

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PILAS
DE MAMPOSTERÍA EMPLEANDO LA MICROMODELACIÓN.**

Por:

ING. YULIZA SAN JUANA GARCÍA VÁZQUEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

Octubre 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PILAS
DE MAMPOSTERÍA EMPLEANDO LA MICROMODELACIÓN.**

Por:

Ing. Yuliza San Juana García Vázquez

Como requisito parcial para obtener el Grado de Maestría en Ciencias con
Orientación en Ingeniería Estructural

DIRECTOR

Dra. Milena Mesa Lavista

CODIRECTOR

Dr. Ricardo González Alcorta

San Nicolás de los Garza, Nuevo León

Octubre 2025

DEDICATORIA:

A mis padres: Alonso y Lorena

Quienes me brindan fuerza y apoyo para cumplir todas mis metas,
para ellos, los amo.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco infinitamente a Dios por haberme dado la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para emprender y culminar esta etapa. A él le debo la oportunidad para alcanzar esta meta profesional y culminar exitosamente mi posgrado.

De manera especial, a mi directora de tesis la Dra. Milena Mesa Lavista. Por guiarme con paciencia y comprensión en el desarrollo de mi investigación. Agradezco su dedicación y su constante disponibilidad para revisar cada avance. Por brindarme las herramientas necesarias que me permitieron culminar esta investigación.

Al Dr. José Álvarez Pérez y al Dr. Jorge Humberto Chávez Gómez, por todo el conocimiento adquirido mediante la enseñanza y apoyo en el ámbito académico. Al Departamento de Ingeniería Estructural y Peritajes del Instituto de Ingeniería Civil por todo el apoyo que se me brindo durante el periodo de mi investigación, así como brindarme el recurso necesario para el desarrollo de mi estudio.

Muchas gracias al departamento de Subdirección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León por darme la oportunidad de realizar esta maestría y apoyarme durante mi estancia. En especial al Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel y al Dr. Isaías Juárez Ramírez por brindarme su tiempo y apoyo para poder incorporarme a la investigación.

A mis padres Alonso Garcia y María Vazquez por alentarme todos los días a superarme personal y profesionalmente. A mis hermanos Alonso Garcia y Lorena Garcia por brindarme su apoyo emocional diariamente para continuar con mis estudios. Y a mi novio, por estar siempre al pendiente y apoyarme en cada paso de este proceso. Los amo mucho.

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo principal analizar, a través de simulaciones numéricas, la influencia de tres parámetros en la resistencia a compresión de la mampostería. Las variables que se tuvieron en cuenta fueron: (1) la resistencia a compresión de los bloques huecos de concreto (BHC), (2) la resistencia del mortero y (3) la colocación del mortero.

La evaluación del comportamiento estructural de la mampostería se realizó a través de prismas de BHC, empleando un modelo numérico tridimensional. La geometría del modelo corresponde a un prisma de tres bloques, cada uno con dimensiones de 397 x 197 x 147mm, unidos por juntas de mortero de 10 mm y cabeceo con azufre con un espesor de 4 mm. Se variaron las propiedades de los materiales como sigue: BHC en tres niveles de resistencia (15.4 MPa, 18.1 MPa y 19.8 MPa) y mortero en dos niveles de resistencia (7.50 MPa y 17.09 MPa), el material del cabeceo se manejó como una variable determinista. La forma de colocación del mortero se varió en dos niveles (en área neta y caras laterales).

Para analizar el comportamiento a compresión, se realizaron simulaciones numéricas mediante el método de elementos finitos. Cada componente del prisma (BHC, mortero y cabeceo) fue modelado por separado y se definió una interacción de contacto general entre ellos. La calibración del modelo numérico se realizó con resultados experimentales previamente realizados.

Como principales resultados se obtuvo el esfuerzo máximo, la deformación, el módulo de elasticidad (E) y el tipo de falla de los prismas. Se realizó una evaluación de la falla en los prismas con una resistencia heterogénea en sus BHC, donde se observaron diferencias significativas en el tipo de falla cuando se varía la colocación del mortero.

A partir de los resultados, se evidencia que, un prisma con el mortero colocado en caras laterales tiende a fallar por tensión, debido a que la concentración de

esfuerzos es mayor en las áreas donde se encuentra la discontinuidad en la unión del mortero. Por otro lado, la variabilidad de la resistencia de los BHC tuvo un impacto significativo. Se encontró una diferencia relativa del 22% en los esfuerzos máximos y el módulo de Young, así como una diferencia relativa del 17% en la deformación última. Evidenciando que la heterogeneidad en los materiales influye en la capacidad a compresión de la mampostería.

NOMECLATURA

A_n	Área neta (cm^2), superficie efectiva de la pieza.
A_b	Área bruta (cm^2), superficie total de la pieza.
A_l	Área caras laterales (cm^2), superficie del mortero colocado en caras laterales.
$\bar{f}_{b,net}$	Resistencia media a la compresión del BHC, en área neta (MPa).
$f'_{b,net}$	Resistencia de diseño a la compresión del BHC, en área neta (MPa).
$f_{b,b}$	Resistencia a la compresión del BHC, en área bruta (MPa).
$f'_{b,b}$	Resistencia de diseño a la compresión del BHC, en área bruta (MPa).
$f_{b,l}$	Resistencia a la compresión del BHC, en caras laterales (MPa).
f_{tb}	Resistencia a la tensión del BHC (MPa).
$\bar{f}_{p,net}$	Resistencia a la compresión del prisma, en área neta (MPa).
$f'_{p,net}$	Resistencia de diseño a la compresión del prisma, en área neta (MPa).
$f_{p,b}$	Resistencia a la compresión del prisma, en área bruta (MPa).
$\bar{f}_{p,b}$	Resistencia media a la compresión del prisma, en área bruta (MPa).
$f'_{p,b}$	Resistencia de diseño a la compresión del prisma, en área bruta (MPa).
$f'_{p,l}$	Resistencia a la compresión del prisma, en caras laterales (MPa).
$f_{mc,cub}$	Resistencia a la compresión del mortero (MPa).
$f_{mt.bri}$	Resistencia a la tensión del mortero (MPa).
ϑ_m	Coefficiente de Poisson del mortero.
ϑ_b	Coefficiente de Poisson del BHC.
ε_c	Deformación al esfuerzo máximo (mm/mm)
ε_u	Deformación última (mm/mm).
$E_{b,b}$	Módulo de elasticidad del BHC, en área bruta (MPa).

$E_{b,net}$	Módulo de elasticidad del BHC, en el área neta (MPa).
$E_{b,l}$	Módulo de elasticidad del BHC, en caras laterales (MPa).
$E_{p,b}$	Módulo de elasticidad del prisma, en área bruta (MPa).
$E_{p,net}$	Módulo de elasticidad del prisma, en área neta (MPa).
$E_{p,l}$	Módulo de elasticidad del prisma, en caras laterales (MPa).
E_m	Módulo de elasticidad del mortero (MPa).
rm/b	Relación e esfuerzo del mortero y el BHC.
$Q_{e(i)}$	Valor patrón en la posición i .
$Q_{n(i)}$	Resultado obtenido a comparar en la posición i .
n_p	Número total de valores analizados

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
NOMECLATURA.....	v
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xiii
1. INTRODUCCIÓN Y DISEÑO METODOLOGICO	2
1.1. Introducción	2
1.2. Planteamiento del problema	5
1.3. Justificación	7
1.4. Hipótesis	7
1.5. Objetivos.....	7
1.5.1. Objetivo general	7
1.5.2. Objetivos específicos	8
2. CAPÍTULO 2. ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN EN MAMPOSTERÍA	10
2.1. Introducción	10
2.2. Caracterización mecánica de la mampostería	11
2.2.1. Componentes de la mampostería	11
2.2.2. Factores que influyen en la resistencia a la compresión de la mampostería.....	12
2.3. Expresiones matemáticas obtenidas por normas internacionales	15
2.3.1. Método de Resistencia de la Unidad (USM)	15
2.3.2. Método de Pruebas de Pilas (PTM)	21
2.3.3. Módulo de elasticidad.....	24
2.4. Modelación numérica del comportamiento de la mampostería.....	26
2.4.1. Tipos de modelación numérica.....	27
2.4.2. Simulación y variabilidad en modelos numéricos	30
2.5. Estudios paramétricos	36
2.6. Comentarios finales del capítulo	49
3. CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	52

3.1.	Introducción	52
3.2.	Recolección de datos experimentales y diseño de experimento	52
3.2.1.	Materiales y especímenes (Recolección de datos)	54
3.2.2.	Definición del diseño experimental.....	58
3.3.	Confección del Modelo numérico	59
3.3.1.	Calibración del modelo numérico con los resultados experimentales 60	
3.3.2.	Calibración de interacciones	60
3.4.	Metodología seguida para las simulaciones numéricas.....	66
3.4.1.	Elección del software	67
3.4.2.	Confección de las partes	67
3.3.3	Definición de los materiales	67
3.3.4	Mallado.....	68
3.3.5	Ensamblaje	69
3.3.6	Condiciones de frontera y desplazamiento impuesto	69
3.5.	Comentarios finales del capítulo.....	71
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	74
4.1.	Introducción	74
4.2.	Análisis de las curvas esfuerzo deformación	74
4.3.	Análisis de las fallas	77
4.4.	Influencia de la posición de los bloques en los prismas, Análisis de los resultados del Design Expert	80
4.4.1.	Análisis de resistencia	80
4.4.2.	Análisis de Módulo de Elasticidad	81
4.4.3.	Análisis de deformaciones	82
4.5.	Discusión de expresiones propuestas por normativas internacionales	83
4.5.1.	Método de Prueba del Prisma (PTM).....	84
4.5.2.	Método Resistencia de la Unidad (USM)	86
4.5.3.	Módulo de Young.....	90
4.6.	Discusión de expresiones propuestas en estudios científicos previos	92
4.6.1.	Resistencia a compresión de la mampostería.....	93

4.7.	Comentarios finales del capítulo.....	97
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
5.1.	Conclusiones.....	100
5.2.	Recomendaciones.....	101
6.	Resultados obtenidos. Difusión y divulgación de los resultados.....	102
	REFERENCIAS	103
	ANEXO A. Configuración de falla en las pilas de mampostería (PEEQ y PEEQT)	108
	ANEXO B. Influencia de la posición de los bloques en el prisma	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de bloques: a) bloques de concreto y b) bloques de arcilla.....	3
Figura 2. Especímenes para ensayos experimentales a compresión.	4
Figura 3. Modelación numérica una pila de mampostería con el MEF [8].	5
Figura 4. Tipos de colocación del mortero en BHC.....	6
Figura 5. Área del bloque hueco de concreto de dos módulos [2].	11
Figura 6. Pilas de bloques huecos de concreto.	14
Figura 7. Tipos de fallas en pilas de mampostería con BHC [3].	14
Figura 8. Gráfico de dispersión para la obtención de la resistencia de la mampostería según la NTC-Mampostería [2].	16
Figura 9. Gráfico de dispersión para la obtención de la resistencia de la mampostería según la CSA S304 [15].	20
Figura 10. Tipos de modelación numérica. (a) Macro – modelación y (b) Micro – modelación simplificada.....	29
Figura 11. Micro – modelación detallada.....	30
Figura 12. Simulación numérica del murete de mampostería; (a) mallado del modelo, (b) modelo numérico sin variación espacial y (c) modelo numérico con variación espacial en sus materiales por Zhu et al. [7].	33
Figura 13. Elementos y pila de mampostería para el modelado numérico por Álvarez et al [8, 12].	34
Figura 14. Espécimen analizado numéricamente por Köksal et al. [30, 31, 33].	39
Figura 15. Dimensiones de especímenes ensayados experimentalmente Jaafar [34].	40
Figura 16. Dimensiones de pilas ensayados experimentalmente Haach et al. [36] (dimensiones en milímetros).	42
Figura 17. Diagrama de metodología.....	53
Figura 18 Resultado de las 108 simulaciones con las variaciones propuestas.	59
Figura 19. Comparación entre la curva esfuerzo – deformación. La resistencia de los BHC es de 15.4 MPa, 18.1 MPa y 19.8 MPa y la resistencia del motero a compresión es de 17.09 MPa colocado en área neta.	62

Figura 20. Comparación entre la curva esfuerzo – deformación. La resistencia de los BHC es de 15.4 MPa, 18.1 MPa y 19.8 MPa y la resistencia del mortero a compresión es de 17.09 MPa colocado en caras laterales.....	62
Figura 21. Comparación entre la curva esfuerzo – deformación. La resistencia de los BHC es de 15.4 MPa, 18.1 MPa y 19.8 MPa y la resistencia del mortero a compresión es de 7.50 MPa colocado en área neta.....	63
Figura 22. Comparación entre la curva esfuerzo – deformación. La resistencia de los BHC es de 15.4 MPa, 18.1 MPa y 19.8 MPa y la resistencia del mortero a compresión es de 7.50 MPa colocado en caras laterales.....	63
Figura 23. Análisis del tiempo de ejecución del modelo en función del tipo de interacción. a) mortero de 17.09 MPa colocado en área neta, b) mortero de 17.09 MPa colocado en caras laterales, c) mortero de 7.50 MPa colocado en área neta y d) mortero de 7.50 MPa en caras laterales.	66
Figura 24. Partes del modelo con el tipo de mallado (a) BHC, (b) mortero full / face y (c) cabeceo superior full / face.	68
Figura 25. Conectividad y ensamblaje (a) mortero en full y (b) mortero en face.	69
Figura 26. Condiciones de frontera y desplazamientos impuestos (a) mortero full y (b) mortero face.....	70
Figura 27. Curva Esfuerzo – Deformación obtenida en la mampostería con la colocación del mortero en área neta (full).....	76
Figura 28. Curva Esfuerzo – Deformación obtenida en la mampostería con la colocación del mortero en caras laterales (face).....	77
Figura 29. Configuración de falla en la mampostería con y sin variación en la resistencia de sus BHC y con la colocación del mortero en full (Mortero 2).	79
Figura 30. Configuración de falla con variación en la resistencia de los BHC en la mampostería y la colocación del mortero en full y face (Mortero 1).....	79
Figura 32. Gráficas Box – plot del esfuerzo máximo con Mortero 2, colocado en área neta y analizando la ubicación del bloque en la zona intermedia.	81
Figura 33. Gráficas Box – plot del módulo de elasticidad con Mortero 2, colocado en área neta y analizando la ubicación del bloque en la zona intermedia.	82

Figura 34. Gráfica Box – plot de la deformación al esfuerzo máximo con Mortero 2, colocado en área neta y analizando la ubicación del bloque en la zona intermedia.	83
Figura 34. Error absoluto medio (MAE) obtenido por PTM, utilizando como referencia los resultados de la normativa mexicana NTC-M[2].	85
Figura 35. Error absoluto medio (MAE) obtenido por USM, utilizando como referencia los resultados de las simulaciones numéricas.	88
Figura 36. Error relativo en la estimación de la resistencia a la compresión de la mampostería con el mortero colocado en área neta (full) según diferentes normativas, en función de la resistencia del BHC.	89
Figura 37. Error relativo en la estimación de la resistencia a compresión de la mampostería con el mortero colocado en caras laterales (face) según diferentes normativas en función de la resistencia del BHC.	89
Figura 38. Error absoluto medio (MAE) obtenido por las normativas internacionales, utilizando como referencia los resultados de las simulaciones numéricas	92
Figura 39. Grafica de Error relativo (Er) para la comparación de la estimación de la resistencia de la mampostería con mortero en área neta (full).	96
Figura 40. Grafica de Error relativo (Er) para la comparación de la estimación de la resistencia de la mampostería con mortero en caras laterales (face).	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de mortero según norma mexicana NTC – Mampostería [2].	12
Tabla 2. Resistencia de diseño a compresión de la mampostería ($f'p, b$), a partir de la resistencia de diseño a compresión del BHC ($f'b, b$).....	16
Tabla 3. Resistencia de diseño a compresión de la mampostería ($f'p, net$), a partir de la resistencia de diseño a compresión del BHC ($f'b, net$).	19
Tabla 4. Clasificación del mortero según la norma americana TMS 402/602 [13].	20
Tabla 5. Factor correctivo para calcular la resistencia a compresión de pilas con diferente relación altura – espesor NTC-Mampostería [2].	22
Tabla 6. Valores mínimos del coeficiente de variación NTC-Mampostería [2]...	22
Tabla 7. Factor de corrección por esbeltez aplicado para cada normativa [16].	23
Tabla 8. Resultados del método experimental en pilas de mampostería por Barbosa et al. [26].....	31
Tabla 9. Resultados del método experimental en pilas de mampostería por Mohamad et al. [27].	32
Tabla 10. Falla en pilas de mampostería empleando el método experimental [7, 12, 26, 27].....	35
Tabla 11. Tipo de análisis con MEF encontrados en la literatura [7, 12, 26, 27].	36
Tabla 12. Parámetros en los cuales es aplicable las ecuaciones propuestas por la investigación de Sarhat y Sherwood [17].	43
Tabla 13. Ecuaciones propuestas por Pereira et al. [18] para la estimación de la resistencia a compresión de la mampostería sin relleno.	46
Tabla 14. Ecuaciones propuestas por Pereira et al. [18] para la estimación de la resistencia a compresión de la mampostería con relleno.	46
Tabla 15. Parámetros físico – mecánicos obtenidos por ensayos experimentales de Álvarez et al [16]	47
Tabla 16. Parámetros físico – mecánicos obtenidos por otros autores citados por la investigación de Álvarez et al [16].....	47
Tabla 17. Ecuaciones propuestas para la resistencia a compresión de la mampostería por Álvarez et al. [16].	48

Tabla 18. Propiedades mecánicas del mortero.	56
Tabla 19. Propiedades físicas del bloque hueco de concreto.	56
Tabla 20. Propiedades mecánicas del bloque hueco de concreto.	57
Tabla 21. Propiedades físicas del prisma.....	58
Tabla 22. Análisis de propiedades de interacción en el modelo numérico.	65
Tabla 23. “Concrete Damaged Plasticity”	68
Tabla 24. Tipo de elemento finito.	68
Tabla 25. Comparación de la resistencia de diseño a compresión de la mampostería ($f'p, net$) obtenida por PTM en área neta (full).	85
Tabla 26. Comparación de la resistencia de diseño a compresión de la mampostería ($f'p, l$) obtenida por PTM en caras laterales (face).	85
Tabla 27. Comparación de la resistencia de diseño a compresión de la mampostería ($f'p, net$) obtenida por USM en área neta (full).	87
Tabla 28. Comparación de la resistencia de diseño a compresión de la mampostería ($f'p, l$) obtenida por USM en área neta (face).	87
Tabla 29. Comparación del módulo de Young (E_m) obtenida con normativas internacionales, en mampostería con configuración del mortero en área neta (full).	90
Tabla 30. Comparación del módulo de Young (E_m) obtenida con normativas internacionales, en mampostería con configuración del mortero en caras laterales (face).	91
Tabla 31. Estimación de la resistencia a la compresión de la mampostería con mortero en área neta (full), utilizando ecuaciones propuestas por diversos autores.	94
Tabla 32. Estimación de la resistencia a la compresión de la mampostería con mortero en caras laterales (face), utilizando ecuaciones propuestas por diversos autores.	95

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN Y DISEÑO METODOLOGICO

1.1. INTRODUCCIÓN

La mampostería simple se define como un material de construcción compuesto por dos elementos: la pieza y el mortero para su unión, con propiedades mecánicas necesarias para construir un muro, que tenga la capacidad de soportar cargas gravitacionales o accidentales (sismos, viento, etc.) ONNCCE [1]. Se cuenta en la actualidad con diferentes tipos de bloques (pieza) los que pueden ser de materiales como arcilla, cemento hidráulico u otros cementantes dependiendo la región. Estos bloques se clasifican en función de la relación entre su área neta y su área bruta, distinguiéndose como piezas macizas, piezas huecas, piezas multi perforadas o piezas de ajuste (ver Figura 1) [1]. Por su parte, el mortero tiene como objetivo permitir la unión de las piezas formando un trabajo en conjunto entre los materiales. Las propiedades principales son la adherencia entre las piezas y la resistencia a la compresión y tensión. Para garantizar las propiedades del mortero se realiza un diseño de mezcla entre arena, cemento y agua [2].

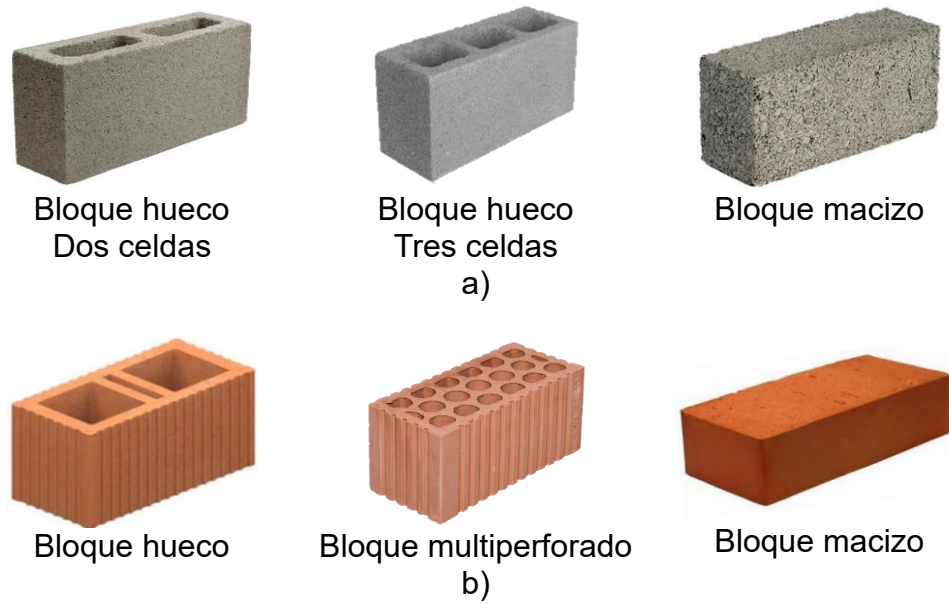


Figura 1. Tipos de bloques: a) bloques de concreto y b) bloques de arcilla.

La mampostería ha tenido una relevancia significativa en el ámbito de la construcción, especialmente en edificaciones de baja y mediana altura. Este sistema estructural se distingue por ventajas como la facilidad de construcción, un menor costo en comparación con otros sistemas portantes y la versatilidad que ofrece para adaptarse a diferentes diseños arquitectónicos y combinaciones con otras configuraciones constructivas.

A lo largo de los años se ha investigado el comportamiento de la mampostería, especialmente su resistencia a cargas gravitacionales y laterales en muros. Los sistemas de mampostería están predominantemente expuestos a cargas gravitacionales, tanto cargas permanentes como el peso propio de la estructura (carga muerta), como cargas temporales o variables que pueden cambiar de lugar, magnitud o distribución (cargas vivas), a lo largo de su vida útil. Como consecuencia, comprender el comportamiento mecánico de la mampostería a compresión se vuelve esencial.

La determinación de la resistencia es obtenida a través del método experimental, y varía dependiendo de la región en la que se efectúa el estudio. En México, la normativa NMX-C-464-ONNCCE [3] establece un procedimiento para obtener la

resistencia a la compresión de la mampostería utilizando pilas de varias hiladas construidos específicamente para ensayos en laboratorio, la pieza predominante en esta zona es el bloque hueco de concreto (BHC). En contraste, normas internacionales como la GB/T 50129 (China) [4] y el Euro código [5] (Europa) especifican procedimientos que emplean muretes (ver Figura 2).



Pila [6]



Murete [7]

Figura 2. Especímenes para ensayos experimentales a compresión.

La prueba consiste en aplicar una carga creciente hasta la falla, registrando el esfuerzo máximo soportado. Este procedimiento permite caracterizar adecuadamente la resistencia del sistema bloque – mortero y evaluar la calidad de ensamblaje en condiciones controladas [2]. Este comportamiento se analiza típicamente mediante relaciones representadas por curvas de esfuerzo normal vs. deformación axial, donde los parámetros claves incluyen la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad [1,2].

Durante los últimos años, los programas computacionales aplicados a la investigación de problemas ingenieriles han tenido avances significativos lo que ha permitido la modelación numérica, teniendo como objetivo comprender y predecir el comportamiento de la estructura o sistema en diversas condiciones. Esta metodología tiene como principal ventaja reducir los recursos en costo y tiempo. Por lo cual, se ha investigado la mampostería utilizando el método de elementos finitos (MEF) realizando modelos lineales y no lineales [6, 8] (ver Figura 3). Los modelos numéricos no lineales son los más indicados para estudiar la resistencia del bloque y del mortero en conjunto, permitiendo evaluar el comportamiento de los materiales post – falla, tanto en compresión como en

tensión. Para garantizar la precisión, es necesario realizar ensayos en laboratorio que permitan calibrar y validar los resultados numéricos. Una vez desarrollado un modelo calibrado, es posible revisar diversas variables, como el tipo de colocación de mortero, la relación altura/espesor y la geometría del bloque, lo que permite obtener resultados que se aproximan de manera más confiables a los observados experimentalmente [7].

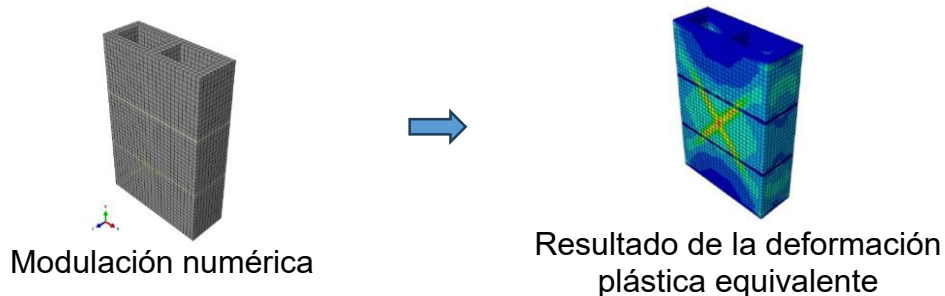


Figura 3. Modelación numérica una pila de mampostería con el MEF [8].

Diversas investigaciones [6, 8, 9] han demostrado que la resistencia depende en gran medida de las características mecánicas de la pieza y del mortero. Así como también de la calidad en la ejecución de la construcción. Si embargo los estudios dirigidos específicamente al comportamiento físico – mecánico de los BHC son escasos.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso de la mampostería elaborada con BHC ha mostrado un crecimiento significativo en los últimos años, principalmente por el buen desempeño estructural que ofrece. Este sistema constructivo destaca por la facilidad en su ejecución y por la geometría de los bloques, lo cual permite la colocación de refuerzo en sus huecos, mejorando considerablemente la capacidad resistente. Entre las propiedades fundamentales que se consideran para el diseño de edificaciones se encuentran la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad [6].

Los materiales que conforman la mampostería (bloque – mortero) pueden ser producidos en una planta industrial, directamente en obra o en entornos

controlados (laboratorio), donde los procesos de fabricación pueden diferir en aspectos como el tiempo de curado, las condiciones externas de temperatura y la calidad de sus materiales. Estas diferencias impactan directamente en las propiedades mecánicas del material, modificando la resistencia final. Sin embargo, la mayoría de los estudios previos se han realizado utilizando modelos deterministas [6, 8]. Es decir, sin considerar que las propiedades mecánicas de los componentes de la mampostería suelen variar ampliamente por su naturaleza de fabricación [7]. No contemplar estas variaciones, puede llevar a que un análisis sobrestime o subestime el comportamiento de la mampostería.

Así mismo, la colocación del mortero impacta en el comportamiento a compresión de la mampostería [6, 10]. Durante la ejecución en obra, el mortero puede colocarse de dos maneras, en área neta (*full*) o en caras laterales (*face*) como se muestra en la Figura 4.

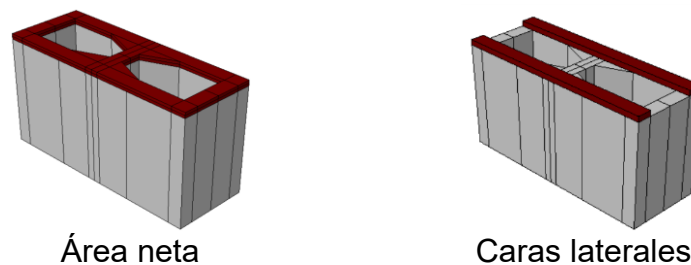


Figura 4. Tipos de colocación del mortero en BHC.

En México, la Norma Técnica Complementaria de Mampostería [2] establece la colocación del mortero únicamente en el área neta de la pieza. Sin embargo, cada vez es más común que el mortero se coloque en las caras laterales de las piezas, esta discrepancia genera diferencias significativas entre el diseño estructural y comportamiento real de la mampostería durante su vida útil. Así mismo, altera significativamente el área efectiva de contacto y la distribución de esfuerzos.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La compleja interacción entre los componentes de la mampostería dificulta la predicción precisa de su comportamiento a compresión axial. La variabilidad en las propiedades de los materiales, especialmente la resistencia de los BHC y la forma de la colocación del mortero influye significativamente en la resistencia final. Las ecuaciones propuestas por las normativas actuales buscan estimar la resistencia, pero no consideran la variación estocástica de las propiedades de los materiales. Este desconocimiento puede llevar a una estimación poco realista del desempeño estructural. Por ello, la presente investigación se justifica en la necesidad de cuantificar esta incertidumbre. Se utilizó una micro – modelación numérica por el MEF para integrar la variación aleatoria de la resistencia de los BHC. Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad para determinar el parámetro de material con mayor influencia. Finalmente, se analizó el efecto conjunto de la variación en la colocación y resistencia del mortero, obteniendo la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y el modo de falla, para ofrecer una comprensión más clara del desempeño de la mampostería.

