0.0025 (7.3%)	0.0034 (10.6%)	Aplastamiento del mortero que conlleva al agrietamiento del bloque
		-	34					HB-M3-FSB	3	687 (4.5%) (*)	6.1 (13%)	0.0018 (9.5%)	0.0024 (9.4%)	.
		27.24	-					HB-M3-FB	3	549 (8.8%) (*)	6.5 (6.4%)	0.0026 (5.9%)	0.0033 (8.9%)	Aplastamiento menor del mortero, el cual conlleva al desconchado de bloques y Splitting en la web

		-	60					HB-M4-FSB	3	3136 (7.7%) (*)	7.5 (4.2%)	0.0021 (12.4%)	0.0023 (9.2%)		
		48.08	-					HB-M4-FB	3	3677 (9.5%) (*)	8.4 (11%)	0.0024 (14.5%)	0.0028 (14.3%)	Desconchado de bloques y Splitting en la web.	
[38]	78.71	1.77	NP	NP	NP	NP	4.17	HB-M-I-FB	10	1743 (5.97%) (**)	4.93 (9.88%)	NR	NR	Agrietamiento vertical por tensión lateral generada en los bloques.	
[8]	NR		NP	NP	NP	1	5	NR	NP	3522 (7.63%)	7.43 (2.29%)	NR	NR	Aplastamiento del mortero ante cargas bajas a compresión. En la medida que aumenta la resistencia del mortero comienzan a aparecer grietas verticales en las caras de los BHC	
				NP	NP	2	5	NR	NP	3375 (8.88%)	6.49 (6.93%)	NR	NR		
				NP	NP	3	5	NR	NP	3237 (14.17)	7.22 (4.57%)	NR	NR		
				NP	NP	4	5	NR	NP	3483 (2.24%)	5.63 (5.33%)	NR	NR		
	NR		NP	NP	NP	NP	5	5	NR	NP	3220 (14.31)	6.52 (7.67%)	NR	NR	Falla del BHC por esfuerzos de tensión, debido a que se empleó un mortero más resistente que en el primer grupo.
					NP	NP	6	5	NR	NP	3672 (19.12)	6.77 (5.76%)	NR	NR	
					NP	NP	7	5	NR	NP	3855 (8.54)	6.68 (7.34%)	NR	NR	
					NP	NP	8	5	NR	NP	3490 (9.21)	6.15 (5.69%)	NR	NR	
	NR		NP	NP	NP	NP	9	5	NR	NP	3996 (11.97)	7.62 (5.25%)	NR	NR	Aplastamiento del BHC debido a los esfuerzos interiores que se generan.
					NP	NP	10	5	NR	NP	3675 (7.43)	7.4 (1.08%)	NR	NR	
					NP	NP	11	5	NR	NP	4052 (5.71)	7.28 (7.42%)	NR	NR	
					NP	NP	12	5	NR	NP	3863 (6.70)	7.06 (6.80%)	NR	NR	
	NR			NP	NP	NP	13	5	NR	NP	8847 (12.09)	22.5 (8.71%)	NR	NR	Aplastamiento del mortero teniendo en cuenta que el