1.4. HIPÓTESIS

Variando aleatoriamente la resistencia a compresión de los bloques huecos de concreto (BHC) en la mampostería, variará significativamente la respuesta a compresión axial, en comparación a emplear bloques con resistencia homogénea.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

Evaluar el impacto de la variabilidad de la resistencia a la compresión de los bloques huecos de concreto (BHC) y su posición en el comportamiento estructural empleando modelación numérica.

1.5.2. Objetivos específicos

- Evaluar los antecedentes científicos disponibles referentes al comportamiento a compresión uniaxial de la mampostería de bloques huecos de concreto.
- Obtener una metodología que permita evaluar el comportamiento a compresión uniaxial de pilas de bloques huecos de concreto mediante el método de elementos finitos (MEF).
- Evaluar la influencia de la variación de la resistencia de los BHC y la colocación de mortero en los modos de falla de la mampostería de bloques huecos de concreto.

CAPÍTULO 2. ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN EN MAMPOSTERÍA

2. CAPÍTULO 2. ESTADO ACTUAL DE LA INVESTIGACIÓN EN MAMPOSTERÍA

2.1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han realizado diversas investigaciones de la mampostería empleando la micro modelación numérica detallada [6, 8]. Inicialmente tenían el objetivo de evaluar estructuras históricas para predecir fallas en la misma, sin embargo, conforme paso el tiempo, es cada vez más utilizado este método para la investigación de la mampostería sometida a diferentes condiciones [11].

La modelación se puede definir como el proceso de crear un modelo matemático que represente la estructura física, generando ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento y las interacciones del sistema estructural. Así mismo, la simulación es la aplicación de técnicas computacionales para la solución de dichas ecuaciones diferenciales que ayudan a simular el comportamiento y aproximación a la solución de problemas reales [12]. Para llevarlo a cabo es importante garantizar una validación adecuada de los modelos numéricos con un número significativo de resultados experimentales [11].

En este sentido, la aplicación de la micro – modelación utilizando MEF no lineal establece una herramienta para la validación y optimización del diseño de estructuras de mampostería. Permite una evaluación detallada del comportamiento estructural hasta el punto después de la falla. Para ello, es indispensable definir un modelo constitutivo, con el objetivo de determinar el tensor de esfuerzos y deformaciones en cada punto del material [11].

2.2. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MAMPOSTERÍA

2.2.1. Componentes de la mampostería

La mampostería simple (no reforzada) se compone fundamentalmente por unidades de mampostería, ya sean fabricadas de concreto o de arcilla. Estas unidades se pueden clasificar como bloques huecos, multi – perforados o macizos, en función de la relación entre su área neta y su área bruta de sección transversal.

En la actualidad, en la región de Nuevo León, la construcción de estructuras se caracteriza por el empleo predominante de bloques huecos de concreto (BHC). Así mismo, los bloques más comunes en la práctica son los de dos y tres huecos (ver Figura 1). Un aspecto normativo crucial para este tipo de piezas es garantizar una relación de área neta / área bruta (A_n/A_b) mayor o igual a 0.50 [2]. El área bruta se calcula como el producto del largo por el ancho nominal del bloque, mientras que el área neta corresponde al área bruta menos el total de los huecos internos (ver Figura 5).

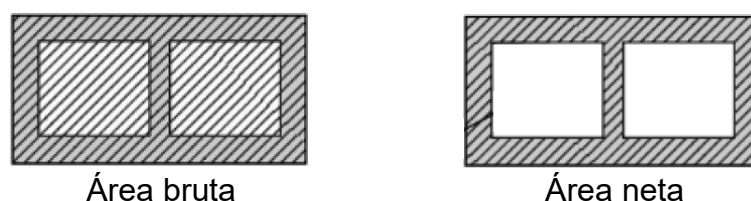


Figura 5. Área del bloque hueco de concreto de dos módulos [2].

La resistencia a la compresión de los BHC es el principal parámetro del que dependen las propiedades mecánicas de los muros de mampostería, por ello se requiere su determinación para fines de control de calidad. Las normativas mexicanas [2] especifican que la resistencia a la compresión de los bloques se determina a partir del área bruta de la pieza. La resistencia de diseño a compresión del bloque se determina con la Ecuación 1, a partir de la resistencia media a compresión ($\bar{f}_{b,b}$) obtenida en ensayos experimentales y el coeficiente de variación que no debe ser menor a 0.10 (COV). De igual manera, la resistencia de diseño del bloque ($f'_{b,b}$) no deberá ser menor a 6 MPa. Cabe mencionar, que

las ecuaciones para determinar la resistencia de la pieza varían dependiendo de la normativa internacional que se utilice como referencia, esto debido a que utilizan diferentes métodos estadísticos para su obtención.

$$f'_{b,b} = \frac{\bar{f}_{b,b}}{1 + 2.5COV} \quad 1$$

Así mismo, en apego a las normas mexicanas [2], la resistencia de diseño a compresión del mortero ($f'_{mc,cub}$) se determina mediante la aplicación de la Ecuación 2. La resistencia media a compresión del mortero ($f_{mc,cub}$) se obtiene experimentalmente a través de ensayos a compresión realizados en especímenes cúbicos de 5 centímetros por lado, a una edad de 28 días y el coeficiente de variación (COV) no debe ser menor a 0.20.

$$f'_{mc,cub} = \frac{f_{mc,cub}}{1 + 2.5COV} \quad 2$$

Una vez determinada la resistencia de diseño ($f'_{mc,cub}$), este material puede ser clasificado en dos tipos, conforme a los rangos establecidos por la normativa vigente [2], tal como se detalla en la Tabla 1. Esta clasificación del mortero tiene como función la aplicación adecuada de las ecuaciones de diseño.

Tabla 1. Tipos de mortero según norma mexicana NTC – Mampostería [2].

Clasificación	Resistencia de diseño a compresión ($f'_{mc,cub}$)
Tipo I	Mayor o igual que 12.50 MPa
Tipo II	Menor que 12.50 MPa, pero mayor o igual que 7.50 MPa

2.2.2. Factores que influyen en la resistencia a la compresión de la mampostería

Una de las variables que influyen directamente en el comportamiento a compresión de la mampostería es la forma de colocación del mortero. En este sentido, la tendencia actual en la construcción de mampostería con BHC es la colocación del mortero sobre las caras laterales (*face*).

Sin embargo, la normativa mexicana NMX-C-464-ONNCCE [3] establece ecuaciones y procedimientos de diseño tomando como base la colocación del mortero sobre el área neta (*full*) de la unidad. No considera la colocación del mortero en caras laterales representa una limitación significativa, ya que el diseño estructural realizado bajo esta referencia podría no representar fielmente el comportamiento real de las estructuras construidas con la práctica común.

Por otro lado, las normativas internacionales como la estadounidense TMS 402/602 [13], la europea Euro código [5] y la australiana AS 3700 [14] contemplan explícitamente ambas opciones de colocación del mortero (*full* y *face*), permitiendo la selección en función de los requisitos del proyecto. Por su parte, la normativa canadiense CSA S304 [15] se enfoca de manera exclusiva en la colocación tipo *face*.

Diferentes investigadores [16-19] han identificado los modos de falla de la mampostería en función de la forma en que se coloca el mortero (mortero sobre el área neta (*full*) y sobre las caras laterales (*face*)), confirmando la influencia que tiene la posición del mortero en el modo de falla de la mampostería. Así mismo, se han propuesto expresiones para estimar la resistencia a la compresión y módulo elástico de la mampostería. Las expresiones propuestas por medio del método de resistencia unitaria (*USM*) cuentan con la limitante de no considerar la variación existente en los materiales de construcción por su naturaleza de fabricación [17]. Por este motivo, algunas normativas como la británica y otras investigaciones [20, 21] se basan en el método del ensayo de pilas (PTM) para proponer expresiones que resulten más realistas considerando la variabilidad de los componentes de la mampostería. Es importante mencionar que el último método descrito presenta inconvenientes en costos, tiempo y disponibilidad de equipos.

Para determinar la resistencia a la compresión axial de la mampostería, se llevan a cabo ensayos experimentales empleando especímenes tipo pilas (ver Figura 6). La altura de estas pilas es una característica fundamental en la caracterización

mecánica del material. Estudios recientes han empleado pilas con diferentes alturas típicamente compuestas de dos, tres y cuatro hiladas [6, 8].

La normativa mexicana NTC – Mampostería [2] exige un mínimo de tres hiladas de altura. En contraste, normativas internacionales como la estadounidense TMS 402/602 y la canadiense CSA S304 especifican una altura mínima de dos hiladas.



Figura 6. Pilas de bloques huecos de concreto.

Así mismo, a partir de los ensayos a compresión axial de especímenes tipo pila, se puede identificar y documentar la configuración de falla de la mampostería. La clasificación de cada posible modo de falla se ilustra detalladamente en la Figura 7, tomando como referencia la norma mexicana NMX-C-646-ONNCCE [3].

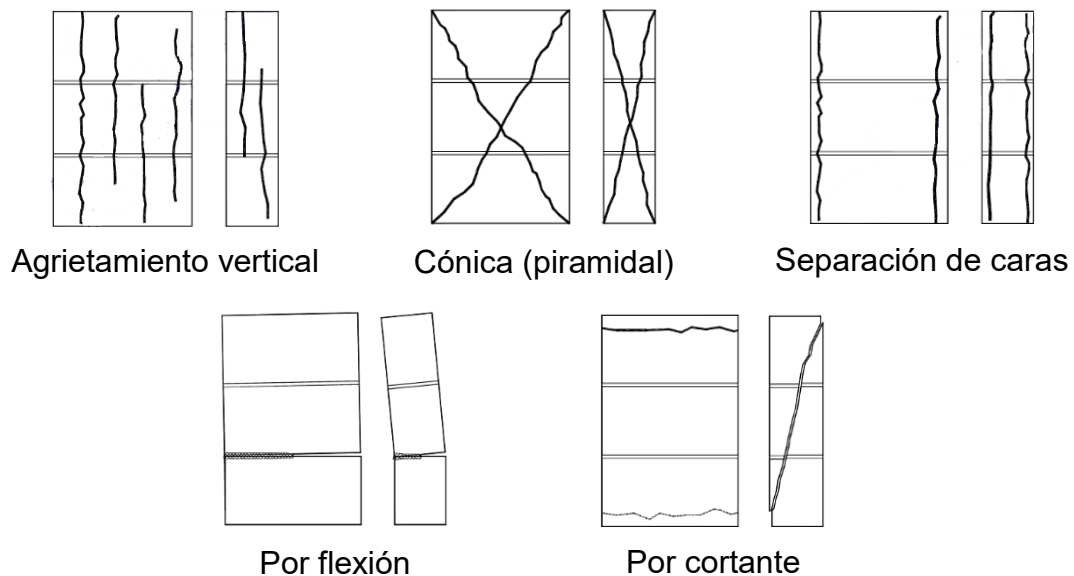


Figura 7. Tipos de fallas en pilas de mampostería con BHC [3].

2.3. EXPRESIONES MATEMÁTICAS OBTENIDAS POR NORMAS INTERNACIONALES

Durante el desarrollo de la presente investigación se requirió la consulta y aplicación de diversas normas nacionales e internacionales. Cada una establece requisitos mínimos para el diseño seguro y la construcción de estructuras de mampostería. Las normas que se abordan en este apartado plantean dos procedimientos para la obtención de la resistencia a la compresión de la mampostería [2, 5, 13-15].

1. Método de Resistencia de la Unidad (USM). Se refiere a una forma de calcular la resistencia a compresión de la mampostería, basándose principalmente en la resistencia a compresión de las unidades individuales (BHC) que lo componen.
2. Método de Prueba del Prisma (PTM). Es el cálculo de la resistencia a compresión de la mampostería, utilizando los resultados provenientes de los ensayos experimentales del prisma.

2.3.1. Método de Resistencia de la Unidad (USM)

La norma mexicana NTC-Mampostería [2] proporciona una tabla que relaciona la resistencia a la compresión de los BHC con el tipo de mortero (ver Tabla 2). Para simplificar el cálculo, un estudio previo [16] ha empleado un gráfico de dispersión (ver Figura 8) a partir del cual se obtiene una ecuación de regresión polinómica de segundo grado (cuadrática). Esta ecuación presenta un coeficiente de determinación (R^2) cercano a 1, lo que indica un ajuste preciso a los datos proporcionados por la norma.

Tabla 2. Resistencia de diseño a compresión de la mampostería ($f'_{p,b}$), a partir de la resistencia de diseño a compresión del BHC ($f'_{b,b}$).

$f'_{b,b}$	$f'_{p,b}$	
	Mortero I	Mortero II
6.00	2.50	2.00
7.50	4.00	3.50
10.00	5.00	4.50
15.00	7.50	6.00
20.00	10.00	9.00

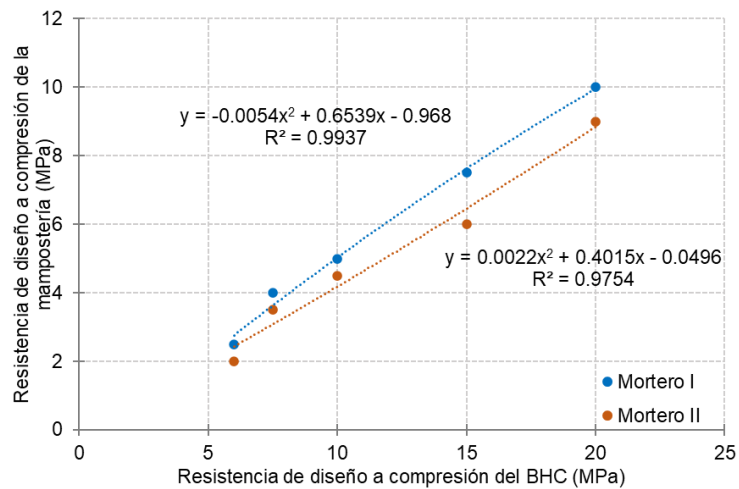


Figura 8. Gráfico de dispersión para la obtención de la resistencia de la mampostería según la NTC-Mampostería [2].

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la resistencia de la mampostería corresponden a la ecuación 3 y ecuación 4 [16].

$$f'_{p,b} = -0.0054f'_{b,b}{}^2 + 0.654f'_{b,b} - 0.968 \quad (\text{Mortero I}) \quad \mathbf{3}$$

$$f'_{p,b} = 0.0022f'_{b,b}{}^2 + 0.4015f'_{b,b} - 0.050 \quad (\text{Mortero II}) \quad \mathbf{4}$$

Donde $f'_{p,b}$ es la resistencia a compresión de diseño de la mampostería y $f'_{b,b}$ en la resistencia a compresión de diseño del BHC, ambas resistencias están determinadas en el área bruta de la pieza.

La norma europea Euro código [5] establece una expresión analítica para el cálculo de la resistencia en la mampostería (ver ecuación 5). Dicha expresión considera parámetros claves como las propiedades mecánicas de los BHC y del mortero. Esta estimación de resistencia es más precisa, debido a que involucra la resistencia del mortero en la ecuación.

$$f'_{p,net} = K \bar{f}_{b,net}^{0.7} f_{mr}^{0.3} \quad 5$$

Donde K es una constante que está en función del tipo de unidad de mampostería que se esté usando. Para la investigación se toma un valor de $K = 0.55$, aplicando para un bloque de concreto y agregados (consultar la tabla 3.3 de la norma Euro código [5]).

Asimismo, $\bar{f}_{b,net}$ es la resistencia media a compresión de las piezas, para esta norma la resistencia debe de ser normalizada para unidades de 100×100 mm, por lo cual debe multiplicar por un factor de forma de 1.25 y un factor de régimen por secado de aire de 1.00 (consultar anexo A en la norma BS EN 772-1 [22]).

Por último, f_{mr} representa la resistencia a compresión del mortero. Según esta norma, dicha resistencia se determina a partir de ensayos en prismas de $4 \times 4 \times 16$ cm. No obstante, si la resistencia a compresión del mortero ($f_{mc,cub}$), se obtiene mediante ensayos en cubos de 5 cm de arista, es necesario realizar una conversión. Este ajuste permite corregir la resistencia medida y garantizar una evaluación más precisa del comportamiento del mortero en las condiciones establecidas.

Para definir esta equivalencia, se emplean relaciones empíricas derivadas de investigaciones previas [16]. Said Taryal y Chowdhury [23] propusieron una relación entre la resistencia medida en cubos y la obtenida en prismas (ver ecuación 6), en la cual se observa que la relación no es constante, sino que varía en función de la magnitud de la resistencia.

$$0.72 \leq \frac{f_{mr}}{f_{mc,cub}} \leq 0.97 \quad 6$$

Dicha ecuación es válida únicamente para morteros cuya resistencia a compresión obtenida en cubos sea mayor o igual a 15 MPa ($f_{mc,cub} \geq 15 \text{ MPa}$).

Por otro lado, Nalon et al [21, 24] llevó a cabo investigaciones en las que propone ecuaciones [16] para la conversión de resistencias, considerando distintos tipos de especímenes. En primer lugar, plantea una conversión para especímenes cilíndricos de 5 x 10 cm (ver ecuación 7) y, posteriormente, una conversión hacia prismas de 4 x 4 x 10 cm (ver ecuación 8), medida requerida por la norma.

$$f_{m,cyl} = \frac{f_{m,cub}}{1.25} \quad 7$$

$$f_{mr} = 0.847 + 0.817 f_{m,cyl} \quad 8$$

Es importante destacar que estas ecuaciones propuestas son aplicables dentro de un rango específico de resistencias ($5 \text{ MPa} \leq f_{mr} \leq 20 \text{ MPa}$).

La norma australiana AS 3700 [14] define una ecuación para el cálculo de la resistencia de la mampostería (ver ecuación 9). Dicha expresión considera factores como la resistencia a la compresión y las dimensiones del BHC, así como el espesor y el tipo de colocación del mortero, lo que permite una estimación más precisa del comportamiento estructural de la mampostería.

$$f'_p = K_h K_m \sqrt{f'_{b,net}} \quad 9$$

Donde $f'_{b,net}$ representa la resistencia a compresión de diseño del BHC en área neta, K_h se determina en función de la relación entre la altura del BHC (b_h) y el espesor del mortero (m_t), según lo indicado en la ecuación 10.

$$K_h = 1.3 \left(\frac{b_h}{19 * m_t} \right)^{0.29} \quad 10$$

Por último, el factor K_m depende del tipo de colocación de mortero. En esta investigación se consideran dos valores, para la colocación en área neta (*full*) es 1.40 y para la colocación en caras laterales (*face*) es 1.60 (consultar tabla 3.1 en la norma AS-3800 [14]).

La norma canadiense CSA S304 [15] presenta una tabla que establece la relación entre la resistencia a la compresión del BHC y dos tipos de mortero especificados en la misma norma (ver Tabla 3). En esta clasificación, el mortero tipo N corresponde a mezclas con una resistencia mínima de 5 MPa (ver ecuación 11), mientras que el mortero tipo S se aplica a aquellas con una resistencia mínima de 12.5 MPa (ver ecuación 12).

Tabla 3. Resistencia de diseño a compresión de la mampostería ($f'_{p,net}$), a partir de la resistencia de diseño a compresión del BHC ($f'_{b,net}$).

$f'_{b,net}$	$f'_{p,net}$	
	Mortero N	Mortero S
40	14	22
30	12	17.5
20	10	13
15	8	9.8
10	6	6.5

A partir de los datos proporcionados por la norma (consultar la tabla 9 de la normativa CSA S304 [15]), se realiza un gráfico de dispersión (ver Figura 9) para la obtención de dos ecuaciones de regresión lineal. El coeficiente de determinación (R^2) obtenido en el grafico indican un buen ajuste en la variabilidad de los datos.

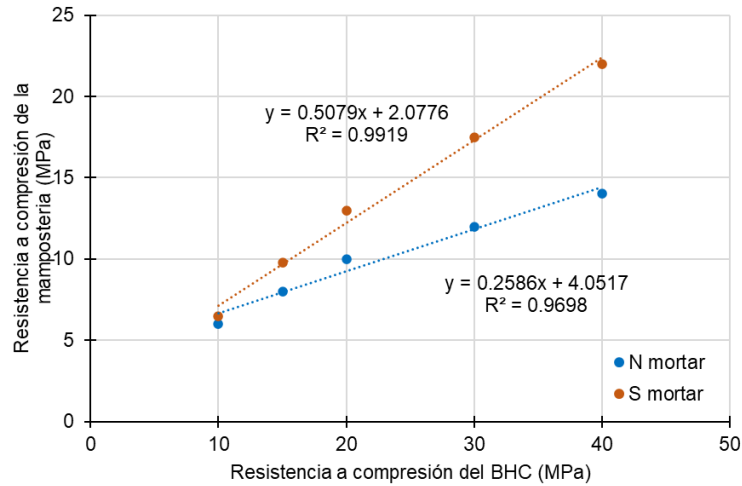


Figura 9. Gráfico de dispersión para la obtención de la resistencia de la mampostería según la CSA S304 [15].

$$f'_p = 0.508f'_{b,net} + 2.078 \quad (\text{Mortero S}) \quad 11$$

$$f'_p = 0.259f'_{b,net} + 4.052 \quad (\text{Mortero N}) \quad 12$$

Es importante destacar que esta norma define las ecuaciones exclusivamente para la configuración del mortero tipo (*face*), es decir, aplicado sobre las caras laterales. Como resultado, su aplicación queda restringida para el caso de mortero colocado en (*full*), limitando su alcance en este tipo de disposición.

La norma americana TMS 402/602 [13] establece una tabla de referencia en la que se vinculan los valores de resistencia de la mampostería con la resistencia del mortero. Asimismo, la norma clasifica su mortero dependiendo de la resistencia que presenta y el uso que se pueda dar (ver Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación del mortero según la norma americana TMS 402/602 [13].

Mortero	Resistencia del mortero (MPa)
Tipo S	≥ 12.4
Tipo N	≥ 5.2

Las ecuaciones para el cálculo de la resistencia a compresión de la mampostería se obtienen mediante un gráfico de dispersión, observando un buen ajuste en la ecuación de regresión lineal, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.99 para ambas ecuaciones demostrando un buen ajuste en los valores. Las ecuaciones obtenidas a partir de los valores proporcionados por la norma se emplean para el mortero tipo S (ver ecuación 13) y el mortero tipo N (ver ecuación 14).

$$f'_p = 0.4101f'_{b,net} + 7.994 \quad (\text{Mortero S}) \quad 13$$

$$f'_p = 0.342f'_{b,net} + 7.434 \quad (\text{Mortero N}) \quad 14$$

2.3.2. Método de Pruebas de Pilas (PTM)

Las normativas internacionales establecen un método para la prueba de pilas de mampostería con el objetivo de determinar la resistencia a la compresión, evaluando el comportamiento estructural en conjunto entre el bloque y el mortero bajo cargas verticales.

La norma mexicana NTC-Mampostería [2] establece la ecuación 15 que permite calcular la resistencia de diseño a compresión de la pila de mampostería en función de los esfuerzos aplicados y las dimensiones del espécimen.

$$f'_{p,b} = \frac{\bar{f}_{p,b} \lambda}{1 + 2.5COV} \quad 15$$

Para medir la resistencia media a compresión ($\bar{f}_{p,b}$), se realizan pruebas de compresión axial con los especímenes de mampostería (pilas). El ensaye se lleva a cabo aplicando carga a través de dos placas metálicas en los extremos del espécimen, con el fin de garantizar una distribución de carga uniforme [6]. Dichas placas metálicas, al ser mucho más rígidas que el material de ensaye, restringen la expansión lateral provocando un efecto de confinamiento. Lo cual puede contribuir a un incremento de la resistencia.

En consecuencia, se emplea un factor de corrección por esbeltez (λ) para ajustar el resultado de la resistencia en función de la configuración geométrica del espécimen tipo pila. La normativa mexicana [2] establece que un espécimen con una relación altura – espesor menor o igual a 3 presenta un impacto de confinamiento considerable por lo cual se aplica un factor menor a 1.00 para corregir la resistencia a compresión inflada. Contrariamente, cuando la pila presenta una relación altura – espesor mayor o igual a 4, el confinamiento es despreciable y el factor es mayor o igual a 1.00 reflejando una resistencia a compresión disminuida.

La Tabla 5 de la normativa mexicana detalla los factores correctivos dependiendo de la relación altura – espesor de la pila de mampostería. Cabe mencionar que la normativa desprecia si las unidades son de concreto o de arcilla para considerar este factor.

Tabla 5. Factor correctivo para calcular la resistencia a compresión de pilas con diferente relación altura – espesor NTC-Mampostería [2].

Relación altura y espesor de la pila ($\frac{h}{t}$)	2	3	4	5	6
Factor correctivo (λ)	0.75	0.90	1.00	1.05	1.06

Por último, el coeficiente de variación (COV) se utiliza para comparar la variabilidad de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales. La norma establece diferentes valores mínimos para el coeficiente de variación dependiendo de las condiciones de fabricación de los BHC. En la Tabla 6 se muestran los diferentes valores mínimos que establece la NTC-Mampostería [2].

Tabla 6. Valores mínimos del coeficiente de variación NTC-Mampostería [2].

COV	Criterios de control de calidad
≥ 0.10	Si se tienen 30 piezas provenientes de tres lotes de producción.
≥ 0.20	Provenientes de plantas mecanizadas que cuenten con un sistema de control de calidad (NMX-C-404-ONNCCE-2012).
≥ 0.30	Fabricación mecanizada, pero que no cuenten con un sistema de control de calidad.
≥ 0.35	Producción artesanal.

Las normativas como la europea (Euro código [5]), australiana (AS 3700 [14]) y canadiense (CSA S304 [15]) utilizan una aproximación similar que se puede representar mediante la ecuación 16. Esta concordancia se debe principalmente a que las normativas mencionadas se sustentan en una base probabilística que asume una variable aleatoria estándar de 1.64 para un diseño por resistencia de la mampostería [16].

$$f'_{p,net} = (\bar{f}_{b,net} \lambda)(1 - 1.64COV) \quad 16$$

Donde $\bar{f}_{b,net}$ representa la resistencia media a compresión de la pila, calculada con base en su área neta y obtenida a partir de ensayos de compresión realizados sobre la mampostería. Por su parte, el factor de corrección por esbeltez (λ) varía según la normativa utilizada. La mayoría de los reglamentos establece un mínimo de dos o tres hiladas para la construcción de pilas de mampostería; no obstante, no existe un valor de referencia unificado para el factor de esbeltez. En la Tabla 7 se muestran los valores considerados por sus distintas normativas para el cálculo de la resistencia de mampostería con un altura equivalente a tres hiladas [16].

Tabla 7. Factor de corrección por esbeltez aplicado para cada normativa [16].

Normativa	Factor de esbeltez (λ)
Euro código [5]	0.95
AS 3700 [14]	0.93
CSA S304 [15]	1.00

Por su parte, la normativa estadounidense (TMS 402/602 [13]) establece la ecuación 17, para incorporar el efecto de esbeltez en la resistencia de la mampostería. En este caso, el factor de corrección por esbeltez (λ) adoptado por dicha norma es de 1.15 [16].

$$f'_{p,net} = (\bar{f}_{b,net} \lambda)(1 - 1.28COV) \quad 17$$

La variación en las ecuaciones utilizadas para estimar la resistencia a compresión de la mampostería entre distintas normativas internacionales se debe, en gran medida, al enfoque estadístico adoptado por cada una respecto a la probabilidad de falla aceptable. Cada reglamento establece su propia ecuación de diseño considerando factores como la resistencia media de las pilas, la variabilidad del material y un coeficiente estadístico que refleja el nivel de confiabilidad estructural requerido.

Como resultado, aunque las propiedades mecánicas de los materiales son similares, las resistencias de diseño pueden diferir considerablemente entre reglamentos como TMS 402/602 [13], CSA S304 [15], Euro código [5], AS 3700 [14] y NTC – M [2]. Esta diferencia no se debe únicamente a las metodologías de ensayo empleadas, sino también a las distintas probabilidades de falla consideradas aceptables dentro de la filosofía de diseño de cada normativa.

2.3.3. Módulo de elasticidad

Para el cálculo del módulo de elasticidad de la mampostería, las normativas internacionales proponen distintas ecuaciones empíricas. Esta propiedad mecánica se estima generalmente a partir de la resistencia de diseño a compresión de la mampostería, considerando las características del material y los factores de seguridad adoptados por cada reglamento.

La norma mexicana (NTC – M [2]) establece la ecuación 18 para determinar el módulo de elasticidad de la mampostería construida con tabiques o bloques huecos de concreto. Dicha expresión esta formulada específicamente para representar el comportamiento del material bajo cargas de corta duración.

$$E_{p,b} = 800f'_{p,b} \quad 18$$

Cabe mencionar que la normativa mexicana considera la resistencia de diseño de la mampostería en función del área bruta, denotada como $f'_{p,b}$. Esto implica que los esfuerzos se calculan tomando como referencia la sección transversal total del elemento, sin descontar los vacíos o huecos presentes en los bloques.

La norma europea (Euro código [5]) establece la ecuación 19 para determinar el módulo de elasticidad de la mampostería, a partir de la resistencia de diseño. Esta formulación permite estimar el módulo de elasticidad a corto plazo para su aplicación en análisis estructurales, en ausencia de resultados experimentales específicos.

$$E_{p,net} = K_E f'_{p,net} \quad 19$$

El valor del coeficiente K_E varía en función de la región donde se lleve a cabo el diseño de la mampostería, ya que cada país puede establecer su propio valor a través del Anexo Nacional correspondiente. No obstante, la normativa europea recomienda, de manera general, utilizar un valor de referencia igual a 1000.

La norma australiana (AS 3700 [14]) proporciona una ecuación empírica para estimar el módulo de elasticidad de la mampostería construida con unidades de concreto o arcilla unidas con mortero. Esta ecuación es aplicable independientemente del tipo del mortero utilizado y considera el comportamiento del material bajo cargas de corta duración. La ecuación 20 establece esta relación de manera general para su uso en análisis estructurales.

$$E_{p,net} = 1000 f'_{p,net} \quad 20$$

La ecuación anteriormente mencionada se encuentra especificada en el Capítulo 3 de la norma [14], particularmente en la Tabla 3.4, donde se indican los valores correspondientes según el tipo de unidad utilizada.

La norma canadiense (CSA S304 [15]) define que, para la mampostería construida con unidades de concreto o arcilla, se utilice la ecuación 21 para estimar el módulo de elasticidad. Esta expresión es válida para casos en los que el valor obtenido no exceda los 20,000 MPa, límite que busca mantener la coherencia con el comportamiento real del material bajo cargas típicas de diseño.

$$E_{p,net} = 850 f'_{p,net} \quad 21$$

Esta relación se encuentra especificada en el Capítulo 6 de la norma [15], donde se detalla la ecuación correspondiente para su aplicación en el diseño estructural.

Por último, la normativa estadounidense [13] establece la ecuación 22 como una alternativa para estimar el módulo de elasticidad de la mampostería sin recurrir a ensayos experimentales ni a modelaciones numéricas.

$$E_{p,net} = 900f'_{p,net} \quad 22$$

Esta expresión esta formulada con base en datos empíricos y es aplicable específicamente a elementos conformados por bloques de concreto o tabiques de arcilla unidos con mortero tipo N o S.

A diferencia de la normativa mexicana, las demás normativas mencionadas, como la europea (Euro código [5]), australiana (AS 3700 [14]), canadiense (CSA S304 [15]) y americana (TMS 402/602 [13]), determinan la resistencia de diseño a compresión en función del área neta de la sección transversal, representada mediante el parámetro $f'_{p,net}$. Esta consideración se basa en el hecho de que el área neta excluye los huecos presente en los elementos de la mampostería, permitiendo una estimación más precisa del esfuerzo efectivo que puede resistir el material. El uso de esta resistencia ajustada es fundamental en los procedimientos de diseño estructural que busca reflejar con mayor fidelidad el comportamiento real de la mampostería bajo carga axial.

2.4. MODELACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA

En este apartado se presenta una revisión bibliográfica centrada en estudios relacionados con la modelación numérica del comportamiento de la mampostería. En primera instancia, se describen los tipos de modelaciones con los que se cuenta actualmente, las ventajas y desventajas que cada una presenta. Nos enfocaremos en describir el tipo de modelación, los recursos computacionales que cada una demanda y la precisión con la que se obtiene el comportamiento de la mampostería.

En segunda instancia, se recopilaron diversas investigaciones que, en su mayoría, combinan ensayos experimentales con simulaciones numéricas, a fin de validar los resultados obtenidos. Cabe destacar que actualmente existen múltiples programas especializados para realizar análisis matemáticos de estructuras de mampostería. No obstante, el presente estudio se enfoca específicamente en la simulación numérica mediante el método de elementos finitos.

2.4.1. Tipos de modelación numérica

La macro – modelación, también conocida como modelación homogénea, es una técnica comúnmente empleada en análisis estructurales de gran escala, donde los efectos locales de la interacción entre los bloques y mortero no se consideran en comportamiento general de la estructura. En este enfoque, no se realiza una diferenciación entre las unidades y las juntas de mortero, como se ilustra en la Figura 10 (a). En su lugar, la mampostería se representa como un material compuesto anisotrópico, estableciendo relación entre los esfuerzos y deformaciones promedio en la mampostería. Para aplicar adecuadamente este método, se requiere contar con resultados experimentales obtenidos a partir de ensayos sobre muestras de mampostería de tamaño representativo, bajo condiciones de carga homogéneas, que permitan caracterizar el comportamiento global del sistema de manera coherente con el modelo numérico [25].

Las principales ventajas de la macro – modelación son: (1) es aplicable para estructuras compuestas por muros sólidos de dimensiones suficientemente grandes; (2) requiere menos tiempo y memoria de cómputo; (3) y permite una generación de malla más sencilla para el usuario.

En cambio, este tipo de modelación numérica tiene como desventajas: (1) no permite analizar fenómenos detallados como fisuración localizada, deslizamientos en juntas o concentración de esfuerzos en elementos pequeños; (2) en las áreas heterogéneas de la mampostería, la suposición de homogeneidad puede llevar a resultados poco realistas; (3) y no considera la

interacción específica entre el bloque y el mortero ignorando los efectos de adherencia, separación o daño progresivo en las interfaces.

La micro – modelación simplificada es una técnica de modelado numérico en la que se asignan propiedades mecánicas específicas a cada uno de los materiales que conforman el elemento estructural, los bloques y el mortero. No obstante, las zonas de contacto o interfaces entre estos materiales no se representan de forma detallada, sino que se asume una unión continua o un contacto promedio entre ellos. En la Figura 10 (b) se ilustra un modelado simplificado, en algunos casos, con el objetivo de reducir aún más la complejidad computacional, es posible modelar únicamente un fragmento representativo de la estructura, siempre que esta sea simétrica. Alternativamente, se puede representar solo la región central del sistema de mampostería, enfocándose en la interacción entre una junta de mortero y dos bloques adyacentes, como se indica mediante la línea punteada [6].

Las principales ventajas de la simulación simplificada en comparación con una simulación más detallada son: (1) la reducción significativa del tiempo; (2) menor requerimiento de recursos computacionales; (3) y buena aproximación a los estudios paramétricos o preliminares. Este tipo de modelado es especialmente valioso cuando se busca un equilibrio entre precisión y eficiencia.

Por otro lado, las principales desventajas serían: (1) una menor precisión al modelar fenómenos localizados, como agrietamientos o fallos por deslizamiento en juntas; (2) y no captura con detalle el comportamiento no lineal o degradación progresiva en las interfaces.

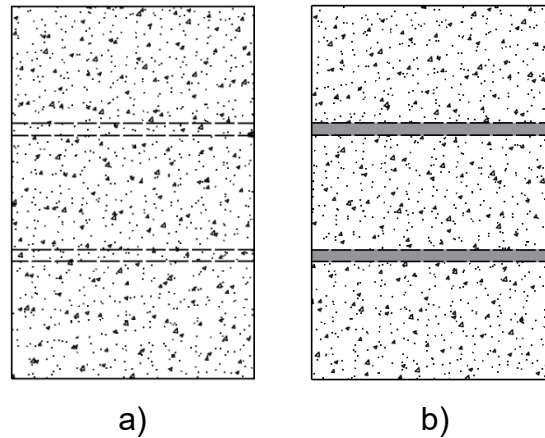


Figura 10. Tipos de modelación numérica. (a) Macro – modelación y (b) Micro – modelación simplificada.

La micro – modelación numérica detallada es una técnica numérica avanzada que permite simular con alto nivel de detalle el comportamiento estructural de sistemas de mampostería. Este tipo de aproximación es adecuada en elementos estructurales pequeños como pilas y muretes con alta heterogeneidad de los estados de esfuerzos y deformaciones. Este enfoque implica la representación explícita de cada uno de los componentes que conforman el sistema, bloques y juntas de mortero. Asimismo, es posible definir la interacción entre estos elementos, ya sea mediante condiciones de contacto o interfaces especiales, con el fin de representar la mampostería lo más cercano posible a lo observado experimentalmente [8].

Las principales ventajas de optar por una micro – modelación numérica detallada son: (1) se considera una técnica eficiente para disminuir la cantidad de ensayos físicos, los cuales suelen ser costosos y requerir mucho tiempo; (2) permite el desarrollo de modelos matemáticos que establecen relaciones entre el módulo de elasticidad (E_m) y la resistencia a compresión (f'_m); y (3) facilita la relación de análisis multifactoriales, es decir, permite modificar y evaluar distintas propiedades de los componentes en estudio de manera sistemática [16].

En contraste, una de las principales desventajas de esta metodología es la necesidad de contar con recursos computacionales adecuados para ejecutar las

simulaciones, así como tener conocimientos técnicos especializados en los programas de modelación empleados [16].

En la Figura 11 muestra de forma ilustrativa el esquema de una micro – modelación detallada, la cual puede desarrollarse tanto en dos como en tres dimensiones. Este tipo de modelado incluye la representación explícita de la interfaz entre los materiales que conforman la mampostería, destacada mediante líneas punteadas en color rojo. Dichas interfaces permiten simular de manera precisa la interacción entre las piezas y el mortero, así como representar las posibles discontinuidades que se generan en el sistema [6].

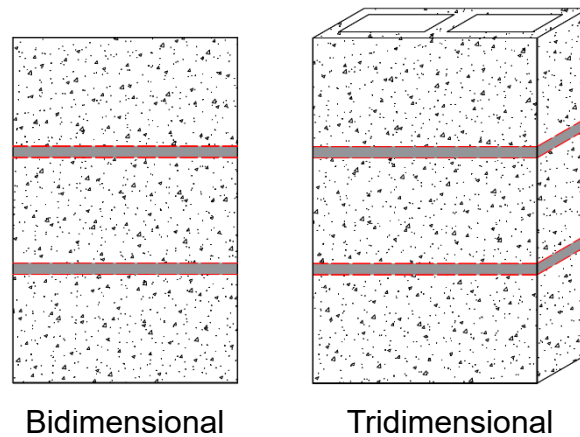


Figura 11. Micro – modelación detallada.

2.4.2. Simulación y variabilidad en modelos numéricos

Durante los últimos años, diversos autores han desarrollado investigaciones que se centran en la modelación numérica con el propósito de analizar y reproducir el comportamiento de la mampostería sometida a ensayos experimentales. Para lograr una representación adecuada del espécimen, las simulaciones requieren una programación rigurosa del modelo, incluyendo la cuidadosa selección de parámetros clave y características constitutivas del material, con el fin de alcanzar una correspondencia realista con los resultados experimentales. A continuación, se presentan distintos enfoques metodológicos utilizados por varios

investigadores, destacando la variabilidad en la selección de modelos constitutivos, condiciones de frontera, mallas y criterios de daño o falla.

Las investigaciones desarrolladas por Barbosa et al. en el 2010 [26] y Mohamad et al. en el 2011 [27] presentaron enfoques metodológicos similares, centrados en el análisis numérico de pilas de mampostería de tres hiladas mediante el método de elementos finitos (MEF), con el propósito de correlacionar los resultados de las simulaciones con los obtenidos experimentalmente. Ambos estudios implementaron el software DIANA [28] para llevar a cabo las simulaciones, aplicando modelos constitutivos no lineales del sistema bloque – mortero bajo compresión axial.

En la investigación de Barbosa et al. [26] se emplearon diferentes niveles de resistencia tanto para los BHC como para el mortero, con el fin de evaluar su influencia en el comportamiento mecánico de la mampostería (ver Tabla 8). El estudio destacó la comparación de tres tipos de análisis: esfuerzo plano (PS), deformación plana (PE) y análisis tridimensional (3D). Debido a la simetría del espécimen en estudio, el modelo se simplificó en fragmentos donde interactúan el bloque y la junta del mortero. Los resultados demostraron que el modelo tridimensional ofrece una mejor aproximación, con diferencias promedio del 10% respecto a los valores experimentales.

Tabla 8. Resultados del método experimental en pilas de mampostería por Barbosa et al. [26].

Pila	f_b (MPa)	f_m (MPa)	f_p (MPa)
P1	13.70	9.40	10.20
P2	11.20	7.70	10.00
P3	15.00	15.50	12.00
P4	21.80	22.20	16.90

f_b , resistencia a compresión del BHC.

f_m , resistencia a compresión del mortero.

f_p , resistencia a compresión de la pila.

Por su parte, Mohamad et al. [27] analizaron la influencia del mortero en el comportamiento estructural, empleando diferentes niveles de resistencia (ver

Tabla 9). En el análisis de los resultados experimentales se identificó una clara dependencia entre la resistencia del mortero y el modo de la falla. Los resultados experimentales y numéricos mostraron diferencias considerables, siendo el mortero con menor resistencia el que mostro una mayor precisión. Aunque el estudio se desarrolló bajo una simulación bidimensional, los autores señalaron que es más conveniente un estudio tridimensional para lograr resultados más representativos a la mampostería.

Tabla 9. Resultados del método experimental en pilas de mampostería por Mohamad et al. [27].

Pila	f_b (MPa)	f_m (MPa)	f_p (MPa)
I	23.10	19.80	15.20
II	23.10	7.20	14.30

f_b , resistencia a compresión del BHC.
 f_m , resistencia a compresión del mortero.
 f_p , resistencia a compresión de la pila.

De manera más avanzada, las investigaciones de Zhu et al. en el 2017 [7] y Álvarez et al. en el 2020 profundizan en la modelación tridimensional, incorporando metodologías de análisis más sofisticadas que buscan no solo la correspondencia experimental, sino también la predicción estadística y multifactorial del comportamiento de la mampostería. Ambas investigaciones, utilizaron el programa ABAQUS [29] y adoptaron el modelo de Plasticidad por Daño del concreto (CDP) implementando un esquema incremental no lineal. La interacción entre los elementos BHC y mortero fue definida mediante el algoritmo “*Master – slave*”, considerando el BHC como el material de mayor rigidez, y aplicando condiciones de contacto tipo “*Hard contact*” y fricción tangencial basada en la teoría de Coulomb.

La investigación de Zhu et al. [7] se enfocó en evaluar la variabilidad de las propiedades de los materiales y su influencia en la resistencia a compresión en muretes de mampostería. Para ello desarrollaron un enfoque probabilístico que incluyó un análisis no espacial (con propiedades idénticas para los materiales como el BHC y el mortero) y un análisis espacial, donde las propiedades

mecánicas varían de forma independiente en cada simulación (ver Figura 12). Con este fin, aplicaron el método de Monte Carlo para generar distribuciones aleatorias de los parámetros, considerando el módulo elástico, el coeficiente de Poisson y las resistencia a compresión tensión tanto del BHC como del mortero. Los resultados mostraron que el modelo espacial redujo su variabilidad (COV) de los resultados (6.4%) en comparación con el modelo no espacial (12.1%), concluyendo que la variabilidad natural de los materiales debe considerarse para obtener predicciones más realistas del comportamiento a compresión de la mampostería.

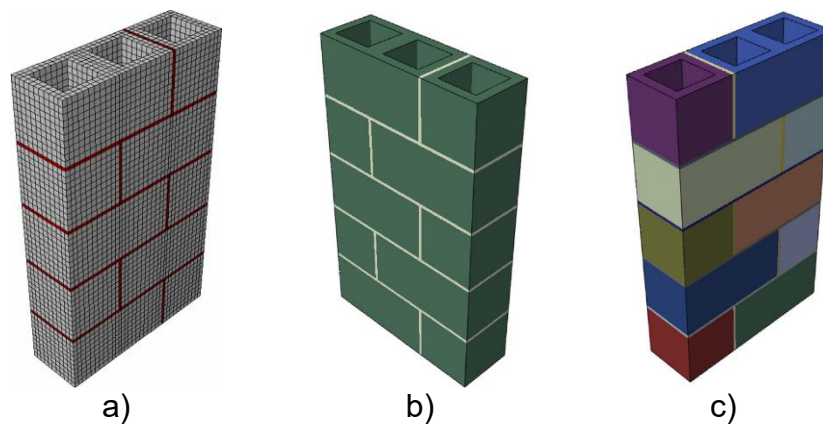


Figura 12. Simulación numérica del murete de mampostería; (a) mallado del modelo, (b) modelo numérico sin variación espacial y (c) modelo numérico con variación espacial en sus materiales por Zhu et al. [7].

Adicionalmente, mediante un análisis de sensibilidad Zhu et al. [7] identificaron los parámetros con mayor influencia en la resistencia de la mampostería, destacando la resistencia a tensión del bloque como la variable más significativa (75%), seguida por la resistencia a compresión del mortero, la resistencia a compresión del BHC y los módulo de elasticidad.

Por otro lado, Álvarez et al. [12] orientaron su investigación hacia la formulación de ecuaciones empíricas que permite estimar la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad de la mampostería a partir de propiedades de su componentes. Para ello, desarrollaron un método experimental donde se realizó en primera instancia la caracterización de cada uno de los elementos que

integran la mampostería, para posteriormente ensayar pilas de tres hiladas. Posteriormente para el desarrollo del modelo numérico llevaron a cabo una calibración donde propusieron modelos de regresión, obteniendo errores relativos menores al 5% (ver Figura 13). Asimismo, el análisis de sensibilidad demostró que la resistencia a compresión y tensión del BHC, así como el espesor del mortero, tienen una mayor influencia en la resistencia máxima a compresión de la pila. Por otro lado, la resistencia a compresión del BHC y la resistencia a compresión del mortero son los parámetros más influyentes en el módulo de elasticidad en la mampostería.

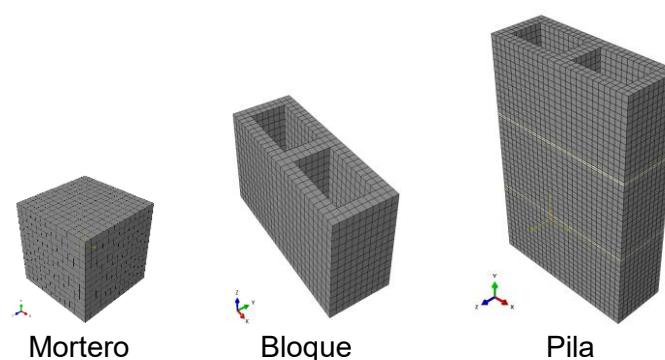
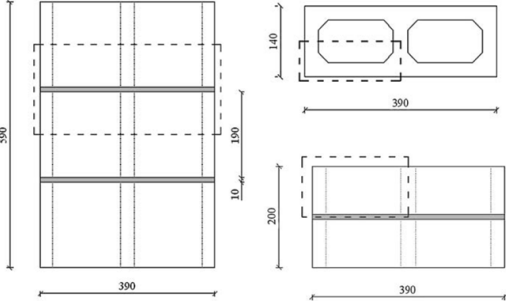
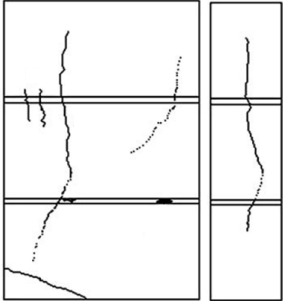
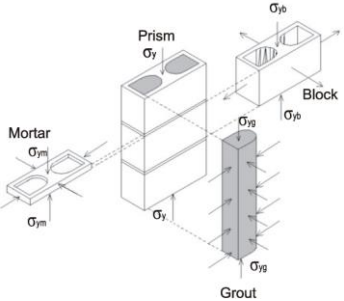


Figura 13. Elementos y pila de mampostería para el modelado numérico por Álvarez et al [8, 12].

A continuación, en la Tabla 10 se presenta una comparación de los modos de falla observados en los estudios analizados. De manera general, el comportamiento de la mampostería bajo compresión axial se caracterizó por la formación inicial de grietas verticales en la cara frontal de los especímenes, las cuales tienden a propagarse a lo largo de los bloques completos. Posteriormente, se observan fisuras adicionales en la cara lateral, también de orientación vertical, concentradas principalmente en la zona del alma de los bloques. Algunos autores [26, 27] reportaron, además, la aparición de fallas por aplastamiento localizado en las juntas de mortero, fenómeno que ocurre cuando la resistencia del mortero es considerablemente inferior a la del BHC.

Tabla 10. Falla en pilas de mampostería empleando el método experimental [7, 12, 26, 27].

Referencia	Diseño metodológico	Tipo de falla
Barbosa et al. [26]		 
Mohamad et al. [27]		 
Zhu et al. [7]		
Álvarez et al. [12]		

Por otro lado, la Tabla 11 resume los principales parámetros empleados en la modelación numérica de los diferentes autores analizados. Se destacan los aspectos más relevantes relacionados con los modelos constitutivos, los criterios de análisis y las condiciones adoptadas.

Tabla 11. Tipo de análisis con MEF encontrados en la literatura [7, 12, 26, 27].

Referencia	Modelo numérico	Software utilizado	Tipo de análisis	Condiciones y parámetros
Barbosa et al. [26]	MEF Tridimensional y bidimensional	DIANA	No lineal	Ángulo de fricción: 10° Ángulo de dilatación: 5°
Mohamad et al. [27]	MEF Bidimensional	DIANA	No lineal	Ángulo de fricción: 9° Ángulo de dilatación: 5°
Zhu et al. [7]	MEF Tridimensional con variación estocástica C3D8R	ABAQUS	No lineal CDP	Ángulo de dilatación: 45° Excentricidad: 0.10 f_{bo}/f_{co} : 1.16 K_c : 0.667 Parámetro de viscosidad: 0.0001
Álvarez et al. [12]	MEF Tridimensional C3D20R	ABAQUS	No lineal CDP	Ángulo de dilatación: 35° Excentricidad: 0.10 f_{bo}/f_{co} : 1.16 K_c : 0.667 Parámetro de viscosidad: 0.0004

f_{bo}/f_{co} - excentricidad de la función del flujo.

K_c - radio del segundo invariante del esfuerzo en el meridiano de tensión respecto al del meridiano de compresión.

2.5. ESTUDIOS PARAMÉTRICOS

En este apartado se recopilan y analizan las expresiones propuestas por diversos autores para la estimación de la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad de las pilas de mampostería. El objetivo principal es llevar a cabo un análisis comparativo de las variables consideradas en cada modelo, los rangos de resistencias que abarcan y las condiciones específicas bajo las cuales son aplicables. Esta revisión permite identificar las similitudes y diferencias más relevantes entre las distintas formulaciones, y proporciona una base sólida para evaluar su validez y aplicabilidad en contextos particulares del diseño estructural.

El estudio realizado por Khalaf et al. en 1994 [30] se basó en la elaboración de ensayos experimentales en pilas de mampostería de seis hiladas, sometidas a carga axial, con el propósito de analizar el comportamiento mecánico bajo compresión de la mampostería. El objetivo principal de la investigación fue desarrollar correlaciones empíricas a partir de los resultados experimentales, que permitan estimar tanto el módulo de elasticidad como la resistencia a compresión de la mampostería. Las ecuaciones propuestas resultan aplicables a mampostería con o sin relleno de concreto.

La ecuación 23 estima el módulo de elasticidad para mampostería sin relleno de concreto.

$$E_m = \frac{1}{(1 - \delta)/\alpha E_{mrs} + \delta/E_{bs}} \quad 23$$

En donde:

α 0.45 para un mortero con un espesor de 10 mm.

E_{mrs} Módulo de elasticidad secante del mortero obtenido a partir de ensayos experimentales con especímenes cúbicos.

E_{bs} Módulo de elasticidad secante del BHC a partir del ensayo de una pila de mampostería.

En contraste, la ecuación 24 estima el módulo de elasticidad de la mampostería con relleno de concreto.

$$E_m = \frac{1}{(1 - \delta)/\alpha E_{mrs} + \delta/E_{bs}} + \Gamma E_{cs} \quad 24$$

En donde:

Γ 0.25.

E_{cs} Módulo de elasticidad secante del concreto de relleno de la mampostería obtenida a partir de ensayos experimentales con especímenes de tipo cubico.

δ Factor de corrección. $(h_b/h_b + h_j)$

h_b Altura del BHC.

h_j Espesor del mortero.

Por otra parte, el estudio también propone la ecuación 25 para estimar la resistencia a compresión de la mampostería con relleno de concreto en sus huecos.

$$f_m = 0.25f_c + 1.3$$

25

En donde:

f_c Resistencia del concreto de relleno de la mampostería.

Es importante destacar que las ecuaciones propuestas la investigación mencionada [30], se encuentran expresadas en MPa. Así mismo, las ecuación formuladas para la estimación del módulo de elasticidad (ec. 23 y 24) fueron validas con los resultados experimentales, obteniendo diferencias máximas del 5%. Esta verificación confirma la confiabilidad y precisión de las correlaciones propuestas, reforzando la aplicabilidad en el análisis estructural.

La investigación desarrollada por Köksal et al. en el 2005 [31] tuvo como finalidad analizar el comportamiento a compresión de pilas de mampostería con y sin relleno, mediante la implementación de un modelo tridimensional no lineal. El estudio se llevó a cabo utilizando el programa LUSAS, basado en el MEF. Los autores consideraron parámetros como la cohesión, el ángulo de fricción interna (30° a 35°) y la relación de daño de los materiales, comparando los resultados numéricos con datos experimentales previos [30, 32, 33]. A partir de este análisis, se propusieron ecuaciones empíricas para estimar la resistencia compresión de la mampostería, tanto en configuraciones con relleno como sin relleno de concreto, alcanzando coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.90. Los resultados confirmaron que el modelo tridimensional permite representar con precisión la no linealidad del material y los mecanismos de falla del sistema de mampostería.

El modelo metodológico se ilustra en la Figura 14, donde se presentan las dimensiones y disposición general del espécimen analizado.

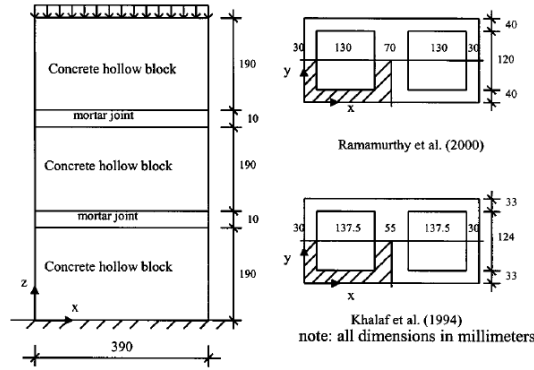


Figura 14. *Espécimen analizado numéricamente por Köksal et al. [30, 31, 33].*

La ecuación 26 permite estimar la resistencia a compresión de la mampostería conformada por BHC sin relleno de concreto.

$$f'_m = 1.57 \ln(f_{mr}) + 0.75f_{bl} \quad 26$$

En donde:

f_{mr} Resistencia a la compresión del mortero.

f_{bl} Resistencia a la compresión del BHC.

R^2 0.99.

Por otro lado, la ecuación 27 permite estimar la resistencia a compresión de la mampostería con BHC con relleno de concreto.

$$f'_m = 1.57 \ln(f_{mr}) + 0.75f_{bl} + 5.81 \ln\left(\frac{f_{gr}}{f_{bl}^{1.2}}\right) \quad 27$$

En donde:

f_{gr} Representa la resistencia del mortero de relleno.

R^2 0.74.

Las expresiones obtenidas en esta investigación presentan resultados en MPa. Es importante mencionar que las ecuaciones son aplicables en BHC con resistencia a la compresión mayor a 6.90 MPa y morteros con una resistencia a compresión (especímenes cúbicos) mayor a 4.27 MPa [16].

Por su parte, Jaafar et al. (2006) [34] desarrollaron una investigación experimental enfocada en el comportamiento de la mampostería sin mortero,

conformada por bloques interconectados mediante un sistema de uniones mecánicas. El estudio tuvo como objetivo establecer correlaciones empíricas entre la resistencia a compresión del bloque individual, la pila y el muro (ver Figura 15), con el fin de evaluar la eficiencia estructural del sistema en comparación con la mampostería tradicional.