				NP	NP	14	5	NR	NP	8288 (5.87)	17.57 (5.75%)	NR	NR	BHC tiene una resistencia mucho mayor que la del mortero. Grietas en el BHC en las zonas cercanas al aplastamiento del mortero.		
				NP	NP	15	5	NR	NP	6861 (1.31)	14.5 (10.07%)	NR	NR			
				NP	NP	16	5	NR	NP	7189 (10.85)	12.56 (7.32%)	NR	NR			
	NR		NP	NP	NP	17	5	NR	NP	3528 (8.65)	7.43 (1.75%)	NR	NR	Aplastamiento del BHC debido a los esfuerzos interiores que se generan.		
				NP	NP	18	5	NR	NP	3509 (14.32)	7.18 (3.06%)	NR	NR			
				NP	NP	19	5	NR	NP	3819 (15.29)	7.22 (8.31%)	NR	NR			
				NP	NP	20	5	NR	NP	3664 (7.17)	6.66 (1.95%)	NR	NR			
	NR		NP	NP	NP	21	5	NR	NP	3072 (15.73)	7.23 (4.56%)	NR	NR			
				NP	NP	22	5	NR	NP	3499 (5.70)	7.35 (6.12%)	NR	NR			
				NP	NP	23	5	NR	NP	3493 (15.43)	7.43 (5.25%)	NR	NR			
				NP	NP	24	5	NR	NP	3041 (4.73)	7.04 (4.83%)	NR	NR			
[7]	NR	1.36	0.92	NP	NP	NP	NP	B1	M-I	NR	10.56	NR	NR	Grietas verticales generadas por esfuerzos de tensión en el BHC		
	NR	0.59	0.40						M-II	NR	8.6	NR	NR			
	NR	0.29	0.19						M-III	NR	8.17	NR	NR	Aplastamiento del mortero que provoca el astillamiento del BHC cerca del mortero		
	NR	0.20	0.13						M-IV	NR	7.54	NR	NR			
										B2	M-I	NR	11.7	NR	NR	IDEM mortero fuerte
											M-III	NR	8.84	NR	NR	IDEM mortero débil
[39]	NR	0.53	NP	SOLO SE REPORTAN PILAS MACIZADAS												
	NR	1.42	NP													
	NR	1.32	NP													
[21]	NR	0.69	NR	NP	NP	NR	NR	NP	NP	NR	3.91 (4.32%)	NR	NR	Grietas por esfuerzo de tensión en las caras laterales		

	NR	0.44	NR							2.98 (3.69%)			causadas por la rotación y aplastamiento de los soportes	
[40]	NR	0.26	0.21	NP	NP	$B1/<$ 40 (4)	NR	NP	NP	5510	10.37 (8.2%)	NR	NR	Para las combinaciones con el mortero más resistentes que el BHC, grietas verticales debido a las tensiones laterales que se generan en los BHC.
		0.49	0.41			$B1/\approx$ 70(6)				10403	10.37 (9%)			
		0.87	0.72			$B1/>$ 100(4)				16247	11.27 (0.5%)			
		0.42	0.34			$B2/<$ 40(6)				9473	11.64 (8.3%)			
		0.64	0.54			$B2/\approx$ 70(6)				13993	15.64 (6.8%)			
		1.21	1			$B2/$ > 100(6)				19388	21.45 (7.9%)			
[41]	NR	NR	NR	NP	NP	B1-A1	NR	NP	NR	NR	10 (8.96%)	NR	NR	Grietas verticales en la dirección de la carga provocando las caras laterales o aplastamiento de la junta del mortero.
	NR	NR	NR			B2-A2	NR			NR	13.3 (9.46%)			
	NR	NR	NR			B3-A3	NR			NR	16.90 (8.6%)			
[42]	NR	0.94	NR	NR	NR	FS-N	6	NR	NR	NR	16.1 (3.9%)	NR	NR	Splitting en la web
		0.34				FS-S	6				17.1 (9.6%)			
		FU-N	6			19.4 (19.4%)								
		FU-S	6			21.8 (10.4%)								
[43]	NR	NR	NR	NR	3	NR	NR	NR	NR	4687 (10.4)	6.94 (NR)	NR	NR	Agrietamiento de la web paralelo a la dirección de la carga
[44]	NR	0.3	NR	10	NR	NR	5.2	NR	NR	NR	14.30 (3.9%)	NR	NR	NR
				NR	NR	12	2.0	NR	NR	NR	14.90 (3.6%)	NR	NR	NR

				NR	NR	NR	3.1	12	NR	14.50 (5.4%)	NR	NR	NR
[45]	NR	0.48	NR	NR	NR	NR	4.2	3	NR	18.81 (2%)	NR	NR	NR
	NR	0.48	NR	NR	NR	NR	4.2	3	NR	17.86 (3.7)	NR	NR	NR
	NR	0.72	NR	NR	NR	NR	4.2	3	NR	21.43 (4.8%)	NR	NR	NR
	NR	0.71	NR	NR	NR	NR	4.2	3	NR	30.18 (3.9%)	NR	NR	NR

Notas: (*) Módulo secante al 30% del esfuerzo máximo. (**) Módulo secante al 40% del esfuerzo máximo. NP: No se llevaron a cabo

$$\lambda_{prisms} = \frac{H_{prisms}}{t_{prisms}}$$