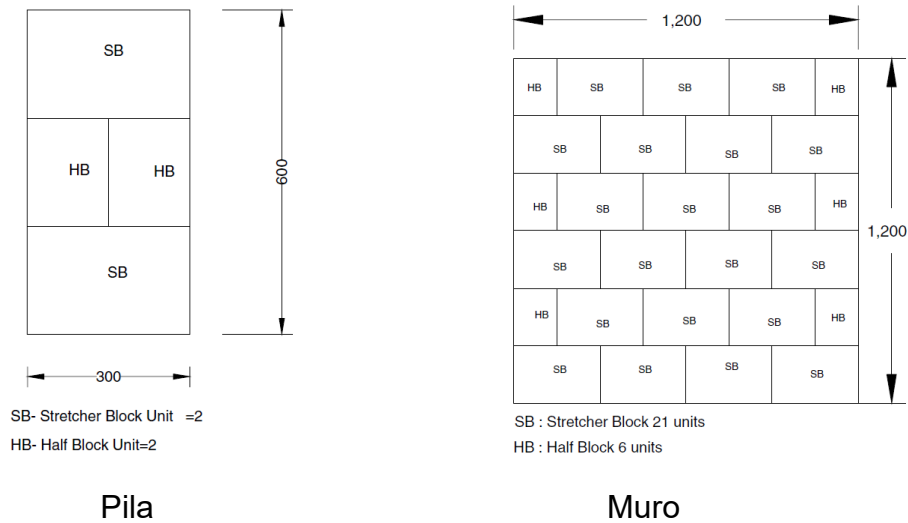


Figura 15. Dimensiones de especímenes ensayados experimentalmente Jaafar [34].

Los resultados demostraron que la resistencia promedio a compresión de los especímenes tipo pila correspondió al 47% de la resistencia del bloque individual, mientras que la resistencia a compresión del panel tipo muro representó el 83% de la resistencia del espécimen y el 39% de la resistencia del bloque individual. Para resumir la correlación entre el bloque individual, el espécimen y el panel básico, se obtuvieron las ecuaciones de 28 a la 30.

$$f_{cp} = 0.47f_{cb} \quad \mathbf{28}$$

$$f_{cw} = 0.83f_{cp} \quad \mathbf{29}$$

$$f_{cw} = 0.39f_{cb} \quad \mathbf{30}$$

En donde:

f_{cb} Resistencia a compresión del bloque individual.

f_{cp} Resistencia a compresión de la pila.

f_{cw} Resistencia a compresión del muro.

Las ecuaciones anteriores nos permiten estimar la resistencia de elementos de mampostería con BHC interconectados en unidades de MPa. La investigación tomó como referencia la normativa británica BS 5628: Parte 1 [35], la cual está relacionada con el diseño de estructuras de mampostería. Esta norma propone diversas ecuaciones para estimar la resistencia de la mampostería unida mediante mortero. A partir de estas bases, los autores concluyeron que los BHC con sistema de interconexión pueden sustituir fundamentalmente la unión de mortero desde una perspectiva estructural.

En el caso de Haach et al. [36] en el 2010, llevaron a cabo una investigación que se centró en analizar la influencia de la dosificación del mortero sobre las propiedades mecánicas de la mampostería, considerando variaciones en la relación agua/cemento (w/c) como variable principal. Se realizaron ensayos experimentales conforme a la norma EN 1015 [37], evaluando la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y la resistencia a flexión del mortero. A partir de los resultados obtenidos, los autores propusieron ecuaciones empíricas que relacionan estas propiedades, alcanzando coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.90, lo que demuestra un alto grado de correlación entre las variables analizadas.

La ecuación 31 permite estimar la resistencia a la compresión del mortero (f_c).

$$f_c = 6.28e^{-1.21\left(\frac{w}{c}\right)} \quad 31$$

En donde:

w/c Relación agua/cemento de la mezcla.

R^2 0.91.

Posteriormente, la ecuación 32 permite determinar el módulo de elasticidad del mortero (E).

$$E = 3324.85f_c^{0.57} \quad 32$$

En donde:

R^2 0.70.

Finalmente, la ecuación 33 la resistencia a la flexión determinada como f_{fl} .

$$f_{fl} = 0.40f_c$$

33

En donde:

$$R^2 = 0.92$$

Es importante recalcar que las ecuaciones anteriormente mencionadas obtenidas en la investigación aplican para datos experimentales obtenidos en MPa. Con el objetivo de comprender la influencia del mortero en la mampostería como conjunto. Se construyeron pilas de mampostería de tres hiladas de altura, como se muestra en la Figura 16 y se ensayaron haciendo variaciones con las diferentes mezclas de mortero diseñadas. Así mismo, se construyeron pilas con y sin relleno de concreto como refuerzo.

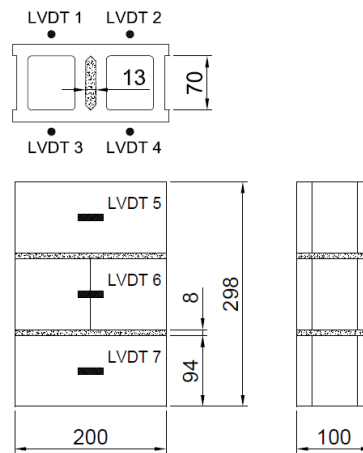


Figura 16. Dimensiones de pilas ensayados experimentalmente Haach et al. [36] (dimensiones en milímetros).

Los resultados evidenciaron que la resistencia del mortero tiene un impacto directo en la rigidez y la capacidad portante de la mampostería, además de señalar que las expresiones del Euro código tienen a subestimar la resistencia real del material, con diferencias de hasta un 50% respecto a los valores experimentales.

Por otro lado Sarhat and Sherwood (2014) [17] desarrollaron un estudio basado en un amplia base de datos experimentales de pilas y muretes de mampostería sin relleno [20, 26, 32, 33, 38], con el propósito de establecer ecuaciones

empíricas que permitieran estimar la resistencia a compresión en función de las propiedades de los materiales y las condiciones geométricas. Los autores consideraron como variables principales la resistencia a compresión de los bloques, la resistencia a compresión del mortero, la relación altura/espesor y el tipo de colocación del mortero (*full* o *face*).

En la Tabla 12 se presentan los parámetros considerados en la base de datos, así como los rangos en los que se encuentra cada uno, con el objetivo de delimitar adecuadamente el ámbito de aplicación de la ecuación desarrollada.

Tabla 12. *Parámetros en los cuales es aplicable las ecuaciones propuestas por la investigación de Sarhat y Sherwood [17].*

Parámetros	Rango
Resistencia a compresión del bloque (MPa)	8.90 – 45.60
Espesor del bloque (mm)	100 – 240
Área neta del bloque (%)	51 – 74
Porosidad del bloque (%)	26 – 49
Resistencia del mortero (MPa)	3.65 – 26.90
Relación de esbeltez (h/t)	1.81 – 6.25

Mediante análisis estadísticos y regresión múltiple, propusieron las siguientes ecuaciones que incorporan factores de corrección por esbeltez y condiciones de apoyo.

La resistencia a compresión de la mampostería (f'_m) se obtiene con la ecuación 34.

$$f'_m = 1.107C_bC_h(f_{bl})^{0.75}(f_{mr})^{0.18} \quad 34$$

En donde:

- f_{bl} Resistencia a compresión del BHC.
- f_{mr} Resistencia a compresión del mortero.
- C_h Factor de corrección en función de la relación altura/espesor (h/t).
- C_b Factor de corrección en función del tipo de colocación del mortero.
- R^2 0.82.

Así mismo, el factor de corrección en función de la relación altura/espesor se puede calcular con las condiciones presentes en la ecuación 35. Y, por otro lado, el factor de corrección en función de la colocación del mortero se define como 1 para el mortero en caras laterales (*face*) y 0.91 para el mortero área neta (*full*).

$$C_h = \begin{cases} \frac{1}{\left(1 - 0.05 \left(5 - \frac{h}{t}\right)\right)} & \frac{h}{t} < 5 \\ 1 & \frac{h}{t} \geq 5 \end{cases} \quad 35$$

Los resultados demostraron que las expresiones desarrolladas presentan mejor ajuste y menor dispersión que las ecuaciones establecidas por las normas como la canadiense [15] y australiana [14], ofreciendo una alternativa más precisa para la predicción de la resistencia de la mampostería simple.

En el estudio de Fortes et al. en el 2015 [19] se analizó el comportamiento a compresión de las pilas de mampostería con BHC, tanto con relleno como sin relleno de concreto. El objetivo principal, fue evaluar la influencia combinada de la resistencia del bloque, del mortero y del concreto de relleno sobre la capacidad de la mampostería. Para ello, realizaron ensayos experimentales tomando como referencia la normativa brasileña (ABNT NBR 15961-2), en pilas conformadas por dos hiladas y juntas de mortero de 10 mm, considerando diferentes combinaciones de material.

A partir de los resultados, los autores propusieron ecuaciones empíricas para estimar la resistencia a compresión de la mampostería (f'_m) en ambas condiciones (rellena o no rellena de concreto). En primer lugar, se presentan la ecuación 36 obtenidas con la mampostería sin relleno.

$$f'_m = 18.46 \ln(f_b) - 37.71 \quad 36$$

En donde:

R^2 0.96

f_b Resistencia del BHC.

En segundo lugar, obtuvieron la ecuación 37 correspondientes a la mampostería con relleno de concreto.

$$f'_m = 12.18 \ln(f_b) - 20.16 \quad 37$$

En donde:

$$R^2 = 0.95$$

Los resultados arrojaron buena eficiencia del 10% en la mampostería sin relleno cuando los bloques son de baja resistencia. La ecuaciones aplican en para una resistencia del bloque mayor a 13 MPa.

De manera reciente Pereira et al. (2024) [18] llevaron a cabo una análisis estadístico exhaustivo basado en una base de datos de 864 resultados experimentales de pilas de mampostería, tanto huecas como rellenas, con el propósito de desarrollar ecuaciones empíricas que permitan estimar la resistencia a compresión de la mampostería en función de las propiedades de sus materiales. Para ello, los autores agruparon los datos en tres rangos de resistencia del BHC: grupo 1 ($\leq 8 \text{ MPa}$), grupo 2 ($8 \text{ a } 18 \text{ MPa}$) y grupo 3 ($\geq 18 \text{ MPa}$), considerando también la influencia del tipo de mortero y del relleno.

En la Tabla 13 se presentan las fórmulas propuestas para el cálculo de resistencia a compresión de las pilas de mampostería sin relleno (f_{pk}). Las ecuaciones propuestas para este y otros tipos de pilas de mampostería, están en función de la resistencia del BHC (f_{bk}) y la resistencia a compresión del mortero (f_a). En cada una de las ecuaciones propuestas se incluye una columna con el coeficiente de terminación correspondiente (R^2), esto nos ayuda a observar cual de las ecuaciones nos va a proporcionar un resultado mas cercano al real, estadísticamente representado.

Tabla 13. Ecuaciones propuestas por Pereira et al. [18] para la estimación de la resistencia a compresión de la mampostería sin relleno.

Grupo	Resistencia del BHC $\bar{f}_{b,net}$	Resistencia del mortero $f_{mc,cub}$	Ecuación propuesta Resistencia de la mampostería $\bar{f}_{p,net}$	R^2
1	5.35 – 7.97	4.02 – 9.68	$f_{pk} = 0.662f_{bk} + 0.081f_a$	0.973
2	8.02 – 17.89	4.88 – 25.32	$f_{pk} = 0.548f_{bk} + 0.167f_a$	0.979
3	18.08 – 34.36	11.51 – 35.40	$f_{pk} = 0.530f_{bk} + 0.161f_a$	0.971

Por otro lado, se presentan en la Tabla 14 las ecuaciones propuestas para la estimación de la resistencia a compresión con mampostería rellena (f_{pk}^*). Se involucra como parámetro la resistencia del concreto de relleno (f_{gk}).

Tabla 14. Ecuaciones propuestas por Pereira et al. [18] para la estimación de la resistencia a compresión de la mampostería con relleno.

Grupo	Resistencia del BHC $\bar{f}_{b,net}$	Resistencia del mortero f_g	Ecuación propuesta Resistencia a la mampostería $\bar{f}_{p,net}$	R^2
1	5.35 – 7.97	15.58 – 38.79	$f_{pk}^* = 2.33f_{bk} - 0.811f_a + 0.140f_{gk}$	0.960
2	8.02 – 17.89	15.02 – 43.93	$f_{pk}^* = 0.631f_{bk} + 0.155f_a + 0.235f_{gk}$	0.980
3	18.08 – 34.36	22.78 – 50.78	$f_{pk}^* = 0.537f_{bk} + 0.08f_a + 0.280f_{gk}$	0.989

Así mismo, se realizó una comparación con diferentes normativas internacionales [5, 13-15], observándose que las ecuaciones propuestas por los autores ofrecen mayor precisión y menor dispersión en predicción de la resistencia de la mampostería. Este trabajo representa un avance importante al proporcionar modelos generalizados aplicables a distintos rangos de resistencia de los materiales y condiciones constructivas.

Finalmente, Álvarez et al. (2024) [16] realizaron una investigación experimental y numérica con el objetivo de proponer ecuaciones empíricas para estimar la resistencia y el módulo de elasticidad de la mampostería. Para ello, elaboraron pilas sin relleno, variando la colocación del mortero (*full* y *face*), y aplicaron el MEF en el software ABAQUS [29], utilizando el modelo de CDP.

Para realizar el modelado, agregaron los parámetros físico – mecánicos que obtuvieron en los ensayos experimentales. En la Tabla 15 se muestran los resultados obtenidos en la investigación por medio de los ensayos experimentales. En donde $f_{b,net}$ y $f_{m,cub}$ es la resistencia a compresión del bloque y del mortero respectivamente; $E_{b,net}$ y $E_{m,cub}$ es el módulo de elasticidad para el bloque obtenido en área neta y del mortero obtenido en especímenes cúbicos; ε_c^{ch} es la última deformación antes de la falla por aplastamiento (falla por compresión) y; ε_t^{ck} es el inicio de la deformación de fisuración (falla por tensión).

BHC				
$f_{b,net}$ (MPa)	$E_{b,net}$ (MPa)	$f_{b,t}$ (MPa)	$\varepsilon_c^{ch}_{bu}$ (mm/mm)	$\varepsilon_t^{ck}_{bcr}$ (mm/mm)
6.77	1976	0.47	0.586%	0.025%
11.27	5337	0.85	0.192%	0.017%
28.66	9691	2.17	0.23%	0.022%
Mortero				
$f_{m,cub}$ (MPa)	$E_{m,cub}$ (MPa)	$f_{m,t}$ (MPa)	$\varepsilon_c^{ch}_{mu}$ (mm/mm)	$\varepsilon_t^{ck}_{mcr}$ (mm/mm)
17.09	17225.88	3.13	0.13%	0.018%

Tabla 15. Parámetros físico – mecánicos obtenidos por ensayos experimentales de Álvarez et al [16]

En la Tabla 16 se muestran los parámetros que se utilizaron para la modelación numérica, extraídos de los resultados experimentales de otros autores. El BHC de 15.40 MPa de resistencia se obtuvo por la investigación de Zahra et al (2021) [39], el de 18.60 MPa de resistencia por Barbosa et al. (2010) [26] y el de 19.80 MPa de resistencia por Barbosa et al. (2009) [40].

BHC			
$f_{b,net}$ (MPa)	$E_{b,net}$ (MPa)	$\varepsilon_c^{ch}_{bu}$ (mm/mm)	$\varepsilon_t^{ck}_{bcr}$ (mm/mm)
15.40	7143	0.38%	0.016%
18.10	9478	0.24%	0.016%
19.80	9519	0.18%	0.016%
Mortero			
$f_{m,cub}$ (MPa)	$E_{m,cub}$ (MPa)	$\varepsilon_c^{ch}_{mu}$ (mm/mm)	$\varepsilon_t^{ck}_{mcr}$ (mm/mm)
4.25	2572	0.52%	0.029%
7.50	4902	0.52%	0.028%

Tabla 16. Parámetros físico – mecánicos obtenidos por otros autores citados por la investigación de Álvarez et al [16]

Así mismo, las siguientes ecuaciones para la estimación de la resistencia a compresión, se llevaron a cabo varios análisis de regresión lineal y no lineal.

En Tabla 17 se muestran las ecuaciones obtenidas para la resistencia a compresión de la mampostería. Dichas ecuaciones aplican para una resistencia del BHC entre 6.77 a 28.66 MPa y una resistencia de mortero entre 4.25 a 17.09 MPa.

Colocación del mortero	Ecuaciones para la resistencia de la mampostería	R^2
Área neta (Full)	$f_m = 0.830 f_{b,net}^{0.879} f_{m,cub}^{0.143}$	0.996
Caras laterales (Face)	$f_m = 0.834 f_{b,net}^{0.884} f_{m,cub}^{0.085}$	0.998

Tabla 17. Ecuaciones propuestas para la resistencia a compresión de la mampostería por Álvarez et al. [16].

Por otra parte, en la investigación también obtuvieron modelos de regresión lineal para calcular el módulo de elasticidad. La ecuación 38 aplica para la mampostería con el mortero colocado en área neta y la ecuación 39 para el mortero colocado en caras laterales.

$$\begin{array}{lll}
 E_{pfull} = 427.27 f_m + 287 & R^2 = 0.95 & \mathbf{38} \\
 E_{pface} = 560.4 f_m + 450 & R^2 = 0.94 & \mathbf{39}
 \end{array}$$

Por último, se llevó a cabo la comparación con ecuaciones propuestas por otros autores [17-19, 31] y normativas internacionales [2, 13-15], indicando que se presentan menores errores relativos en comparación con otras expresiones establecidas, ofreciendo un alternativa más precisa para el análisis y diseño de muros de mampostería estructural.

2.6. COMENTARIOS FINALES DEL CAPITULO

Para finalizar con este capítulo, se mencionan aspectos importantes que se abordaron y conclusiones obtenidas.

1. La resistencia a compresión es el parámetro de mayor relevancia para la evaluación del comportamiento estructural, al depender directamente de las propiedades de sus componentes (bloques y mortero), así como la colocación del mortero, la relación altura/espesor del espécimen y la relación área neta/área bruta.
2. Diversos autores mexicanos [6, 10, 16] han demostrado la limitante al contemplar la colocación del mortero en caras laterales, debido a que dicha configuración de mortero es popularmente usada en la construcción.
3. Aunque contemplan factores comunes en las normativas internacionales y nacionales, presentan diferencias sustanciales en los métodos estadísticos, factores de corrección y consideraciones geométricas adoptadas. Por lo cual, se generan variaciones en los valores de diseño y en las expresiones utilizadas.
4. Entre los tipos de modelación numérica existentes, se ha comprobado que la micro – modelación es la más precisa para representar la interacción entre el bloque y el mortero, así como los mecanismos de falla. Los estudios recientes [7, 12, 16] ha logrado incorporar modelos tridimensionales con enfoque de Plasticidad por Daño del Concreto (CDP), logrando expresar con mayor precisión el comportamiento no lineal de la mampostería.
5. Diversos autores [16-18, 30, 31, 36] han desarrollado ecuaciones y correlaciones que permiten estimar la resistencia de la mampostería y el módulo de elasticidad con mayor precisión que las expresiones propuestas por las normativas vigentes [2, 13-15].
6. Las investigaciones más comunes [7, 12, 26, 27] han reportado que las fallas más comunes en pilas de mampostería con BHC y con la colocación del mortero en área neta, son la formación de grietas verticales en los

bloques y el aplastamiento del mortero, especialmente cuando existe una diferencia significativa en la resistencia de ambos materiales.

7. Las investigaciones actuales han logrado demostrar que la combinación de métodos experimentales, numéricos y estadísticos constituye la base para el desarrollo de modelos predictivos más precisos. Sin embargo, también se identifica la necesidad de seguir explorando la influencia de la variabilidad de los materiales, los tipos de colocación del mortero y las condiciones reales de construcción.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3. CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se aborda la metodología llevada a cabo en la presente investigación, así como la descripción física y mecánica de los materiales utilizados en la micro – modelación numérica detallada. Para la confección del modelo numérico, se utilizó la técnica de micro – modelado tridimensional mediante el método de elementos finitos (MEF), para lo cual se empleó el software ABAQUS/CAE [29]. Se realizó un diseño de experimentos multifactorial donde realizaron un total de 108 simulaciones, variando la resistencia de los bloques huecos de concreto (BHC) y su posición dentro de las pilas, la resistencia del mortero y su forma de colocación.

3.2. RECOLECCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES Y DISEÑO DE EXPERIMENTO

La metodología de esta investigación se ilustra de manera gráfica como un diagrama de flujo en la Figura 17, donde se visualiza cada una de las etapas de esta investigación.

La primera etapa de la metodología consistió en la recopilación de datos provenientes de investigaciones precedentes [6, 8]. La recolección de datos consistió en obtener datos físico-mecánicos de los materiales y su posible variación, así como, modelos numéricos calibrados a partir de ensayos experimentales, asegurando la confiabilidad de los resultados de esta investigación.

Como parte de la segunda etapa, se llevó a cabo una calibración numérica de las interacciones en el modelo, con el objetivo de optimizar el costo computacional. Esta calibración se realizó a partir de los modelo numéricos obtenidos en la

investigación de García – Cedeño [6]. Para este proceso, se consideró una distribución homogénea en la resistencia a la compresión de todos los BHC que conformaban las pilas de estudio. Esta etapa fue fundamental para ajustar los parámetros de interacción entre los componentes de las pilas dentro del modelo numérico.

Posteriormente, se implementó una simulación paramétrica utilizando un enfoque sistemático y determinista. En esta fase, se establecieron distintas combinaciones claves de los parámetros, permitiendo analizar su influencia en la respuesta estructural de las pilas de BHC. En particular, se definieron tres niveles de resistencia para los bloques, dos tipos de resistencia en el mortero y dos configuraciones en la colocación del mortero. Esta variabilidad en los parámetros permitió evaluar la influencia de estos factores en el comportamiento mecánico de las pilas sometidas a carga axial.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para examinar el impacto de las diferentes combinaciones de resistencia de los BHC y su influencia en la respuesta global de la pila, identificando las variables que más influyen en el comportamiento a compresión de la mampostería.

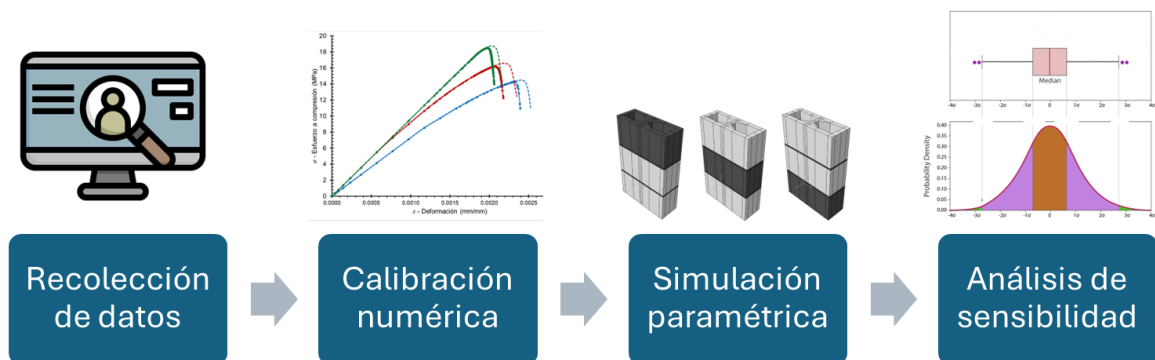


Figura 17. Diagrama de metodología.

Como resultado de los análisis, se pudieron identificar siete variables de respuesta, las cuales se emplearon para caracterizar el desempeño mecánico de las pilas de BHC:

1. Esfuerzo máximo a compresión (σ_{max}): valor máximo de esfuerzo alcanzado antes de la falla.
2. Deformación en el esfuerzo máximo (ε): deformación correspondiente al punto en el que se alcanza el esfuerzo máximo.
3. Deformación en la falla (ε): deformación total registrada en el momento del colapso de la pila.
4. Módulo elástico (E): relación entre el esfuerzo y la deformación en la región elástica del material.
5. Deformación plástica equivalente a compresión ($PEEQ$) en la falla: deformación plástica concentrada en la zona sometida a esfuerzos de compresión.
6. Deformación plástica equivalente a tensión ($PEEQT$) en la falla: deformación plástica concentrada en la zona sometida a esfuerzos de tensión.
7. Modo de falla: patrón de fractura observado en la pila, determinado por la distribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura.

Este conjunto de variables permite evaluar de manera detallada el comportamiento de la mampostería de BHC sometidas a compresión axial, proporcionando información relevante para comprender la influencia de la variabilidad en los parámetros mecánicos de los materiales que la componen.

3.2.1. Materiales y especímenes (Recolección de datos)

Para la realización de las simulaciones numéricas, se utilizaron materiales cuya caracterización se basó en investigaciones previas llevadas a cabo en el área metropolitana de Monterrey [6, 8, 10]. Estos estudios proporcionaron datos experimentales sobre las propiedades mecánicas de los materiales empleados en la construcción de la mampostería, permitiendo definir los parámetros necesarios para la modelación numérica con un alto grado de fiabilidad.

La mampostería analizada en esta investigación está compuesta por tres elementos fundamentales: (1) bloques de concreto (BHC) de dos huecos, los

cuales son ampliamente utilizados en la construcción, (2) mortero en las juntas, cumpliendo con la función de transferencia de cargas y la cohesión de la mampostería y, (3) azufre en el cabeceo de la mampostería, para garantizar una adecuada distribución de cargas.

La correcta caracterización de estos materiales fue clave para el desarrollo del modelo numérico, asegurando que los resultados obtenidos reflejaran con precisión el comportamiento estructural de la mampostería bajo cargas axiales a compresión.

Se emplearon dos tipos de mortero, definiéndolo como una variable determinista dentro de la pila modelada, con el objetivo de analizar el impacto de su variabilidad en el comportamiento estructural de la mampostería.

Las propiedades del primer mortero utilizado, se tomó de la investigación de García-Cedeño [6], en la cual documentó el diseño y evaluación de mezclas de mortero comúnmente empleadas en la construcción local. Se optó por una mezcla de mortero tipo I, compuesta por una proporción cemento-arena de 1:6 y una resistencia media a la compresión ($f_{mc,cub}$) de 17.09 MPa. Este valor cumple con los requisitos establecidos en las Normas Técnicas Complementarias de Mampostería (NTC-Mampostería) [2].

Por otro lado, el segundo tipo de mortero se tomó del estudio realizado por Zahara [39]. Para fines de esta investigación, fue necesario realizar una conversión de la resistencia obtenida en cilindros a su equivalente en cubos de concreto de 2 pulgadas, con el objetivo de mantener una comparación consistente con el primer tipo de mortero utilizado. Para ello, se adoptó una relación de resistencia cubo/cilindro de 1.25 según lo reportado en la literatura [16]. Aplicando este factor de conversión a los valores experimentales obtenidos en los ensayos de compresión, se determinó que la resistencia media a compresión ($f_{mc,cub}$) del mortero fue de 7.50 MPa.

En la Tabla 18, se presentan los parámetros fundamentales extraídos de las investigaciones mencionadas [6, 39] para los morteros empleados.

En la

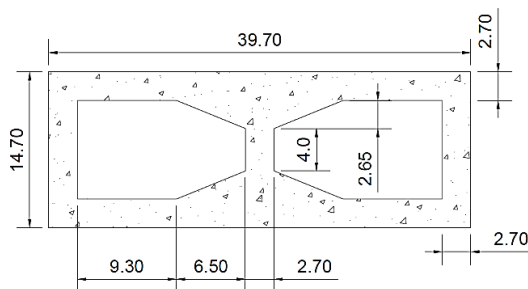
Tabla 19 se presenta una geometría definida del bloque, con dimensiones de 39.70 cm x 19.70 cm x 14.70 cm (largo x alto x espesor) y sus propiedades físicas. Uno de los parámetros fundamentales en la clasificación de los bloques es la relación entre el área neta y el área bruta, lo cual, en este caso, es del 56%.

Tabla 18. Propiedades mecánicas del mortero.

$f_{mc,cub}$ (MPa)	$f_{mt,bri}$ (MPa)	$E_{m,cub}$ (MPa)	ε_c (mm/mm)	ε_u (mm/mm)
17.09 (13%)	3.13 -	17225 -	0.0014 -	0.0037 -
7.50 (8.2%)	1.35 -	4902 -	0.0052 -	0.0028 -

El valor del coeficiente de variación (COV) se encuentra entre paréntesis

Tabla 19. Propiedades físicas del bloque hueco de concreto.



Área neta A_n (cm ²)	Área bruta A_b (cm ²)	$\frac{A_n}{A_b}$ (%)	Densidad (kg/m ³)
324.16	583.59	56	1150

Así mismo, se definieron las características mecánicas de los BHC, estableciendo tres niveles de resistencia y considerando este parámetro como una variable aleatoria dentro del modelo. Para la selección de estas resistencias, se buscó que la variación entre ellas no fuera mayor a 5 MPa, de manera que la simulación reflejara las diferencias que podrían presentarse en una selección real de muestras provenientes de un mismo lote de producción. Esto permite evaluar

las fluctuaciones en la resistencia a la compresión de los BHC sobre el comportamiento a compresión de la mampostería.

La resistencia media de los resultados experimentales ($\bar{f}_b$) obtenida para los BHC fueron tomadas de diferentes investigaciones [6, 39, 41]. Las propiedades mecánicas de los BHC seleccionados para la presente investigación se muestran en la Tabla 20 [7], incluyendo la resistencia a tensión (f_{tb}), el módulo de elasticidad ($E_{b,net}$), la deformación unitaria a compresión (aplastamiento) ($\tilde{\epsilon}_c^{ch}_{bu}$) y la deformación unitaria a tensión (agrietamiento) ($\tilde{\epsilon}_t^{cr}_{bc_r}$).

Los valores obtenidos de la resistencia de diseño cumplen con el requisito de la Norma Mexicana [2] (> 6 MPa). Las resistencias calculadas en la presente investigación y con el objetivo de facilitar la comparación con otras normativas internacionales [5, 13-15], tanto la resistencia experimental como la de diseño de expresarán en función del área neta y/o áreas laterales del bloque.

Tabla 20. Propiedades mecánicas del bloque hueco de concreto.

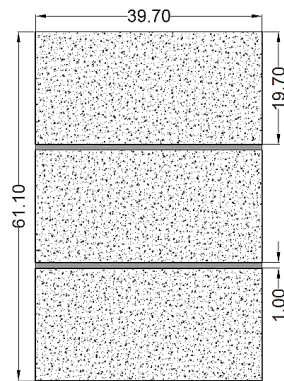
$\bar{f}_{b,net}$ (MPa)	$f'_{b,net}$ (MPa)	f_{tb} (MPa)	$E_{b,net}$ (MPa)	$\tilde{\epsilon}_c^{ch}_{bu}$ (mm/mm)	$\tilde{\epsilon}_t^{cr}_{bc_r}$ (mm/mm)
15.40 (2.96%)	14.34 --	1.155 --	7143 --	0.38% --	0.016% --
18.10 (5.90%)	15.77 --	1.3575 --	9478 --	0.24% --	0.016% --
19.80 (4.50%)	17.80 --	1.485 --	9519 --	0.18% --	0.016% --

El valor del coeficiente de variación (COV) se encuentra entre paréntesis

Para el cabeceo se empleó una mezcla de azufre y ceniza volante en una proporción 1:2 (azufre: ceniza volante) con una resistencia a la compresión de 45.64 MPa tomando como referencia las investigaciones [6, 16]. En dichos estudios, se describe el diseño de mezcla y el procedimiento de selección de la proporción óptima, cumpliendo con los requisitos establecidos en la norma NMX-C-036 [42]

Posteriormente a la definición de cada uno de los materiales por separado, se procedió a determinar las dimensiones de la pila de mampostería que se modeló numéricamente. En este sentido se realizó el micro – modelo numérico de una pila de mampostería de tres BHC de 39.70 cm x 61.10 cm x 14.70 cm (largo x alto x ancho) y una junta de mortero de 1 cm de espesor, como se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Propiedades físicas del prisma.



Largo (cm)	Alto (cm)	Espesor (cm)	Relación de aspecto (Alto/Largo)	Relación de esbeltez (Alto/Ancho)
39.70	61.10	14.70	1.54	4.16

3.2.2. Definición del diseño experimental

Una vez definida las características mecánicas de los materiales a utilizar en el modelo del prisma, se realizó un análisis paramétrico considerando las variables definidas.

El diseño de experimentos, así como, para realizar el análisis de sensibilidad se empleó el software Design Expert. Esto permitió establecer una metodología estructurada para la asignación de valores de resistencia dentro del modelo, garantizando que la variabilidad del material estuviera representada de manera realista en la simulación. En la Figura 18, se presentan los factores que se tuvieron en cuenta para el diseño experimental y los niveles en que fueron variados.

A partir de las variables definidas y las combinaciones generadas en el diseño experimental, se obtuvieron un total de 27 combinaciones posibles para cada variación de resistencia de mortero y su colocación. Esto llevó a un total de 108 simulaciones realizadas.

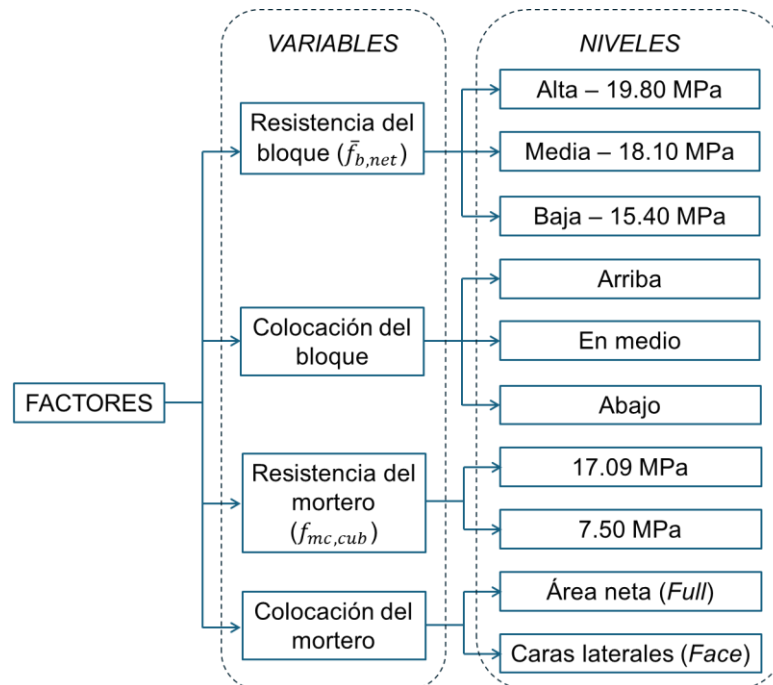


Figura 18 Resultado de las 108 simulaciones con las variaciones propuestas.

3.3. CONFECCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Para la confección del modelo numérico se tuvieron en cuenta las invariantes de la modelación mecánica de las estructuras. La geometría fue definida a partir espécimen que sugiere la norma mexicana para la caracterización de la resistencia a compresión de la mampostería: una pila de 3 hiladas de bloque (ver Tabla 21). Las propiedades físico-mecánicas de los materiales empleadas se definieron en la sección 3.1. Para ello, se emplearon las curvas esfuerzo-deformación a compresión y a tensión de los materiales componentes (BHC, mortero y cabeceo). El modelo de daño plástico de concreto (Concrete damage plasticity) fue empleado.

Las condiciones de frontera, las interacciones y las cargas aplicadas se definieron en el proceso de calibración matemática y física que se describen a continuación.

3.3.1. Calibración del modelo numérico con los resultados experimentales

García-Cedeño [6] llevó a cabo como parte de su investigación ensayos experimentales para obtener las propiedades físico-mecánicas de pilas de 3 hiladas con el mortero colocado sobre el área neta y sobre las caras laterales. Posteriormente, desarrolló una micro-modelación numérica de las pilas, empleando el Método de Elementos Finitos (MEF), empleando el programa ABAQUS/CAE [29].

La modelación numérica detallada, se realizó efectuando una calibración matemática y física basado en los resultados experimentales promedio. En el proceso, de calibración se emplearon los parámetros siguientes: el ángulo de dilatación (ϕ), la viscosidad, el coeficiente de forma (k) y el coeficiente de fricción. Finalmente, se utilizó la formulación matemática de los elementos finitos C3D8 y C3D6, con un tamaño de malla de 10 mm. La etapa de validación comparó los patrones de falla obtenidos en la simulación numérica con los observados en los ensayos experimentales.

De igual manera, se definieron condiciones de frontera que permitieran replicar de manera precisa la falla experimental en el modelo numérico. En este sentido, la base del modelo fue restringida en todas las direcciones, mientras que en la parte superior se aplicó un desplazamiento en la dirección vertical. Estas condiciones garantizaron una mayor concordancia entre los resultados numéricos y experimentales.

3.3.2. Calibración de interacciones

Para que el modelo numérico represente correctamente la interfaz de contacto entre los BHC y el mortero, es necesario que este parámetro sea calibrado. Por

la naturaleza de los movimientos relativos esperados entre ambas partes, puede incluir deslizamiento, separación y penetración. Para definir la interacción entre ambos materiales se utilizaron superficies de contacto generadas a partir de las geometrías de los componentes “*Surface to Surface*”. Esta interacción fue la utilizada por [6], pero en la presente investigación se decidió cambiar a la interacción “*General contact*”, para agilizar la asignación de este parámetro en las simulaciones definidas en el diseño de experimento.

Se definió una propiedad de contacto con comportamiento normal y tangencial donde se especificó un coeficiente de fricción (μ) de 0.75 tomando el valor de la investigación [6], verificando que el valor se encuentra en el rango común utilizado en la mampostería de 0.6 a 0.8, según lo planteado por Mohammad [20]. Asimismo, se definió una presión “*Hard contact*” la cual se utiliza para referirse a una interacción sin ningún ablandamiento, ósea que no puede ocurrir ninguna penetración de las superficies en el modelo.

Para verificar que no existen discrepancias en la respuesta final de los modelos de las pilas por el cambio de interacción, se realizó un análisis comparativo de los resultados de las curvas esfuerzo-deformación y del tiempo de cómputo. La interacción denominada “*Surface to Surface*” consiste en usar un algoritmo “*Master-slave*”, en la cual el mortero se definió como tipo “*slave*”, es decir, no podrá penetrar en la superficie del BHC definido como “*master*”. Por su parte, la interacción “*General contact*” permite definir el contacto de manera global, sin necesidad de definir explícitamente superficies “*master*” y “*slave*”, detectando automáticamente las posibles interacciones de contacto dentro del dominio especificado y aplicando algoritmos avanzados para garantizar que las condiciones de contacto se cumplan de manera eficiente.

Los resultados de las curvas esfuerzo-deformación obtenidos para una pila de 3 hiladas con una resistencia a compresión homogénea en todos sus BHC ($f_{b,net}$) se presentan de la Figura 19 a la Figura 22. Las resistencias de los bloques modelados fueron de 15.40 MPa, 18.1 MPa y 19.8 MPa, con dos tipos de mortero

con resistencia a la compresión ($f_{mc,cub}$) de 17.09 MPa y de 7.50 MPa y dos variantes de colocación del mortero (sobre el área neta y sobre las caras laterales).

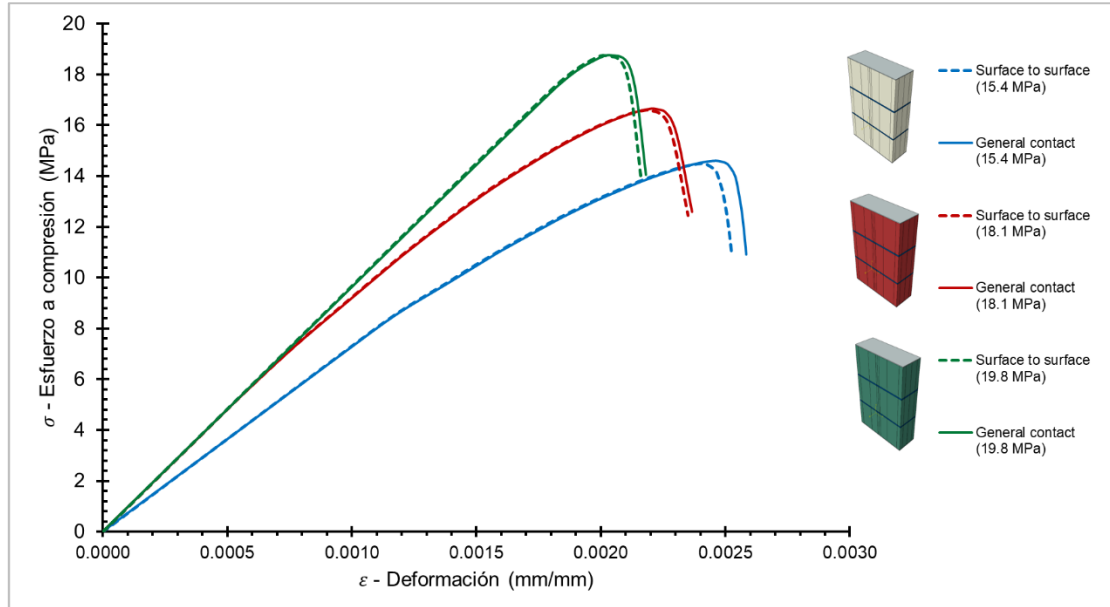


Figura 19. Comparación entre la curva esfuerzo – deformación. La resistencia de los BHC es de 15.4 MPa, 18.1 MPa y 19.8 MPa y la resistencia del mortero a compresión es de 17.09 MPa colocado en área neta.

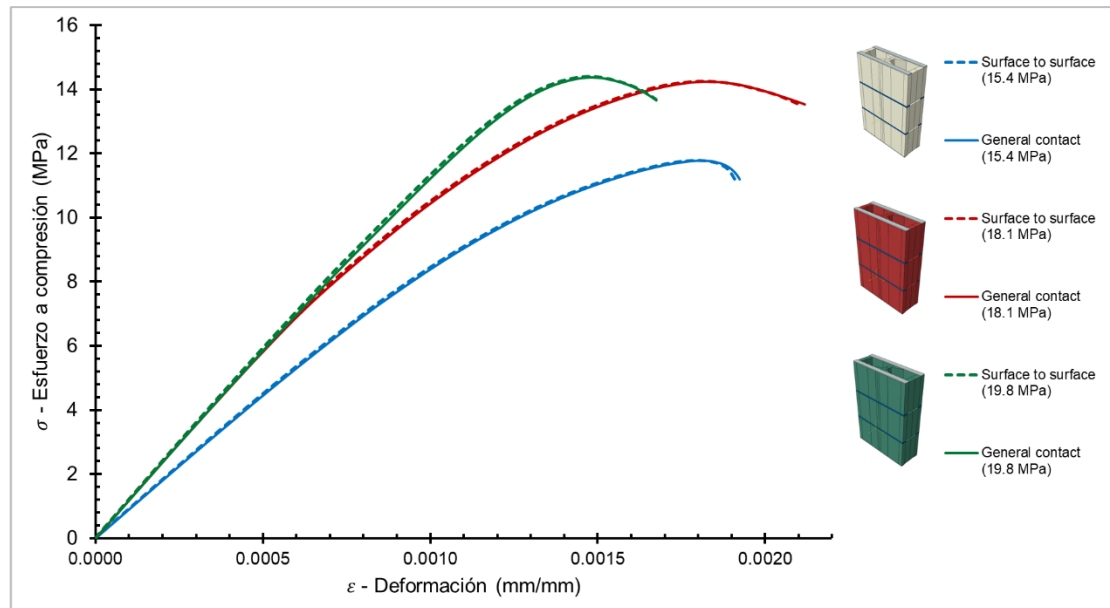


Figura 20. Comparación entre la curva esfuerzo – deformación. La resistencia de los BHC es de 15.4 MPa, 18.1 MPa y 19.8 MPa y la resistencia **del mortero a compresión es de 17.09 MPa** colocado en **caras laterales**.

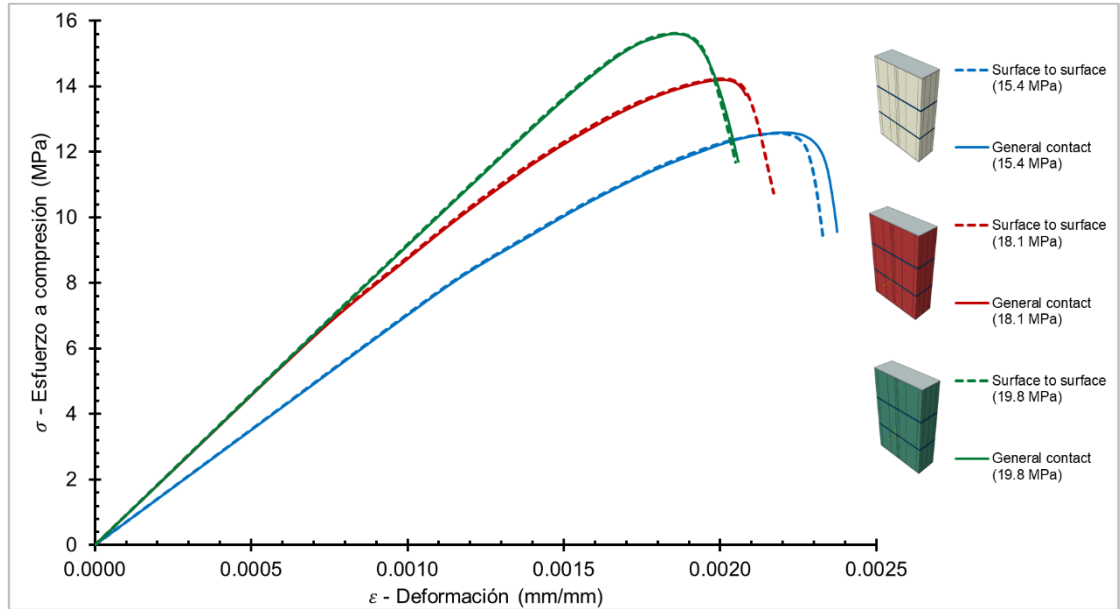


Figura 21. Comparación entre la curva esfuerzo – deformación. La resistencia de los BHC es de 15.4 MPa, 18.1 MPa y 19.8 MPa y la resistencia **del mortero a compresión es de 7.50 MPa** colocado en **área neta**.

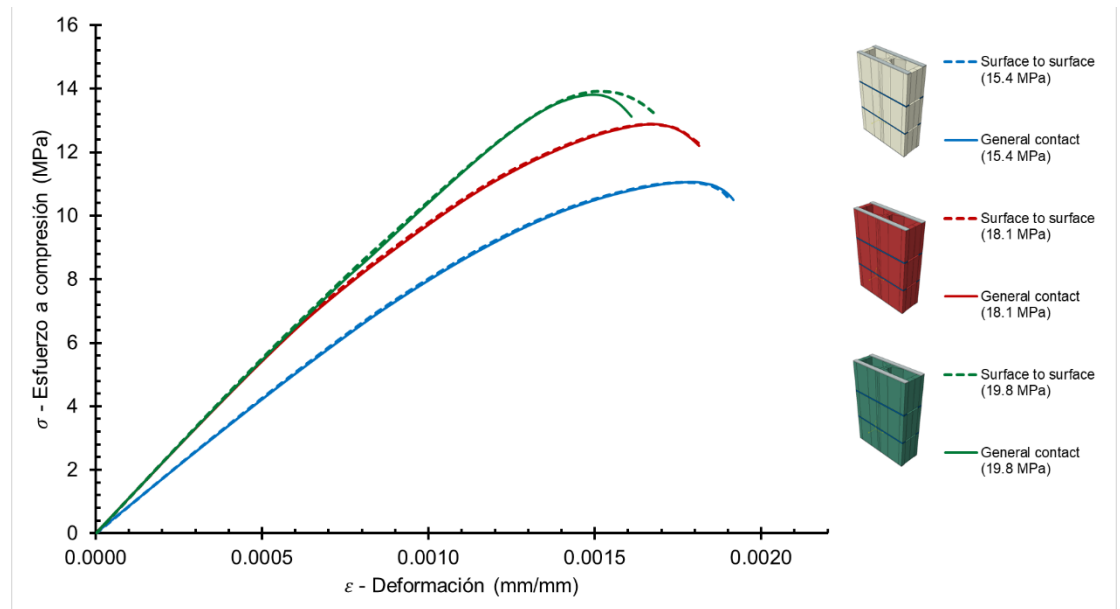


Figura 22. Comparación entre la curva esfuerzo – deformación. La resistencia de los BHC es de 15.4 MPa, 18.1 MPa y 19.8 MPa y la resistencia del mortero a compresión es de 7.50 MPa colocado en caras laterales.

En ambas configuraciones de la colocación del mortero, tanto en el área neta como en caras laterales, se logró ver el mismo patrón de resultados graficados. Se observa que en la zona elástica (comportamiento lineal) ambas curvas son equivalentes, lo que indica que el módulo de Young (E) tendrá resultados similares para ambas interacciones. Sin embargo, en la zona plástica (comportamiento no lineal) y en el punto del esfuerzo máximo (σ_{max}) los resultados comienzan a separarse ligeramente conforme se acercan a la falla, aunque en algunos modelos numéricos los resultados no muestran diferencia significativa. En general, la interacción definida con “*General contact*” muestra valores muy cercanos a los obtenidos con la interacción “*Surface to surface*”.

Se empleo la ecuación de error relativo [43] para determinar la diferencia entre ambas la interacciones. El error relativo (E_r) fue calculado para cada configuración de mortero, resistencia a la compresión de los BHC (f_{cb}) y resistencia a la compresión del mortero (f_{cm}) evaluadas (ver ecuación 40)

$$E_r = \frac{|Q_{e(i)} - Q_{n(i)}|}{Q_{n(i)}} \quad 40$$

En esta expresión, E_r representa el error relativo, mientras que $Q_{e(i)}$ hace referencia al valor patrón, el cual corresponde a los resultados obtenidos mediante la interacción “*Surface to Surface*”. Por otro lado, $Q_{n(i)}$ representa los valores estimados en esta investigación calculados utilizando la interacción “*General contact*”.

Al observar los datos presentados en la Tabla 22, el porcentaje de error en los resultados de la resistencia a la compresión (f_p) muestran una mínima variabilidad, con errores menores al 1%. Así mismo, en los resultados correspondientes al módulo de Young (E_p), se percibe una tendencia de un bajo

error relativo, con valores que fluctúan entre 0.39 y 1.61%. Es importante destacar que, dentro del análisis de los errores obtenidos, la muestra de mampostería construida con mortero de 17.09 MPa y colocado en área neta fue la que presento mayor discrepancia en su resultado general.

Tabla 22. *Análisis de propiedades de interacción en el modelo numérico.*

$f_{mc,cub}$	$\bar{f}_{b,net}$	Colocación del mortero	f_p (MPa)			E_p (MPa)		
			Surface to Surface	General contact	E_r (%)	Surface to Surface	General contact	E_r (%)
17.09	15.40	Área neta	14.49	14.61	0.80	7310	7277	0.44
	18.10		16.59	16.65	0.33	9494	9456	0.39
	19.80		18.75	18.77	0.09	9682	9625	0.58
	15.40	Caras laterales	11.79	11.78	0.07	8994	8883	1.23
	18.10		14.25	14.24	0.04	11761	11635	1.08
	19.80		14.39	14.37	0.13	11904	11713	1.61
7.50	15.40	Área neta	12.56	12.58	0.11	7045	7013	0.46
	18.10		14.22	14.21	0.11	9168	9122	0.50
	19.80		15.62	15.60	0.11	9205	9159	0.49
	15.40	Caras laterales	11.05	11.06	0.12	8512	8407	1.23
	18.10		12.89	12.87	0.11	10985	10854	1.19
	19.80		13.92	13.81	0.79	11017	10903	1.04

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis del tiempo de cómputo de las simulaciones. Como se observa en la Figura 23, el tiempo de ejecución es generalmente menor en la mayoría de las simulaciones cuando se utiliza la interacción “General contact”. Por otro lado, aunque algunos modelos con la interacción “Surface to Surface” mostraron tiempos de ejecución más cortos, variando entre 74 y 5 minutos, esto no representó una ventaja considerable frente a la interacción “General contact”.

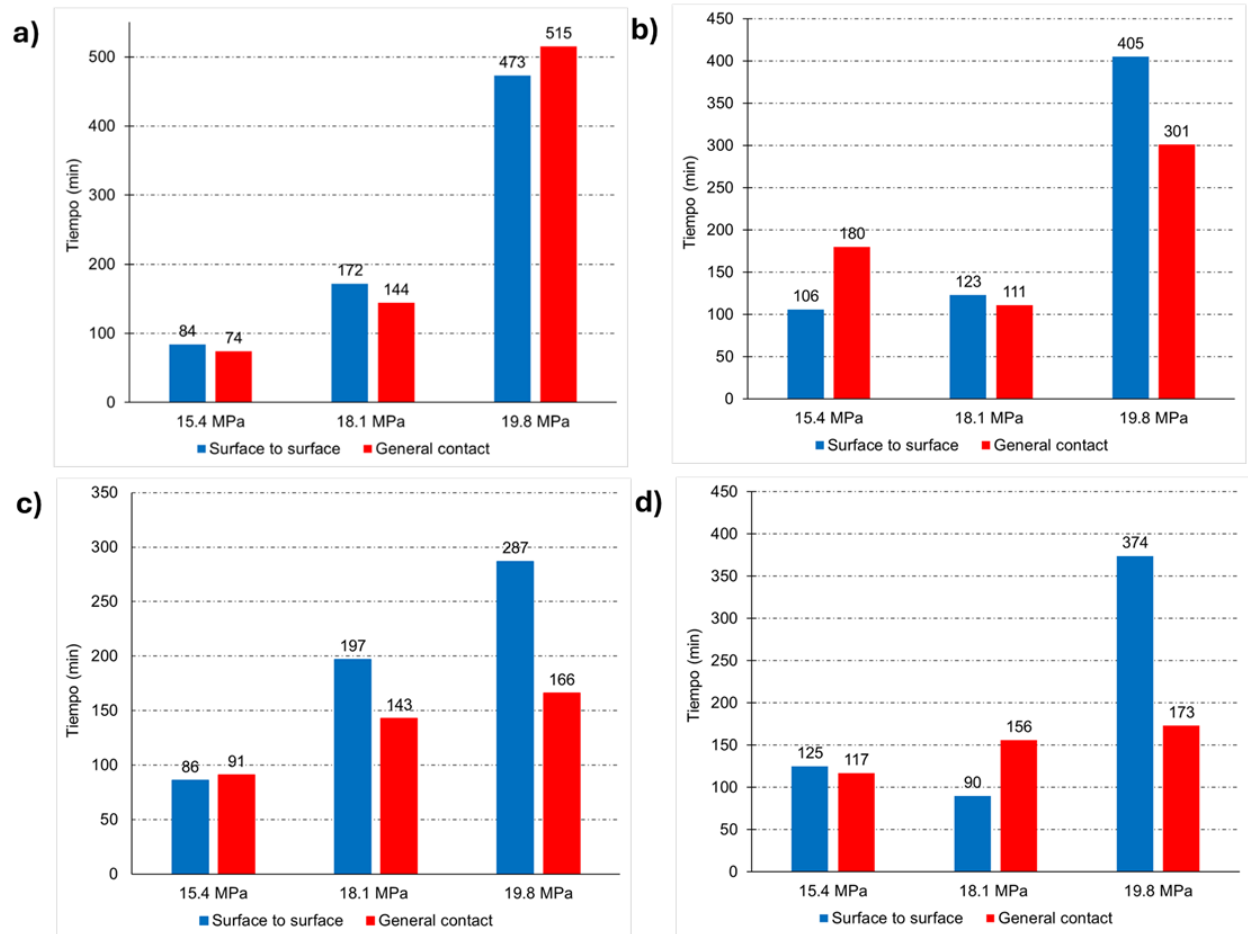


Figura 23. Análisis del tiempo de ejecución del modelo en función del tipo de interacción. **a)** mortero de 17.09 MPa colocado en área neta, **b)** mortero de 17.09 MPa colocado en caras laterales, **c)** mortero de 7.50 MPa colocado en área neta y **d)** mortero de 7.50 MPa en caras laterales.

3.4. METODOLOGÍA SEGUIDA PARA LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS

En este apartado se desarrolla los pasos que se siguieron para confeccionar el modelo, con el objetivo de describir y justificar todos los datos que se introdujeron al programa para ejecutar una modelación numérica representativa de las experimentaciones obtenidas de investigaciones anteriores [6].

3.4.1. Elección del software

Para la realización de las simulaciones numéricas, se empleó el software ABAQUS/CAE [29]. Las principales ventajas de la utilización de este software radican en diversas áreas que optimizan el análisis y la simulación de los modelos estudiados en esta investigación.

1. Simulación avanzada. Ejecuta análisis estáticos y simulaciones no lineales que incluyen grandes deformaciones y contactos complejos entre los materiales.
2. Precisión. Los algoritmos avanzados y ecuaciones integradas en el software garantizan soluciones estables. La implementación de modelos implícitos, ajustados a condiciones experimentales, refuerza la confiabilidad de los resultados obtenidos.
3. Representación de materiales. Permite incorporar las propiedades de los materiales obtenidas en los resultados experimentales, con el objetivo de calibrar y validar el modelo numérico.
4. Interacción entre las partes. Permite la selección de interacciones entre las piezas, facilitando la representación visual de los modelos y mejorando la eficiencia en la configuración y ejecución de las simulaciones.

3.4.2. Confección de las partes

Para la confección de las partes que integran la pila de mampostería se utilizó el módulo “*Part*” del software [29], donde se definió un modelo 3D sólido, y se crearon cada una de las piezas de forma independiente. Se le asignaron las propiedades geométricas definidas en el apartado 3.1.1 (

Tabla 19 y Tabla 21).

3.3.3 Definición de los materiales

Una vez creadas las partes, se procede a la asignación de las propiedades en el módulo “*Property*” del software [29], para ello se definieron las características de los materiales utilizados en cada una de las piezas del modelo, las cuales se

describen en el apartado 3.1.1 (Tabla 18 y Tabla 20). La definición de los parámetros de Concrete Damaged Plasticity (CDP) se describen en la Tabla 23, los cuales fueron obtenidos de investigaciones anteriores [6], en donde se realizó una calibración que se expone en el apartado 3.2.1.

Tabla 23. “Concrete Damaged Plasticity”

Angulo de dilatación (φ)	Excentricidad	f_{b0}/f_{c0}	Coeficiente de forma (K)	Parámetro de viscosidad
15	0.10	1.16	0.66	0.0005

3.3.4 Mallado

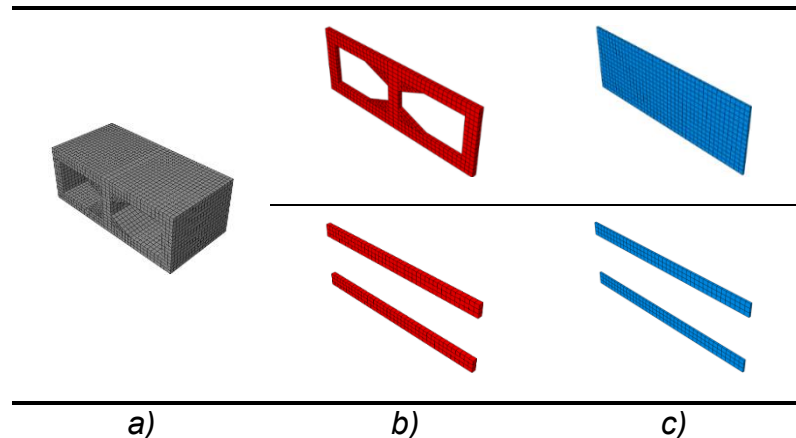
Se optó por un mallado de 10 mm para garantizar un análisis preciso y optimizar los recursos computacionales [6, 8]. Asimismo, se seleccionó la formulación matemática del elemento finito (MEF) en función de la geometría del modelo, eligiendo dos tipos de elemento finito con el objetivo de obtener un correcto ajuste en áreas irregulares de las piezas [6] (ver Tabla 24).

Tabla 24. Tipo de elemento finito.

C3D8	Continuum de 3 Dimensiones de 8 nodos
C3D6	Continuum de 3 Dimensiones de 6 nodos

En la Figura 24, se muestra gráficamente las partes que fueron creadas para modelar la pila de mampostería.

Figura 24. Partes del modelo con el tipo de mallado (a) BHC, (b) mortero full / face y (c) cabeceo superior full / face.



3.3.5 Ensamblaje

Una vez completado el modelo, se estableció una interacción en el módulo “*Interaction*” [29] ajustando la condición de contacto “*General contact*”, se describe la calibración de esta interacción en el apartado 3.2.2.

En la Figura 25 se muestra el modelo final con las piezas integradas, donde se pueden observar las variaciones en la colocación del mortero.

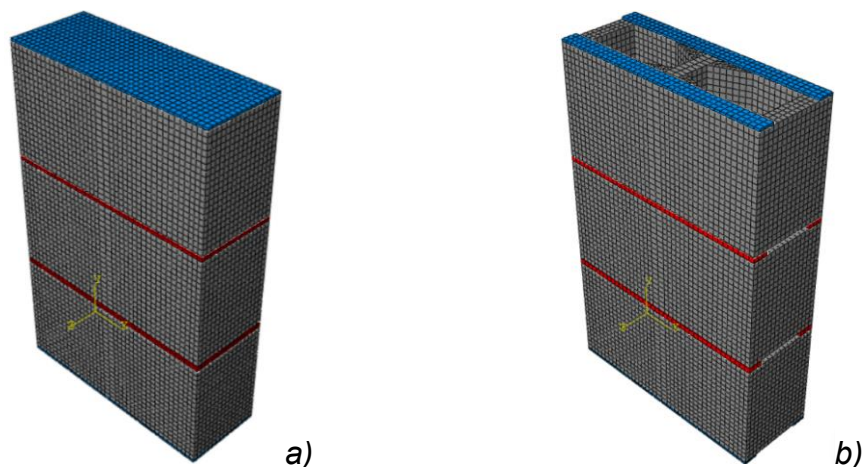


Figura 25. Conectividad y ensamblaje (a) mortero en full y (b) mortero en face.

3.3.6 Condiciones de frontera y desplazamiento impuesto

Las condiciones de frontera fueron basadas en investigaciones anteriores [6] en donde se realiza una calibración con los resultados obtenidos en la experimentación. Por lo cual, se define sin restricciones la parte superior y con restricciones en las tres direcciones (x, y, z) la parte inferior del modelo, con el objetivo de representar los patrones de falla experimentales.

Por otra parte, se define el desplazamiento impuesto “*displacement/rotation*” como una carga para llevar al modelo a una falla coherente con los resultados experimentales. La carga se genera en dirección perpendicular (en el eje y) con un valor de -2.50 y una distribución uniforme en la cara superior del modelo.

Por último, se considera una carga por gravedad “*gravity*” en el modelo en general para representar el peso propio de la estructura de mampostería. La carga se genera en el eje y , con un valor de -1 y distribuida uniformemente en todo el modelo.

Estas consideraciones se ajustan para formar pasos que van a ser ejecutados en la simulación de la pila. En la Figura 26 se representan gráficamente las condiciones aplicadas en la pila con ambas configuraciones de mortero.

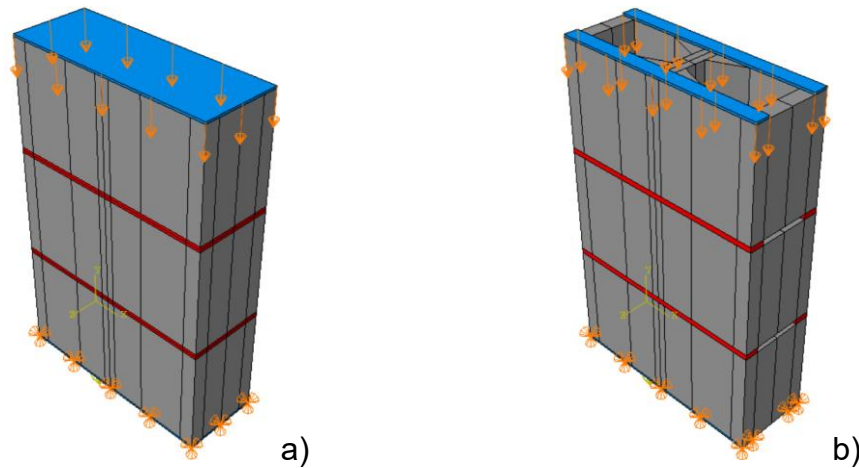


Figura 26. Condiciones de frontera y desplazamientos impuestos (a) mortero full y (b) mortero face

3.5. COMENTARIOS FINALES DEL CAPÍTULO

A continuación, se mencionan aspectos importantes que se abordaron en el presente capítulo.

1. La metodología implementada fue basada en la micro – modelación tridimensional mediante el método de elemento finito (MEF), utilizando el softwares ABAQUS/CAE [29], con el propósito de analizar el comportamiento mecánico de pilas de mampostería bajo carga axial.
2. Los parámetros mecánicos y geométricos que se emplearon en la modelación numérica fueron adoptados de investigaciones previas [6, 8], en las cuales se realizaron calibraciones experimentales de pilas de mampostería constituidas por bloques huecos de concreto (BHC) y juntas de mortero colocadas tanto en área neta como en las caras laterales. Dichos estudios proporcionaron una base de datos experimental sólida para los parámetros utilizados en la investigación presente.
3. Con el propósito de desarrollar el análisis de variación paramétrica, se seleccionaron de la literatura [6, 19, 39, 41] tres niveles de resistencia a la compresión para los BHC (15.40, 18.10 y 19.80 MPa) y dos niveles de resistencia para el mortero (17.09 y 7.50 MPa). Esta selección permitió representar de manera realista la variabilidad de los materiales.
4. La definición del análisis experimental se realizó con el software *Design Expert*, permitiendo establecer una variabilidad del material realista en la simulación. Como resultado se obtuvieron 27 combinaciones posibles para cada variación, por lo cual se llevaron a cabo 108 simulaciones numéricas.
5. Las interacciones de contacto definidas como “*Surface to Surface*” y “*General contact*” se compararon con el objetivo de seleccionar la configuración más adecuada para el presente estudio. Ambas interacciones mostraron una alta concordancia en los resultados, con errores relativos inferiores al 1% en el esfuerzo máximo. Sin embargo, se

seleccionó la interacción “*General contact*” por ofrecer una mayor eficiencia computacional, evidenciada en una reducción del tiempo de simulación de hasta 74 minutos, sin comprometer la precisión de los resultados numéricos.

6. En la micro – modelación numérica, los parámetros mecánicos y geométricos empleados fueron: ángulo de dilatación 15° , excentricidad 0.10, coeficiente de forma 0.66 y parámetro de viscosidad 0.0005. Se utilizó un mallado de 10 mm y un tipo de elemento finito de C3D8 y C3D6. En las condiciones de frontera, en la parte superior se aplicaron los desplazamientos gravitacionales y en la parte inferior se aplicó una restricción en todas las direcciones.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la metodología descrita previamente. El propósito principal es interpretar estos resultados, así como compararlos con estudios previos y/o normativas nacionales e internacionales.

Se analizaron los datos obtenidos a través de las simulaciones numéricas, evaluando su coherencia, consistencia y relevancia en relación con la hipótesis inicial.

La discusión que se presenta busca no solo explicar los comportamientos observados, sino también, establecer relaciones con los principios teóricos que sustentan el estudio, aportando una visión crítica y reflexiva sobre los resultados.

4.2. ANÁLISIS DE LAS CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN

Las curvas esfuerzo – deformación generadas a partir de las simulaciones numéricas permiten evaluar el comportamiento general del sistema bajo cargas axiales a compresión, proporcionando información clave para el esfuerzo máximo y el módulo de elasticidad.

De los resultados obtenidos, es importante destacar que el esfuerzo máximo registrado en cada curva corresponde al valor pico alcanzado antes del inicio de la falla estructural. Este valor representa la resistencia última de la mampostería, es decir la capacidad máxima del sistema para resistir la carga axial antes de que se generen mecanismos de inestabilidad en la estructura.

En las Figura 27 y Figura 28 se pueden observar los resultados de las pilas con la colocación del mortero sobre el área neta (*full*) y sobre las caras laterales

(face). Se grafican las distintas combinaciones evaluadas, considerando las propiedades mecánicas tanto de los BHC como del mortero. Entre estas curvas, se destacan aquellas correspondientes a las pilas con BHC de resistencia homogénea, con el objetivo de establecer una comparación clara frente a las configuraciones con resistencia heterogénea en sus bloques.

Para realizar un correcto análisis de la variación presente en los resultados, se calculó el error relativo (E_r). Para ello se aplicó la ecuación 40, en donde $Q_{e(i)}$ el valor patrón es el resultado del esfuerzo máximo y módulo de elasticidad de la mampostería con los BHC con resistencia homogénea. Por otro lado, $Q_{n(i)}$ hace referencia a los resultado obtenidos en las pilas con los BHC con resistencia heterogénea.

La Figura 27 (a) muestra los resultados correspondientes al mortero con resistencia de 7.50 MPa (*Mortero 1*), aplicado sobre su área neta, donde el esfuerzo máximo presenta una variación de hasta un 17.79 % entre las distintas combinaciones analizadas. Por otro lado, en la Figura 27 (b) presenta los resultados obtenidos con el mortero de resistencia de 17.09 MPa (*Mortero 2*), en los cuales se observa una variación de hasta un 22.24 %. En cuanto al módulo de elasticidad, se registraron variaciones del 18.52 % y 18.56 % para el *Mortero 1* y el *Mortero 2* respectivamente.

Los resultados indican una mayor variación en la resistencia de la mampostería cuando se emplea un mortero de mayor resistencia. Cabe destacar que el esfuerzo máximo está directamente influenciado por las propiedades del mortero, observándose diferencias en un rango de 2.10 a 3.24 MPa entre las distintas configuraciones del mortero analizadas. Este comportamiento refleja que, a medida que aumenta la resistencia de los BHC, también se incrementa la variabilidad en la resistencia global de la mampostería.

Asimismo, en la Figura 28 (c) se presentan los resultados obtenidos con el *Mortero 1*, donde el esfuerzo máximo mostró una variación del 21.09 % entre las

diferentes configuraciones. En tanto, en la Figura 28 (d), correspondiente al *Mortero 2*, dicha variación fue del 19.41 %. En lo que respecta al módulo de elasticidad, se registraron variaciones del 18.18 % y 19.93 % para el *Mortero 1* y *Mortero 2*, respectivamente, lo que indica un comportamiento relativamente constante entre ambas configuraciones de aplicación del mortero (*full* y *face*).

Es importante resaltar que, en la modalidad de colocación del mortero en caras laterales (*face*), el esfuerzo máximo no se ve significativamente afectado por la resistencia del mortero, ya que las diferencias observadas entre ambas configuraciones fueron menores a 1 MPa. Este comportamiento sugiere que, cuando el mortero se aplica únicamente en las caras laterales, la resistencia de la mampostería depende en mayor medida de los BHC, mientras que la influencia del mortero se reduce considerablemente.

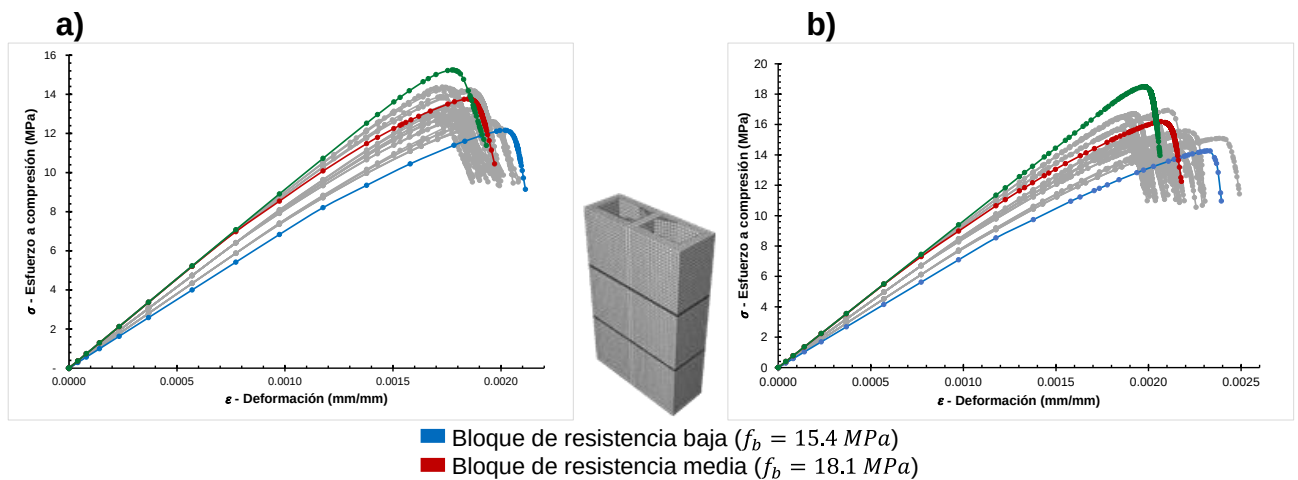


Figura 27. Curva Esfuerzo – Deformación obtenida en la mampostería con la colocación del mortero en área neta (*full*)

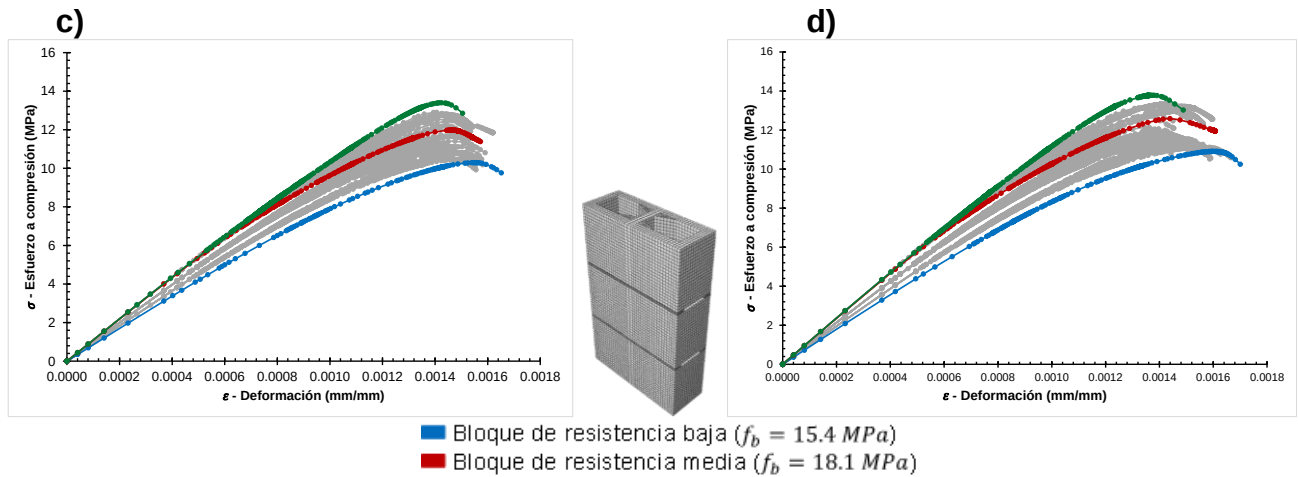


Figura 28. Curva Esfuerzo – Deformación obtenida en la mampostería con la colocación del mortero en caras laterales (*face*).

Las variaciones más significativas en los resultados de esfuerzo máximo y módulo de elasticidad se observaron en los especímenes que incorporan uno o dos BHC de baja resistencia (15.40 MPa) en combinación con BHC de alta resistencia (19.80 MPa). Esta configuración de resistencia heterogénea generó una mayor dispersión en la respuesta estructural del sistema. Cabe destacar que esta tendencia se manifestó de forma consistente en ambas configuraciones de colocación del mortero, tanto en área neta (*full*) como en caras laterales (*face*). Estos resultados indican que la diferencia entre las propiedades mecánicas de los BHC tiene un impacto relevante en la capacidad resistente y rigidez global de la mampostería, independientemente de la forma en que aplique el mortero.

4.3. ANÁLISIS DE LAS FALLAS

Como parte del análisis numérico, se obtuvieron los resultados de Deformación Plástica Equivalente tanto en compresión ($\tilde{\epsilon}_c^{pl}$), como en tensión ($\tilde{\epsilon}_t^{pl}$), por sus siglas en ingles *PEEQ* y *PEEQT* respectivamente. Estos resultados corresponden a un parámetro que cuantifica el grado de deformación plástica irreversible que experimenta el material bajo carga.

En los últimos años, diversas investigaciones [16, 26, 39, 40] han empleado la modelación numérica para determinar la Deformación Plástica Equivalente, la cual permite identificar el estado de falla por aplastamiento, la cual está relacionada con la compresión y la falla por agrietamiento, relacionada directamente con la tensión del material. Estos valores son fundamentales para identificar el límite de deformación a partir del cual un material se considera en estado de falla plástica. En el contexto de esta investigación, dichos parámetros permiten definir los límites de deformación tanto para los BHC como para el mortero, facilitando la evaluación del comportamiento estructural de los especímenes de mampostería.

En las Tabla 18 y Tabla 20 se presentan los valores de deformación en la falla propuestos en la literatura [16, 26, 39, 40] y utilizados para cada uno de los materiales considerados en esta investigación. Cabe destacar que estas deformaciones varían en función de las propiedades mecánicas específicas de cada material, tales como su resistencia a compresión, módulo de elasticidad y ductilidad.

Las Figura 29 se presentan las configuraciones de la falla en un pila con y sin variación en la resistencia a compresión de sus BHC. Ambos especímenes tienen la colocación del mortero en área neta (*full*). Logrando comprobar que la variación de sus elementos afecta el modo de falla. El diseño de la mampostería se puede ver afectado al no comprobar contemplar la falla real que sufrirá la mampostería por la variación de las propiedades de los materiales de construcción.

En contraste en Figura 30 se presentan las configuraciones de la falla observadas en una pila de mampostería con variación en la resistencia de sus BHC. Se comprobó que la colocación del mortero: sobre el área neta (*full*) y sobre las caras laterales (*face*) afecta significativamente el modo de falla en la mampostería. Comprobando que es de gran importancia considerar la colocación del mortero desde el diseño de la mampostería para poder predecir su comportamiento de manera correcta y evitar malos trabajos.

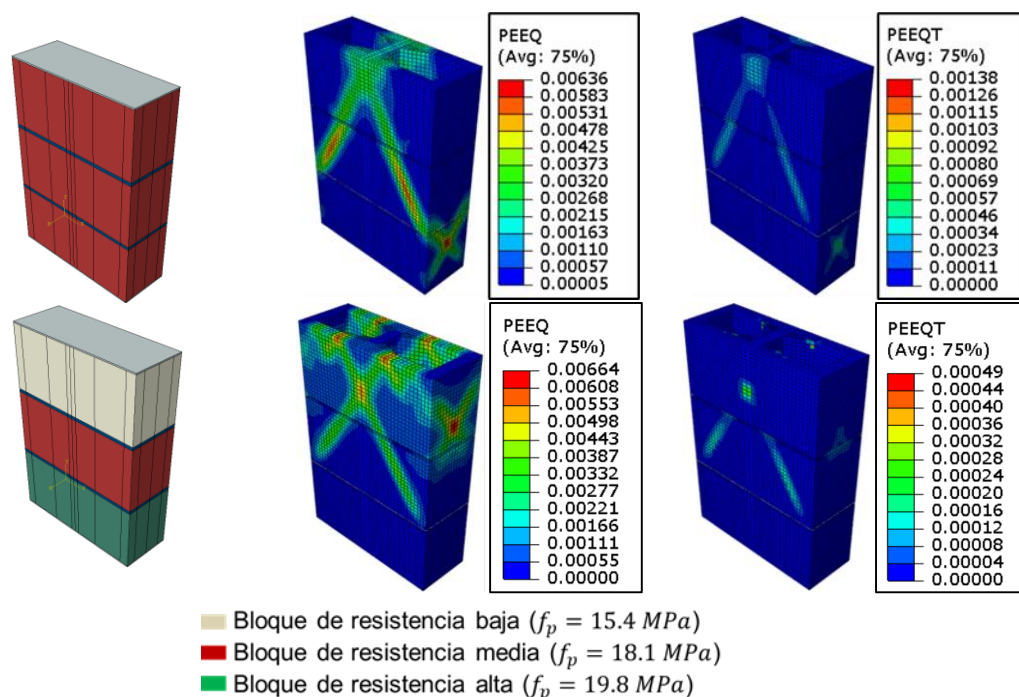


Figura 29. Configuración de falla en la mampostería con y sin variación en la resistencia de sus BHC y con la colocación del mortero en full (Mortero 2).

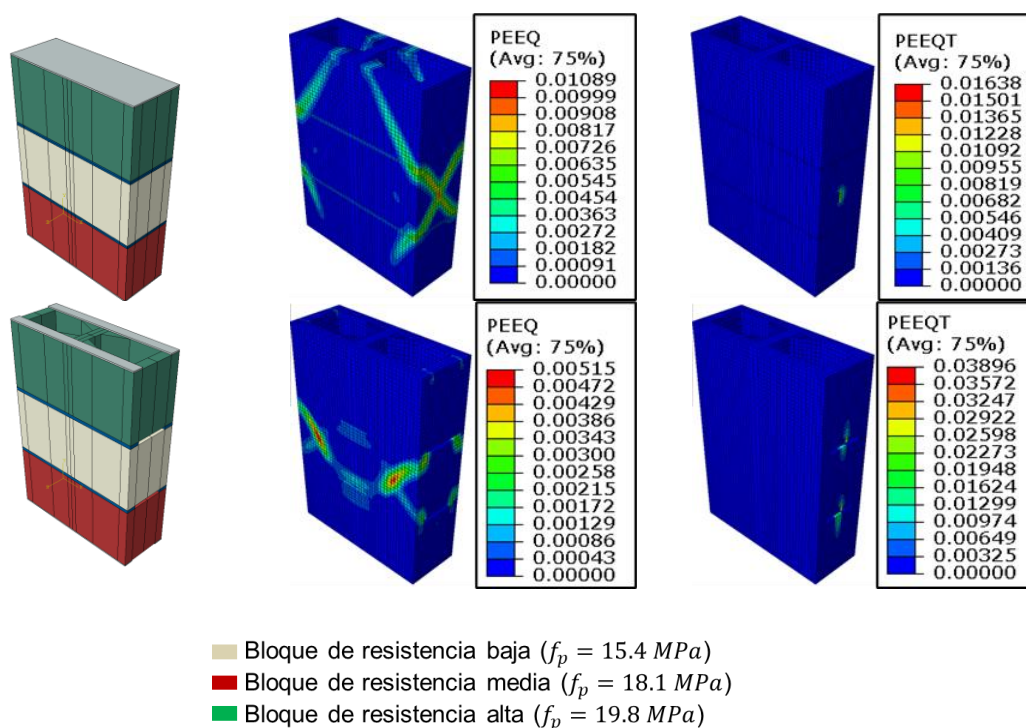


Figura 30. Configuración de falla con variación en la resistencia de los BHC en la mampostería y la colocación del mortero en full y face (Mortero 1).

4.4. INFLUENCIA DE LA POSICIÓN DE LOS BLOQUES EN LOS PRISMAS, ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL DESIGN EXPERT

La influencia de la posición del bloque se analizó mediante diagramas de caja de bigote (box-plot). Un diagrama de caja muestra el rango en el que se encuentra el 50 % central de los valores. La línea que divide la caja representa la mediana, mientras que los bordes inferior y superior corresponden al primer y tercer cuartil, respectivamente. La línea que se extienden desde la caja (llamadas “bigotes”) indican los valores mínimo y máximo, excluyendo los valores atípicos. Los bigotes más largos surgieron una mayor variabilidad de datos. Además, la simetría o asimetría de los datos puede deducirse de la posición de la caja con respecto a los bigotes. A continuación, se presenta la información de los gráficos de la resistencia, el módulo de elasticidad y la deformación al esfuerzo máximo para el mortero tipo 2, colocado en área neta y cuando el bloque se encuentra en la posición intermedia. Los resultados de la influencia de la posición del bloque cuando se encuentra en la parte superior e inferior, así como para el tipo de mortero 1 y colocado en áreas laterales se presentan en el Anexo II.

4.4.1. Análisis de resistencia

Para los bloques con una resistencia a compresión de 19.80 MPa, los diagramas de caja (ver Figura 31) muestran una mayor dispersión, lo que indica una mayor variabilidad en los valores del esfuerzo máximo. Esto sugiere que los bloques de mayor resistencia presentan una respuesta más variable, posiblemente debido a distribuciones no uniformes de esfuerzo o a una mayor sensibilidad frente a imperfecciones o condiciones de borde.

A medida que la resistencia del bloque disminuye, esta variabilidad se reduce. En los bloques de 18.10 MPa, los diagramas de caja son más pequeños, indicando una respuesta más consistente bajo carga. En los bloques de 15.40 MPa, las cajas son más reducidas, lo que refleja una baja variabilidad en los datos. Esto sugiere que los bloques más débiles tienen a fallar de una forma más uniforme, minimizando la influencia de otros factores estructurales. Esto puede deberse a

que los bloques más resistentes tienden a concentrar los esfuerzos, mientras que los más débiles permiten una redistribución más uniforme de las cargas.

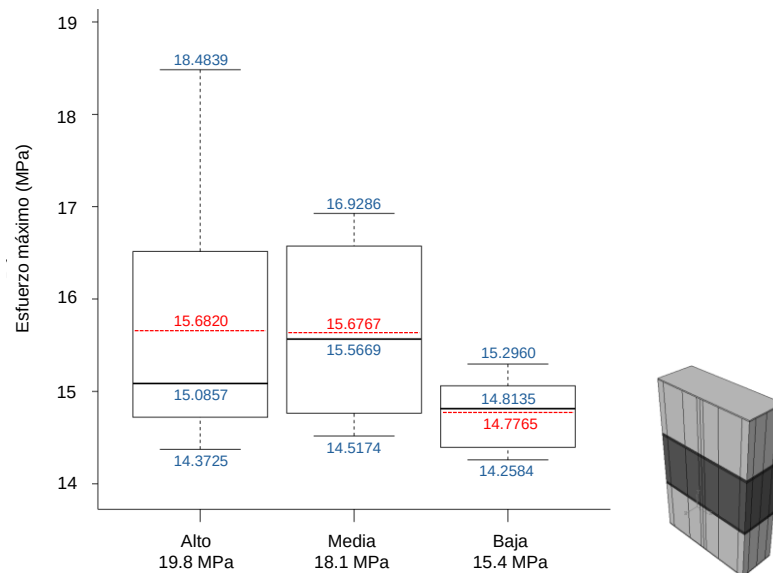


Figura 31. Gráficas Box – plot del esfuerzo máximo con Mortero 2, colocado en área neta y analizando la ubicación del bloque en la zona intermedia.

4.4.2. Análisis de Módulo de Elasticidad

En el análisis del módulo de elasticidad (Figura 32), los diagramas de caja representan una dispersión similar en todos los casos. Además, todas las distribuciones muestran una asimetría positiva, ya que la media (indicada en rojo) es mayor que la mediana. Esto sugiere que ni la posición del bloque ni su resistencia a compresión influyen significativamente en la rigidez de los prismas.

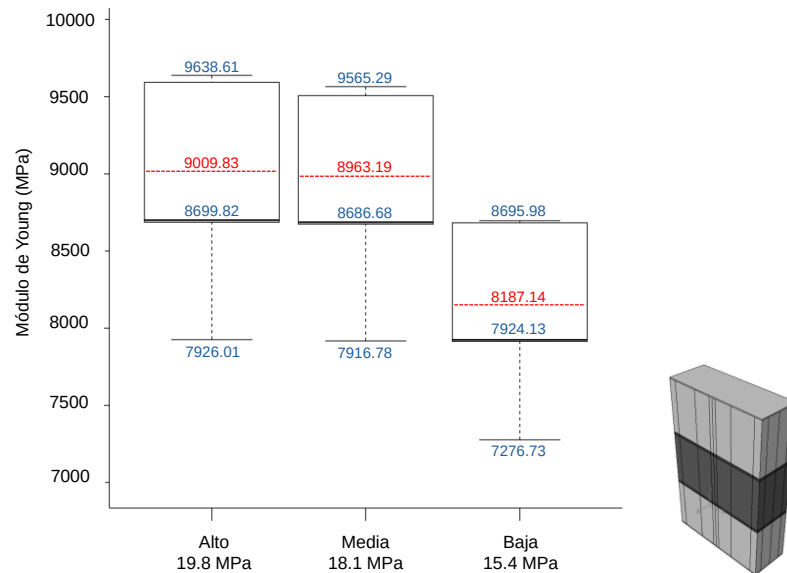


Figura 32. Gráficas Box – plot del módulo de elasticidad con Mortero 2, colocado en área neta y analizando la ubicación del bloque en la zona intermedia.

4.4.3. Análisis de deformaciones

La deformación se evaluó en el punto de esfuerzo máximo. Como se muestra en la Figura 33, existe una mayor variabilidad en la deformación en todas las variables analizadas. Por ejemplo, los bloques con una resistencia de 19.80 MPa presentan mayor dispersión cuando se ubican en la parte inferior que cuando están en la posición central. Esto sugiere que la deformación es más sensible a las variaciones en posición.

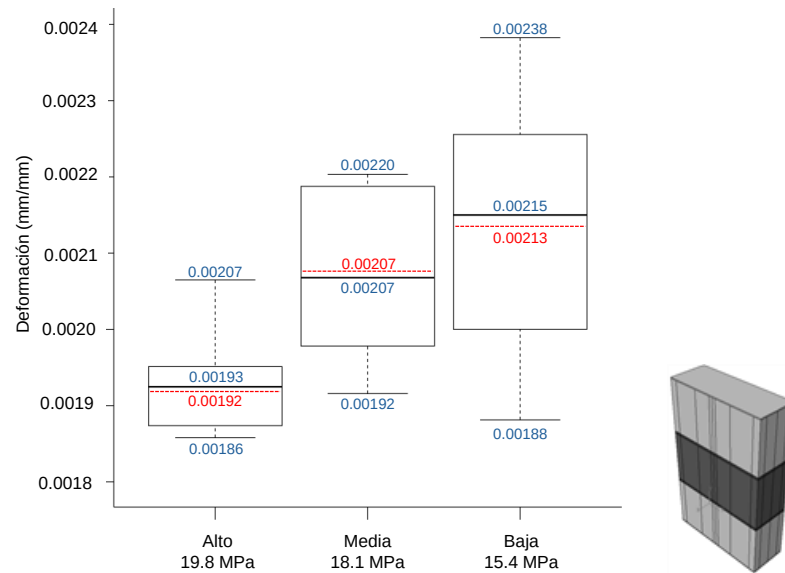


Figura 33. Gráfica Box – plot de la deformación al esfuerzo máximo con Mortero 2, colocado en área neta y analizando la ubicación del bloque en la zona intermedia.

4.5. DISCUSIÓN DE EXPRESIONES PROPUESTAS POR NORMATIVAS INTERNACIONALES

En esta sección, se examinaron las fórmulas matemáticas propuestas en las normativas internacionales mencionadas en el *Capítulo 2* para el cálculo de la resistencia en la mampostería, tanto a nivel de pieza individual como en conjunto y el módulo de Young.

Para facilitar la comprensión de los resultados y permitir una comparación adecuada, se calculó el error relativo (E_r) utilizando la ecuación 40, donde $Q_{e(i)}$ es el valor patrón, el cual se considera representativo del comportamiento real del sistema, $Q_{n(i)}$ hace referencia a los resultados obtenidos mediante los métodos establecidos en normas o formulaciones propuestas por otros autores y n_p es el total de los resultados evaluados. Además, se calculó el error medio absoluto (MAE) utilizando la ecuación 41 y el índice de error absoluto (IAE) con la ecuación 42.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{e(i)} - Q_{n(i)}}{Q_{e(i)}} \right|}{n_p} \quad 41$$

$$IAE = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{(Q_{e(i)} - Q_{n(i)})^2}{\sum_{i=1}^n Q_{e(i)}} \right]^{1/2}}{\sum_{i=1}^n Q_{e(i)}} \quad 42$$

Este análisis permite determinar el grado de concordancia entre los valores estimados y el valor de referencia, con el propósito de identificar cuál de las alternativas proporciona una mayor seguridad estructural y un mejor ajuste a la realidad física del modelo.

4.5.1. Método de Prueba del Prisma (PTM)

Para calcular la resistencia de diseño de la mampostería mediante el método del prisma (PTM), se utilizó la resistencia media a compresión obtenida en las simulaciones numéricas ($\bar{f}_{p,net}$ y $\bar{f}_{p,l}$), considerando la variación paramétrica de los BHC y la aplicación de los dos valores de resistencias del mortero ($f_{mc,cub}$).

En la Tabla 25 se presentan los resultados del cálculo de la resistencia de diseño de la mampostería considerando la colocación de mortero sobre el área neta (*full*), mientras que en la Tabla 26 se muestran los resultados correspondientes a la colocación de mortero sobre las caras laterales (*face*). Para ambos casos, los errores relativos se calcularon tomando como valores patrón aquellos obtenidos con la norma mexicana (NTC-M [2]), y como valores estimados los resultados derivados de las demás normativas consideradas en el análisis.

Es importante destacar que la normativa mexicana NTC-M [2] considera la resistencia a compresión tanto de la mampostería como de los BHC en el área bruta, sin embargo para fines de esta investigación y con el objetivo de comparar las ecuaciones propuestas por la literatura, se utilizó la resistencia a la compresión calculada sobre el área neta (*full*) y sobre las caras laterales (*face*) respectivamente.

Tabla 25. Comparación de la resistencia de diseño a compresión de la mampostería ($f'_{p,net}$) obtenida por PTM en área neta (full).

$\bar{f}_{b,net}$	$f_{mc,cub}$	$\bar{f}_{p,net}$	$f'_{p,net}$						
Bloque	Mortero	Prisma	NTC-M[2] PTM	EUROCODE[5] PTM	Er (%)	AS:3800[14] PTM	Er (%)	TMS[13] PTM	Er (%)
19.80	7.50	13.27	11.63	11.44	1.63	11.20	3.70	14.16	21.75
18.10									
15.40									
19.80	17.09	15.38	13.26	13.08	1.37	12.80	3.44	16.24	22.47
18.10									
15.40									
				MAE	1.50	MAE	3.57	MAE	22.11
				IAE	1.49	IAE	3.56	IAE	22.14

Tabla 26. Comparación de la resistencia de diseño a compresión de la mampostería ($f'_{p,l}$) obtenida por PTM en caras laterales (face).

$\bar{f}_{b,net}$	$\bar{f}_{mc,cub}$	$\bar{f}_{p,l}$	$f'_{p,l}$								
Bloque	Mortero	Prisma	NTC [2] PTM	EUROCODE[5] PTM E_r (%)		AS:3800[14] PTM E_r (%)		TMS[13] PTM E_r (%)		CSA[15] PTM E_r (%)	
19.80											
18.10	7.50	11.51	9.72	9.61	1.09	9.41	3.17	11.99	23.35	10.12	4.11
15.40											
19.80											
18.10	17.09	12.01	10.30	10.17	1.30	9.95	3.37	12.64	22.68	10.70	3.90
15.40											
				MAE	1.19	MAE	3.27	MAE	23.02	MAE	4.01
				IAE	1.20	IAE	3.28	IAE	23.01	IAE	4.00

Para facilitar la interpretación de los resultados, en la Figura 34 se observa gráficamente la comparación del error absoluto medio (MAE) de las normativas analizadas.

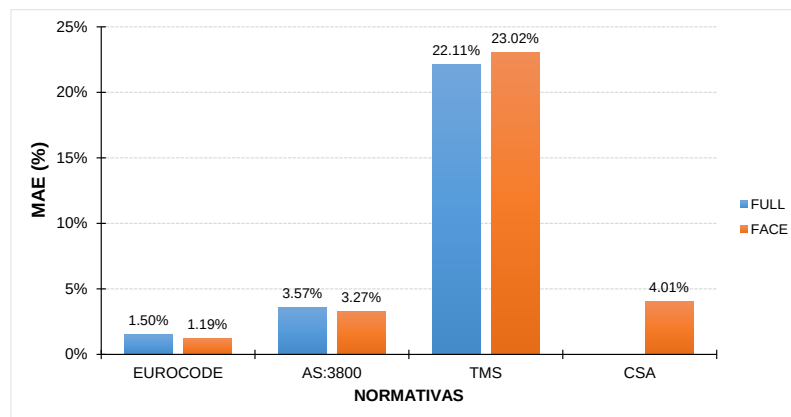


Figura 34. Error absoluto medio (MAE) obtenido por PTM, utilizando como referencia los resultados de la normativa mexicana NTC-M[2].

El Euro – código [5] presentó errores relativos bajos de 1.50% y 1.19% respectivamente, e índices de error absoluto igualmente bajos. Esto indica una alta concordancia entre esta normativa y la NTC-M [2] en la estimación de la resistencia de diseño a compresión de la mampostería.

Por otro lado, la norma AS:3800 [14] y CSA [15] presentan errores relativos muy similares. La normativa australiana presentó errores del 3.57% y 3.27% respectivamente y cabe mencionar que la normativa canadiense únicamente se aplicó para la configuración del mortero sobre las caras laterales (*face*) debido a las especificaciones que establece dicha norma, donde se obtuvo un error relativo promedio de 4.01%.

En contraste, la norma TMS [13] muestra una mayor discrepancia, con errores relativos promedio, superiores al 22% para ambas configuraciones del mortero, lo cual sugiere una sobreestimación sistemática de la resistencia de diseño bajo sus criterios. Esto podría atribuirse a diferencias en los factores de diseño, criterios de evaluación del mortero o metodologías de calibración de la norma.

Los resultados para ambas configuraciones del mortero son muy similares y variaron en menos del 1% de error en los resultados de todas las normativas analizadas, lo cual indica una alta consistencia.

4.5.2. Método Resistencia de la Unidad (USM)

A partir de la resistencia media del BHC ($\bar{f}_{b,net}$), se calculó la resistencia media de la mampostería ($\bar{f}_{p,net}$ y $\bar{f}_{p,l}$) mediante el método de la unidad (USM), considerando dos valores distintos de resistencia del mortero ($f_{mc,cub}$).

En la Tabla 27 y la Tabla 28 se presentan los valores estimados de resistencia media de la mampostería para los casos con la colocación del mortero sobre el área neta (*full*) y en caras laterales (*face*), respectivamente. En este análisis, se tomó como valor patrón la resistencia media a la compresión considerada como

referencia, mientras que los valores estimados corresponden a los obtenidos mediante las formulaciones propuestas por las normativas evaluadas.

Tabla 27. Comparación de la resistencia de diseño a compresión de la mampostería ($\bar{f}_{p,net}$) obtenida por USM en área neta (full).

$\bar{f}_{b,net}$	$f_{mc,cub}$	$\bar{f}_{p,net}$	$f'_{p,net}$							
Bloque	Mortero	Prisma	NTC-M[2]		EUROCODE[5]		AS:3800[14]		TMS[13]	
			USM	Er(%)	USM	Er(%)	USM	Er(%)	USM	Er(%)
19.80			8.76	33.97	10.34	22.12	8.10	38.97	14.21	7.05
18.10	7.50	13.27	7.94	40.18	9.71	26.86	7.74	41.65	13.62	2.67
15.40			6.65	49.85	8.67	34.68	7.14	46.18	12.70	4.29
19.80			9.86	35.86	14.20	7.67	8.10	47.34	16.11	4.77
18.10	17.09	15.38	9.10	40.83	13.34	13.29	7.74	49.66	15.42	0.24
15.40			7.82	49.14	11.91	22.56	7.14	53.56	14.31	6.96
			MAE	41.64	MAE	21.20	MAE	46.23	MAE	4.33
			IAE	41.66	IAE	20.70	IAE	46.52	IAE	4.31

Tabla 28. Comparación de la resistencia de diseño a compresión de la mampostería ($\bar{f}_{p,l}$) obtenida por USM en área neta (face).

$\bar{f}_{b,net}$	$f_{mc,cub}$	$\bar{f}_{p,l}$	NTC-M[2]		EUROCODE[5]		$\bar{f}_{p,l}$		TMS[13]		CSA[15]	
Bloque	Mortero	Prisma	USM	Er(%)	USM	Er(%)	USM	Er(%)	USM	Er(%)	USM	Er(%)
19.80			8.76	23.87	10.34	10.21	9.26	19.59	14.21	23.42	9.17	20.31
18.10	7.50	11.51	7.94	31.03	9.71	15.67	8.85	23.12	13.62	18.37	8.73	24.13
15.40			6.65	42.18	8.67	24.69	8.16	29.08	12.70	10.35	8.03	30.20
19.80			9.86	17.87	14.20	18.24	9.26	22.94	16.11	34.17	12.14	1.05
18.10	17.09	12.01	9.10	24.23	13.34	11.04	8.85	26.32	15.42	28.37	11.27	6.14
15.40			7.82	34.86	11.91	0.84	8.16	32.04	14.31	19.51	9.90	17.56
			MAE	29.01	MAE	13.45	MAE	25.51	MAE	22.30	MAE	16.56
			IAE	28.94	IAE	13.37	IAE	25.55	IAE	22.41	IAE	16.39

Las normas NTC-M [2] y AS:3800 [14] mostraron errores similares para ambas configuraciones de mortero, con valores superiores a 41% y 25% respectivamente. Ambas normativas resultaron ser las más conservadoras en comparación con las demás evaluadas.

En contraste, las normativas Euro – código [5] y CSA [15] demostraron un mejor desempeño para su uso como referencia en el diseño estructural de la mampostería. En la configuración de área neta (full), la norma europea presentó un error inferior al 21%, y en la configuración de caras laterales (face), ambas normativas arrojaron errores menores al 17%. Es importante señalar que, en estos casos, los valores estimados fueron inferiores a los obtenidos mediante simulaciones, lo cual representa una ventaja desde el punto de vista de seguridad

estructural, ya que se evita sobrestimar la capacidad resistente de la mampostería.

En cuanto a la normativa TMS [44] aunque arrojó errores promedios más bajos, sus valores estimados superaron sistemáticamente a los de referencia. Esta sobreestimación representa una desventaja desde el punto de vista del diseño estructural, ya que podría derivar en una evaluación excesivamente optimista de la capacidad resistente de la mampostería.

Para complementar el análisis, se presenta una comparación grafica de los errores obtenidos en función de la configuración del mortero (ver Figura 35). Asimismo, se incluyen gráficos de dispersión que permiten observar el comportamiento de los errores en relación con la resistencia de los BHC analizados (ver Figura 36 y Figura 37).

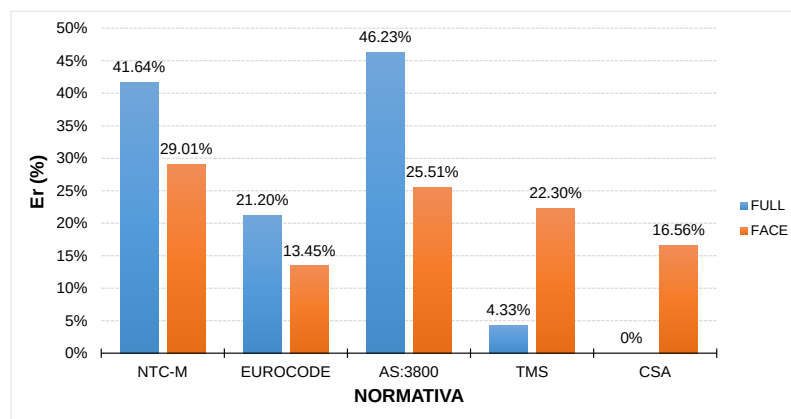


Figura 35. Error absoluto medio (MAE) obtenido por USM, utilizando como referencia los resultados de las simulaciones numéricas.

Los resultados obtenidos mostraron variaciones significativas entre las dos configuraciones de colocación del mortero, con diferencias que alcanzan hasta un 20%. Esta diferencia sugiere un mejor desempeño y mayor aplicabilidad de la configuración del mortero en caras laterales (*face*), al presentar estimaciones más consistentes y cercanas al valor de referencia.

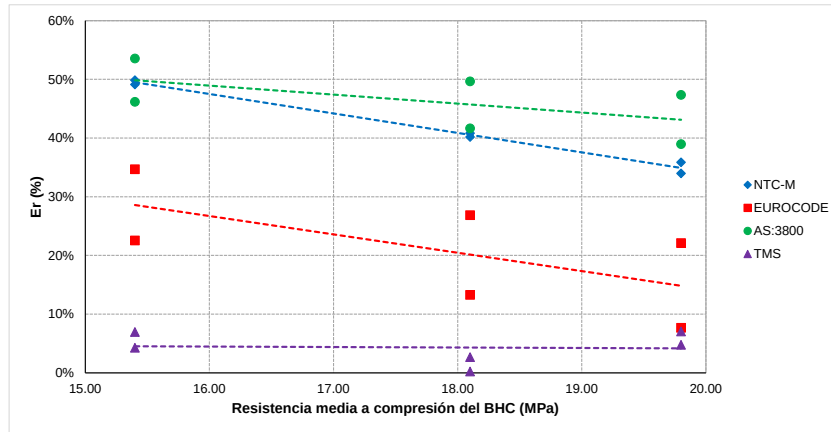


Figura 36. Error relativo en la estimación de la resistencia a la compresión de la mampostería con el mortero colocado en área neta (full) según diferentes normativas, en función de la resistencia del BHC.

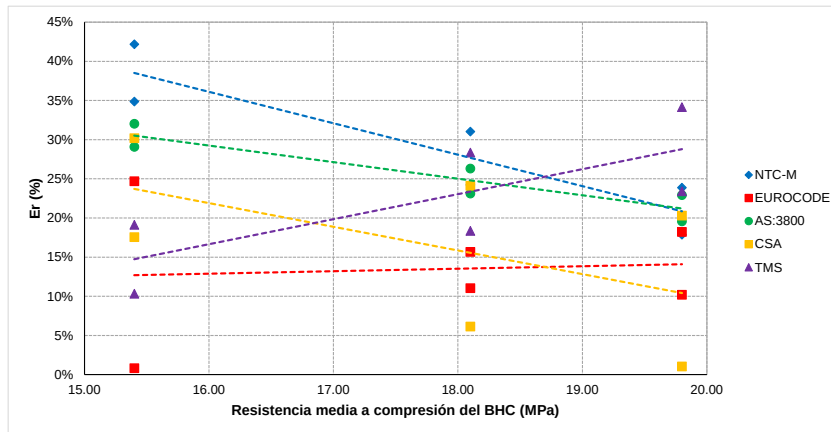


Figura 37. Error relativo en la estimación de la resistencia a compresión de la mampostería con el mortero colocado en caras laterales (face) según diferentes normativas en función de la resistencia del BHC.

Se observó que, en general, las normativas evaluadas tienden a presentar una reducción en el error relativo a medida que disminuye la resistencia a compresión de los BHC. En particular, la normativa Euro – código [5] evidenció un comportamiento más estable en ambas configuraciones de colocación del mortero, lo cual sugiere una mayor confiabilidad y la posiciona como una opción adecuada para su aplicación en el diseño estructural de elementos de mampostería.

4.5.3. Módulo de Young

Las normas internacionales establecen expresiones empíricas para calcular el módulo de Young de la mampostería a partir de la resistencia de diseño a la compresión ($f'_{p,net}$ y $f'_{p,l}$). Esta resistencia fue determinada mediante el método PTM conforme a los criterios establecidos por cada una de las normativas consideradas en el análisis.

En esta sección se presentan los resultados del módulo de Young calculado según las dos configuraciones: área neta (*full*), cuyos valores se encuentran en la Tabla 29, y caras laterales (*face*), presentados en la Tabla 30. Se tomaron como referencia los valores del módulo de Young obtenidos a partir de simulaciones numéricas, considerando el comportamiento lineal del espécimen durante su fase elástica, como se explicó en la sección anterior (Análisis de las curvas esfuerzo deformación).

Tabla 29. Comparación del módulo de Young (E_m) obtenida con normativas internacionales, en mampostería con configuración del mortero en área neta (*full*).

$\bar{f}_{b,net}$ Bloque	$f_{mc,cub}$ Mortero	$\bar{f}_{p,net}$ Pila	SN E_m	NTC-M[2] E_m $E_r(\%)$		EUROCODE[5] E_m $E_r(\%)$		AS:3800[14] E_m $E_r(\%)$		TMS[44] E_m $E_r(\%)$	
19.80											
18.10	7.50	13.27	8346	9302	11.46	11438	37.06	11198	34.17	12741	52.67
15.40											
19.80											
18.10	17.09	15.38	8720	10607	21.64	13077	49.97	12802	46.81	14614	67.59
15.40											
				MAE	16.55	MAE	43.51	MAE	40.49	MAE	60.13
				IAE	16.66	IAE	43.66	IAE	40.63	IAE	60.30

Tabla 30. Comparación del módulo de Young (E_m) obtenida con normativas internacionales, en mampostería con configuración del mortero en caras laterales (*face*).

$\bar{f}_{b,net}$ BHC	$\bar{f}_{mc,cub}$ Mortero	$\bar{f}_{p,l}$ Pila	SN E_m	NTC-M[2] E_m E_r		EUROCODE[5] E_m E_r		AS:3800[14] E_m E_r		TMS[44] E_m E_r		CSA[15] E_m E_r	
19.80													
18.10	7.50	11.51	9927	7774	21.69	9611	3.18	9409	5.22	10788	8.67	8599	13.37
15.40													
19.80													
18.10	17.09	12.01	10621	8242	22.40	10169	4.25	9955	6.27	11375	7.11	9099	14.33
15.40													
				MAE	22.04	MAE	3.72	MAE	5.74	MAE	7.89	MAE	13.85
				IAE	22.06	IAE	3.74	IAE	5.76	IAE	7.86	IAE	13.87

Los errores obtenidos para la configuración de área neta (*full*) son considerablemente mayores en comparación con la configuración de caras laterales (*face*), lo cual sugiere que las normativas tienen a sobrestimar el módulo de Young. En particular, para la mampostería con mortero evaluada bajo el criterio de área neta (*full*), la norma mexicana NTC-M [2] fue la que presentó la mejor aproximación, con un error promedio menor al 17%. En contraste, las demás normativas analizadas (Euro – código [5], AS:3800 [14] y TMS [44]) mostraron errores promedio superiores al 40%, además de valores del módulo considerablemente más altos, lo que evidencia una discrepancia importante y una clara sobrestimación.

En el caso de la configuración por caras laterales (*face*), los errores obtenidos fueron menores, destacando las normativas Euro – código [5] y AS:3800 [14] como las más precisas, con errores promedio de 3.72% y 5.74%, respectivamente. Cabe señalar que los valores del módulo de Young obtenidos mediante estas normas resultaron inferiores a los derivados de las simulaciones numéricas, lo cual resulta adecuado desde el punto de vista del diseño estructural, al favorecer un enfoque conservador. Por otro lado, la norma TMS [44] también mostró un error bajo (7.89%), aunque tiende a sobrestimar el módulo, lo que, aunque no excesivo, podría impactar negativamente el diseño estructural.

En la Figura 38 ilustran gráficamente los resultados obtenidos, facilitando la comparación de los errores asociados a ambas configuraciones de mortero.

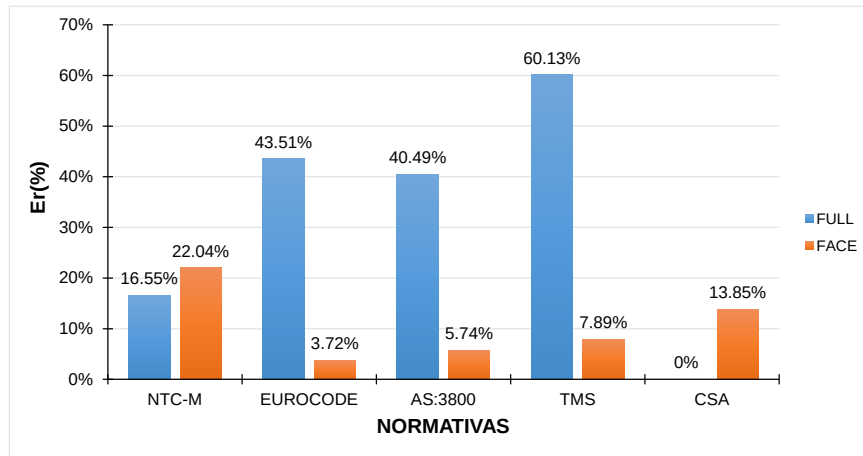


Figura 38. Error absoluto medio (MAE) obtenido por las normativas internacionales, utilizando como referencia los resultados de las simulaciones numéricas

Se observa que las discrepancias entre los valores de errores promedio pueden alcanzar hasta un 50%, siendo la configuración por caras laterales (*face*) la que arroja resultados más cercanos a los obtenidos numéricamente, por tanto, más representativos del comportamiento real de la estructura.

4.6. DISCUSIÓN DE EXPRESIONES PROPUESTAS EN ESTUDIOS CIENTÍFICOS PREVIOS

En esta sección, se analizarán las expresiones empíricas propuestas por diversos autores en investigaciones previas, las cuales se encuentran descritas en el *Capítulo 2* de esta investigación. El objetivo es evaluar su aplicabilidad y comparar los resultados que dichas ecuaciones arrojan frente a los valores obtenidos mediante simulaciones numéricas, utilizadas como referencia en este estudio.

Para llevar a cabo la evaluación, se calcularon el error relativo (E_r), el error relativo promedio (MAE) y el índice de error relativo (IAE) con la ecuación 40, 41 y 42 previamente definidas en secciones anteriores. El propósito de estos

indicadores es determinar el grado de similitud con los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas, así como evaluar la confiabilidad de las expresiones propuestas en la literatura.

4.6.1. Resistencia a compresión de la mampostería

En este apartado se presentan los resultados obtenidos al aplicar las ecuaciones propuestas en diversas investigaciones para la obtención de la resistencia a la compresión de la mampostería ($\bar{f}_{p,net}$ y $\bar{f}_{p,l}$), la cual se calculó en función de la resistencia media a la compresión del BHC ($\bar{f}_{b,net}$) y la resistencia a compresión del mortero, obtenida con especímenes cúbicos de 5 cm ($f_{mc,cub}$).

Las Tabla 31 y Tabla 32 presentan los resultados de la resistencia a la compresión de la mampostería, diferenciando la configuración del mortero. La Tabla 31 corresponde a la colocación del mortero sobre el área neta (*full*), mientras que la Tabla 32 muestra los resultados para el mortero colocado en caras laterales (*face*). En la parte superior de ambas tablas, se incluyen los valores obtenidos de las simulaciones numéricas, los cuales sirvieron como referencia para el cálculo del error relativo (E_r).

Para facilitar una comparación representativa, se destaca la resistencia media de los BHC utilizados en esta investigación, que fue de 17.77 MPa. Este valor representa el promedio de las tres resistencias de BHC consideradas en el estudio.

Para complementar el análisis numérico y ofrecer una perspectiva más completa, las Figura 39 y Figura 40 presentan de manera grafica los resultados obtenidos. Estas figuras permiten una visualización clara de las tendencias y diferencias observadas en la resistencia de la mampostería.

Tabla 31. Estimación de la resistencia a la compresión de la mampostería con mortero en área neta (full), utilizando ecuaciones propuestas por diversos autores.

Referencia	BHC $\bar{f}_{b,net}$ (MPa)	Mortero I $f_{mc,cub} = 7.50 \text{ MPa}$		Mortero II $f_{mc,cub} = 17.09 \text{ MPa}$	
		Pila $\bar{f}_{p,net}$ (MPa)	E_r (%)	Pila $\bar{f}_{p,net}$ (MPa)	E_r (%)
Investigación actual	19.80 18.10 15.40	13.27	-	15.38	-
<i>Alvarez et al. [16]</i>	19.80	15.27	15.11%	17.18	11.73%
	18.10	14.12	6.38%	15.88	3.25%
	15.40	12.25	7.71%	13.78	10.42%
	17.77	13.89	4.67%	15.63	1.60%
<i>Pereira et al. [18]</i>	19.80	-	-	13.25	13.88%
	18.10	-	-	12.34	19.74%
	15.40	9.69	26.97%	11.29	26.57%
	17.77	10.99	17.18%	12.59	18.13%
<i>Fortes et al. [19]</i>	19.80	17.41	31.17%	17.41	13.17%
	18.10	15.74	18.68%	15.75	2.40%
	15.40	12.77	3.79%	12.77	16.99%
	17.77	15.41	16.12%	15.41	0.19%
<i>Sarhat and Sherwood I [17]</i>	19.80	14.93	12.53%	17.32	12.61%
	18.10	13.96	5.21%	16.19	5.28%
	15.40	12.37	6.80%	14.34	6.73%
	17.77	13.77	3.77%	15.97	3.84%
<i>Sarhat and Sherwood II [17]</i>	19.80	14.19	6.92%	16.45	6.99%
	18.10	13.26	0.05%	15.38	0.02%
	15.40	11.75	11.45%	13.63	11.39%
	17.77	13.08	1.42%	15.17	1.35%
<i>Koksal et al. [31]</i>	19.80	18.01	35.75%	19.31	25.53%
	18.10	16.74	26.14%	18.03	17.24%
	15.40	14.71	10.88%	16.01	4.07%
	17.77	16.49	24.27%	17.78	15.63%
<i>Guo</i>	19.80	13.41	1.08%	14.45	6.04%
	18.10	12.39	6.67%	13.33	13.31%
	15.40	10.70	19.34%	11.51	25.16%
	17.77	12.18	8.19%	13.11	14.74%

Tabla 32. Estimación de la resistencia a la compresión de la mampostería con mortero en caras laterales (*face*), utilizando ecuaciones propuestas por diversos autores.

Referencia	BHC $\bar{f}_{b,net}$ (MPa)	Mortero I $f_{mc,cub} = 7.50 \text{ MPa}$		Mortero II $f_{mc,cub} = 17.09 \text{ MPa}$	
		Pila $\bar{f}_{p,l}$ (MPa)	E_r (%)	Pila $\bar{f}_{p,l}$ (MPa)	E_r (%)
Investigación actual	19.80 18.10 15.40	11.51	-	12.01	-
<i>Alvarez et al. [16]</i>	19.80	13.86	20.43%	14.87	23.78%
	18.10	12.80	11.24%	13.73	14.34%
	15.40	11.10	3.56%	11.90	0.88%
	17.77	12.60	9.44%	13.51	12.49%
<i>Sarhat and Sherwood I [17]</i>	19.80	14.93	29.74%	17.32	44.21%
	18.10	13.96	21.29%	16.19	34.82%
	15.40	12.37	7.45%	14.34	19.44%
	17.77	13.77	19.63%	15.97	32.97%
<i>Sarhat and Sherwood II [17]</i>	19.80	15.59	35.46%	18.08	50.56%
	18.10	14.58	26.64%	16.90	40.76%
	15.40	12.91	12.19%	14.98	24.70%
	17.77	14.38	24.90%	16.67	38.83%

Como se observa en la Figura 39, que ilustra los errores relativos de las diversas investigaciones para la mampostería con mortero en área neta (*full*), los trabajos de Álvarez et al. [16] y Sarhat & Sherwood [17], exhiben los resultados más cercanos a los obtenidos por el método numérico. Específicamente, Álvarez reporta un error relativo del 4.67 % y 1.60 % para el mortero con resistencia de 7.50 MPa y de 17.09 MPa respectivamente. Mientras que Sarhat & Sherwood parte I presenta errores de 3.77 % y 3.84 %, y la parte II de 1.42 % y 1.35 % para cada mortero respectivamente. Estos valores, son todos inferiores al 5 % y sugieren una excelente concordancia con las predicciones numéricas, validando la precisión de estos estudios en esta configuración.

En contraste, para la mampostería con mortero en caras laterales (*face*), la Figura 40 revela que la investigación de Álvarez et al. [16] es la que presenta los resultados más próximos a la metodología numérica. Los errores relativos observados son del 9.44 % para el mortero con resistencia de 7.50 MPa y de 12.49 % para el mortero de 17.09 MPa. Sin embargo, a pesar de ser los más

cercanos en esta configuración, los errores relativos son considerablemente más elevados que en el caso del mortero en área neta (*full*), superando el 10 %.

La comparación entre ambas configuraciones resulta que la mampostería con mortero en área neta (*full*) cuenta con una mayor cantidad de ecuaciones propuestas para la estimación de la resistencia, y lo que es más importante sus resultados demuestran una mayor cercanía a los valores numéricos, por ende, una mayor precisión en comparación con la colocación del mortero en caras laterales (*face*).

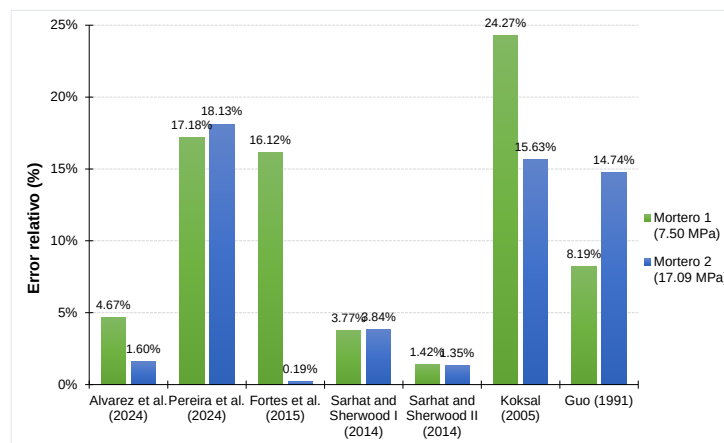


Figura 39. Grafica de Error relativo (*Er*) para la comparación de la estimación de la resistencia de la mampostería con mortero en área neta (*full*).

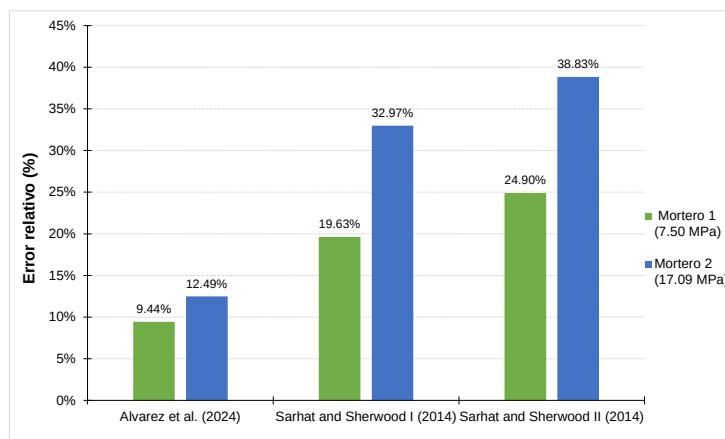


Figura 40. Grafica de Error relativo (*Er*) para la comparación de la estimación de la resistencia de la mampostería con mortero en caras laterales (*face*).

4.7. COMENTARIOS FINALES DEL CAPÍTULO

A continuación, se mencionan aspectos importantes que se abordaron en el presente capítulo.

1. Los resultados obtenidos mediante la micro – modelación numérica permitieron reproducir de forma precisa el comportamiento de las pilas de mampostería bajo carga axial.
2. Las curvas de esfuerzo – deformación y el módulo de elasticidad presenta una variabilidad entre el 17% y el 22%, influenciada principalmente por la resistencia de los bloques huecos de concreto (BHC) y del mortero. Las configuraciones con mortero de mayor resistencia reflejaron una mayor dispersión en los resultados.
3. Las configuraciones de falla en la mampostería fueron representadas por la deformación plástica equivalente, lo cual nos indica el grado de deformación irreversible del material (límite de daño en compresión y tensión). Los resultados arrojaron que el tipo de falla se ve afectado principalmente por el tipo de colocación y por la variación de la resistencia en los BHC.
4. El análisis de sensibilidad demostró que la posición de los bloques con diferentes resistencias dentro de la pila de mampostería afecta su comportamiento estructural. Las pilas que contienen bloques con menor resistencia (15.40 MPa) contribuyen a una menor dispersión en los valores del esfuerzo máximo. En contraste, con bloques de mayor resistencia (19.80 MPa) favorece una mayor estabilidad en las deformaciones obtenidas asociadas al esfuerzo máximo, mostrando resultados consistentes independientemente de su ubicación. Los módulos no mostraron variaciones significativas independientemente de la posición del bloque.
5. La evaluación mediante los métodos del prisma (PTM) y de la unidad (USM) mostró que el Euro código [5] y la NTC – M [2] presentan los errores relativos más bajos con valores promedios entre 1% y 4%, lo que

demuestra una alta concordancia con los resultados numéricos. En cambio, la TMS [13] tendió sobrestimar la resistencia y el módulo de elasticidad, mientras que las normas AS 3700 [14] y CSA [15] mostraron un comportamiento intermedio conservador.

6. En la estimación del módulo de elasticidad para la configuración del mortero en caras laterales (*face*), las normas Euro código [5] y AS 3700 [14] fueron las más precisas, con errores medios absolutos inferiores al 6%, mientras que las demás presentaron sobrestimaciones superiores al 40% en la configuración del mortero en área neta (*full*).
7. Las ecuaciones propuestas para la estimación de la resistencia a compresión de la mampostería por Álvarez et al. [16] y por Sarhat y Sherwood [17] fueron las que presentaron un porcentaje menor de error con los resultados obtenidos en esta investigación.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Al concluir la presente investigación, se validó la hipótesis de partida llegando a las siguientes conclusiones:

1. La variación de la resistencia a compresión de los bloques huecos de concreto, así como la variación de su posición dentro de los especímenes evaluados, resultó ser influyente en el cálculo de la resistencia a compresión de la mampostería llegando a ser de hasta 17 %. Por su parte el módulo de elasticidad llegó a presentar diferencias del 22%.
2. La micro – modelación tridimensional es un método avanzado que logra representar el comportamiento de la mampostería y la interacción entre el BHC y el mortero. Esta ha sido empleada por diversos autores obteniendo resultados confiables y verificables.
3. Se desarrolló una metodología en la presente investigación que permite que futuras investigaciones puedan reproducir el estudio con otros tipos de bloques.
4. La variación en la colocación del mortero produce diferencia en los tipos de falla dentro de los prismas: cuando se coloca el mortero en área neta provoca una falla inicial en el BHC a compresión, mientras que la colocación en caras laterales provoca una falla inicial en el mortero a tensión.
5. Las ecuaciones propuestas por la literatura han demostrado mayor representación del comportamiento de la mampostería que las ecuaciones propuestas por las normas internacionales.

5.2. RECOMENDACIONES

Una vez concluidos los trabajos de esta investigación, se plantean las siguientes recomendaciones.

1. Realizar micro – modelación numérica detallada de muretes y muros de mampostería, con el objetivo de variar la colocación del mortero en área neta y caras laterales, así como otros parámetros que puedan impactar su comportamiento.
2. Continuar con la micro – modelación numérica en pilas de mampostería con el objetivo de aplicar otras variaciones como el refuerzo en sus huecos o mampostería confinada.
3. Continuar con la propuesta de ecuaciones para la estimación de la resistencia a compresión y módulo elástico de la mampostería, contemplando la variación que existe en los materiales de mampostería.

6. Resultados obtenidos. Difusión y divulgación de los resultados

- 5to Encuentro de Ciencia, Tecnología e Ingeniería de Estudiantes de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil (ECTIFIC) – UANL
Ponente: “Empleo de la modelación numérica en pilas de mampostería sometidas a compresión axial asumiendo una variabilidad en sus componentes”
Fecha: octubre 2024
- Mujeres en la ciencia, Facultad de Ingeniería Civil – UANL
Exposición de poster: “Análisis paramétrico del comportamiento a compresión de pilas de mampostería de bloques huecos de concreto empleando la micro – modelación”
Fecha: octubre 2024
- Seminario de investigación, Facultad de Ingeniería Civil – UANL
Ponente: “Simulación paramétrica en prismas de mampostería de bloques huecos de concreto”
Fecha: mayo 2025
- XXII Encuentro: Participación de la Mujer en la Ciencia – Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. (CIO)
Exposición de poster: “Estudio de fallas en prismas de mampostería a compresión empleando la micro – modelación numérica”
Fecha: mayo 2025

REFERENCIAS

1. ONNCCE, *NMX-C-404-ONNCCE-2012 – Mampostería – Bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – Especificaciones y métodos de ensayo*. 2012: Cd. México. p. 16.
2. NTCM, *Norma Técnica Complementaria para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería*. 2023: Cd. México p. 119.
3. ONNCCE, *NMX-C-464-ONNCCE-2010 - Industria de la construcción - Mampostería - Determinación de la resistencia a compresión diagonal y módulo de corte de mureteres, así como determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o de concreto - Métodos de ensayo*. 2010. p. 23.
4. Standard China, B., *GB/T 50129 - Standard for test method of basic mechanics properties of masonry*. 2011.
5. Eurocode-6, *Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforces and unreinforced masonry structures*. 2005. p. 125.
6. Garcia-Cedeño, R., *Influencia de la forma de colocación del mortero en el comportamiento a compresión uniaxial de la mampostería de bloques huecos de concreto* in *Department of Structures*. 2024, Universidad Autónoma de Nuevo León
7. Zhu, F., et al., *Spatial variability and sensitivity analysis on the compressive strength of hollow concrete block masonry wallettes*. *Construction and Building Materials*, 2017. **140**: p. 129-138.
8. Balandrano-Vázquez, R., *Análisis multifactorial del comportamiento a compresión axial de pilas de mampostería elaboradas con bloques huecos de concreto*, in *Departament of Structures*. 2019, Universidad Autónoma de Nuevo León
9. Flores-Garcia, C., *Análisis de los factores de corrección por esbeltez geométrica en prismas elaborados con bloques huecos de concreto en la región de Nuevo León*. 2022, Universidad Autonoma de Nuevo León. p. 75.
10. Romo-Letechípia, P., *Influencia de la forma de colocación del mortero en el comportamiento a corte de la mampostería elaborada con bloques*

huecos de concreto, in *Department of Structures*. 2024, Universidad Autonoma de Nuevo León p. 103.

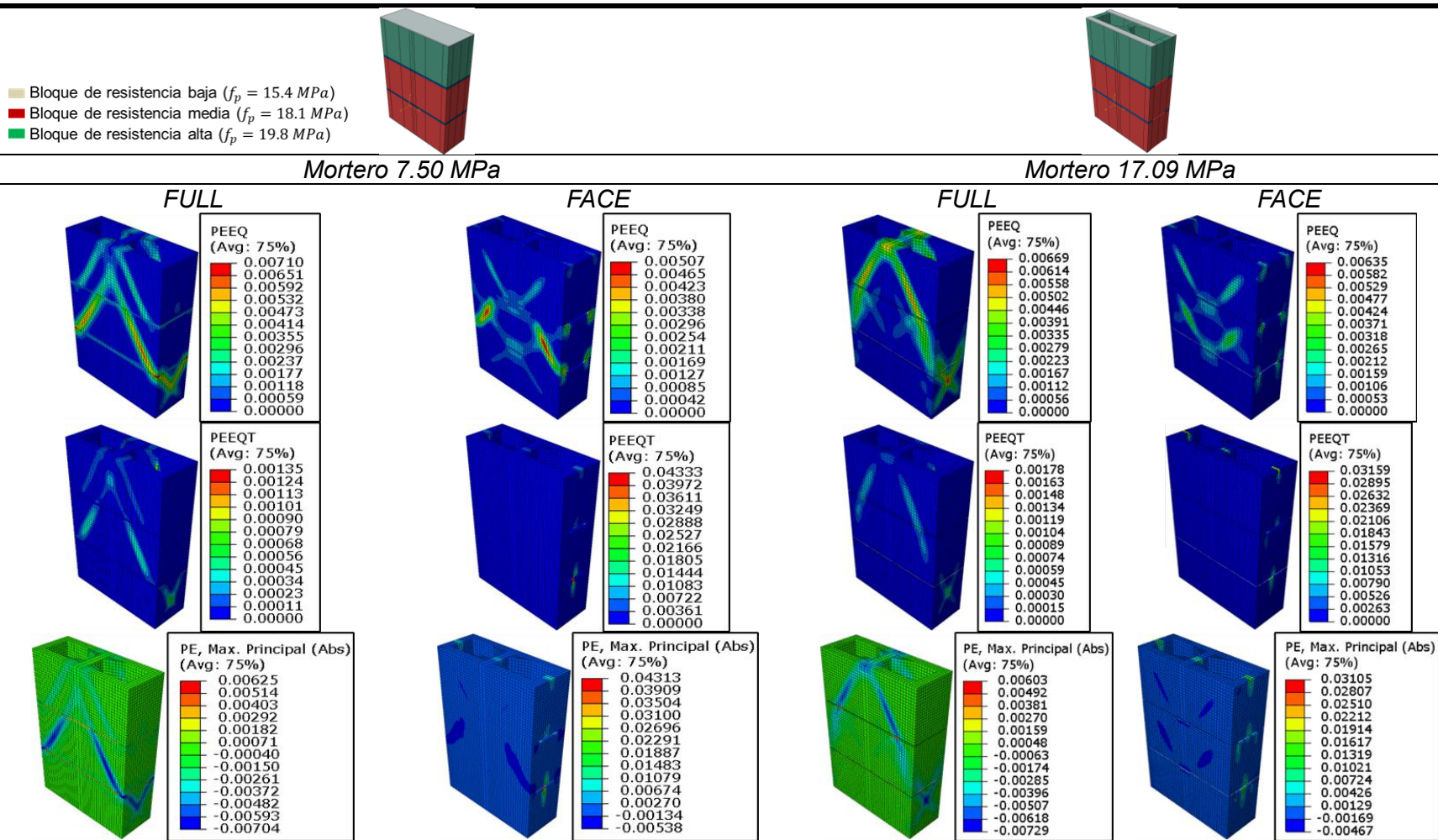
11. Lourenco, P., *Computational Strategy for Masonry Structures*. 1996. 210.
12. Álvarez-Pérez, J., et al., *Multifactorial behavior of the elastic modulus and compressive strength in masonry prisms of hollow concrete blocks*. 2020. **241**: p. 18.
13. Society, T.M., *Building code requirements and specification for masonry structures and companion commentaries*, in *TMS 402/602-ACI 530*, ASCE. 2021.
14. AS-3800, A.S.A., *AS 3700: Masonry Structures*. 2018.
15. Association, C.S., *CSA S304.1-04*, in *Desing of masonry structures*. 2004. p. 148.
16. Álvarez-Pérez, J., et al., *Analysis of behavior and uniaxial compression failure modes in ungrouted hollow concrete block masonry and their implication in design expressions*. 2024: p. 32.
17. Sarhat, S.R. and E.G. Sherwoos, *The prediction of compressive strength of ungrouted hollow concrete block masonry*. Elsevier, 2014: p. 11.
18. Leite, M.D.L.P., E.A.P. Liberati, and G.A. Parsekian, *Estimate models of compression strength of prisms from structural masonry components*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2024. **17**(6).
19. Fortes, E.S., G.A. Parsekian, and F.S. Fonseca, *Relationship between the Compressive Strength of Concrete Masonry and the Compressive Strength of Concrete Masonry Units*. American Society of Civil Engineers, 2015: p. 12.
20. Mohamad, G., P.B. Lourenço, and H.R. Roman, *Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: Review and prospects*. Cement and Concrete Composites, 2007. **29**(3): p. 181-192.
21. Nalon, G., et al., *Review of recent progress on the compressive behavior of masonry prisms*. Construction and Building Materials, 2022. **320**: p. 126181.
22. 772-1, B.E., *Methods of test for masonry units Part 1: Determination of compressive strength*. 2011, European Standars.
23. Said Taryal, M. and M.K. Chowdhury, *Evaluation of the relation between the compressive strength of cement by the British Standard cube test and*

- iso-rilem prism test*. Cement and Concrete Research, 1982. **12**(6): p. 697-704.
24. Nalon, G., et al., *Effect of Specimens' Shape and Size on the Determination of Compressive Strength and Deformability of Cement-lime Mortars*. 2018.
 25. Lourenco, P., J. Rots, and J. Blaauwendraad, *Two approaches for the analysis of masonry structures: Micro and macro-modeling*. HERON, 40 (4), 1995, 1995. **40**.
 26. Barbosa, C., P. Lourenco, and J. Hanai, *On the compressive strength prediction for concrete masonry prisms*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 2010. **43**: p. 331-344.
 27. Mohamad, G., P. Lourenco, and H. Roman, *Study of the compressive strength of concrete block prisms – stack and running bond*. IBRACON Structures and Materials Journal, 2011. **4**: p. 347-358.
 28. DIANA. 2005.
 29. SIMULIA, D.S., *ABAQUS Analysis User's Manual*. 2012.
 30. Khalaf, F.M., A.W. Hendry, and D.R. Fairbairn, *Elastic modulus and strength of hollow concrete block masonry with reference to the effect of lateral ties* Magazine of Concrete Research, 1994.
 31. Köksal, H.O., C. Karakoç, and H. Yildirim, *Compression Behavior and Failure Mechanisms of Concrete Masonry Prisms*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2005: p. 9.
 32. Drysdale, R.G. and A.A. Hamid, *Behavior of Concrete Block Masonry Under Axial Compression*. American Concrete Institute, 1979.
 33. Ramamurthy, K., V. Sathish, and R. Ambalavanan, *Compressive Strength Prediction of Hollow Concrete Block Masonry Prisms*. American Concrete Institute, 2000.
 34. Jaafar, M., et al., *Strength correlation between individual block, prism and basic wall panel for load bearing interlocking mortarless hollow block masonry*. Construction and Building Materials - CONSTR BUILD MATER, 2006. **20**: p. 492-498.
 35. Institution, B.S., *BS 5628-1: Code of practice for use of masonry – Part 1: Structural use of unreinforced masonry*. 1992, BSI.

36. Haach, V.G., et al., *Influence of the mortar on the compressive behavior of concrete masonry prisms*. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, 2010. **18**: p. 79-84.
37. Standardization, E.C.f., *EN 1015-11: Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. 1999.
38. Khalaf, F.M., A.W. Hendry, and D.R. Fairbairn, *Study of the compressive strength of blockwork masonry*. ACI Structural Journal, 1994. **91**(4).
39. Zahra, T., 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, 2021. **38**: p. 102213.
40. Barbosa, C.S. and J.B. Hanai, *Strength and deformability of hollow concrete blocks: correlation of block and cylindrical sample test results*. IBRACON, 2009: p. 85 - 99.
41. Fortes, E., et al., *Compressive strength of masonry constructed with high strength concrete blocks*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2017. **10**: p. 1273-1319.
42. ONNCCE, *NMX-C-036-ONNCCE-2013 Industria de la construcción – Mampostería – Resistencia a la compresión de bloques, tabiques o ladrillos y tabicones y adoquines – Método de ensayo*. 2013.
43. Mesa-Lavista, M. and J. Álvarez-Pérez, *Calibración numérica de un problema de ingeniería vial*. Revista de construcción, 2011. **10**.
44. Das, S., et al., *Effect of height-to-thickness ratio on compressive strength of masonry*. TMS's Masonry Journal, 2014. **32**: p. 1-10.

ANEXOS

ANEXO A. Configuración de falla en las pilas de mampostería (PEEQ y PEEQT)



- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)



Mortero 7.50 MPa

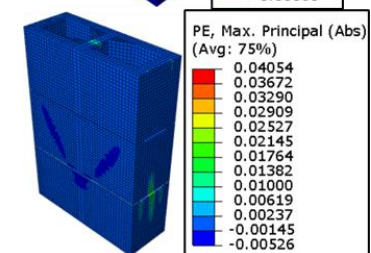
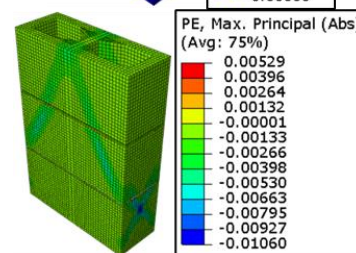
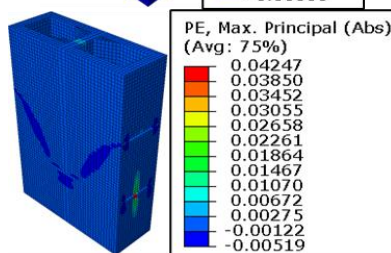
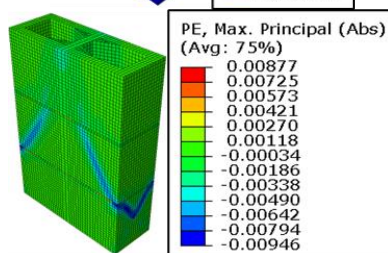
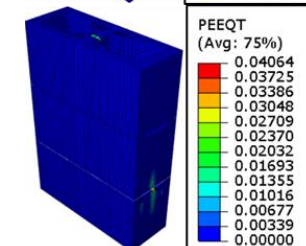
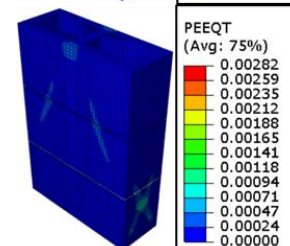
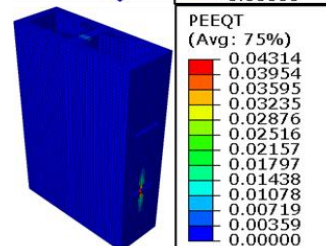
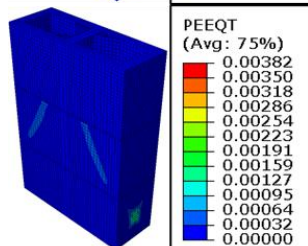
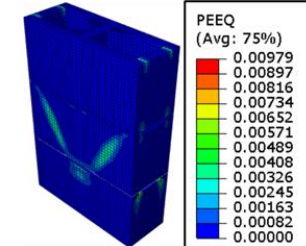
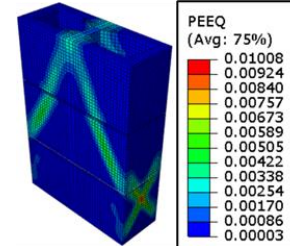
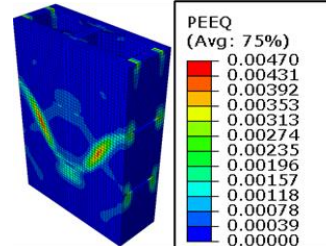
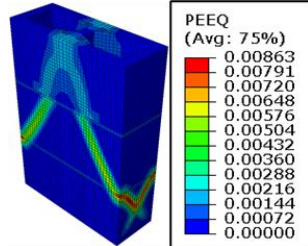
Mortero 17.09 MPa

FULL

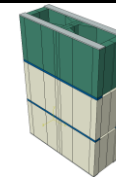
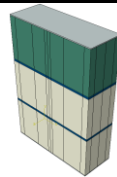
FACE

FULL

FACE



- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)



Mortero 7.50 MPa

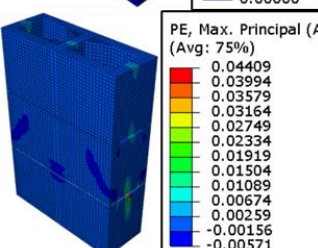
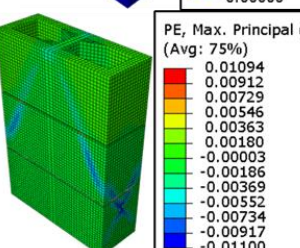
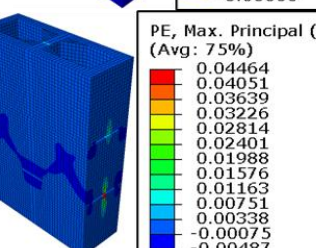
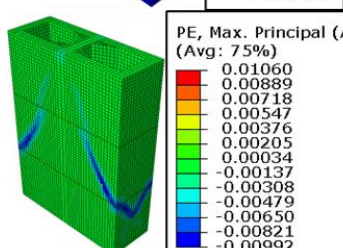
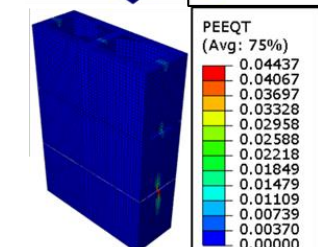
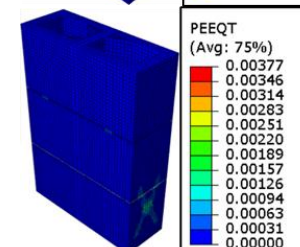
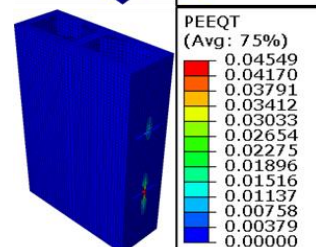
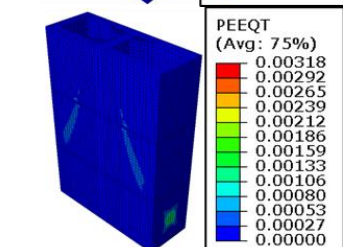
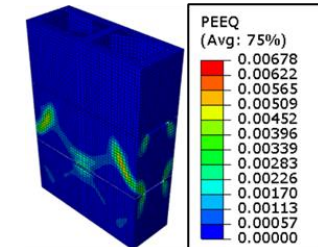
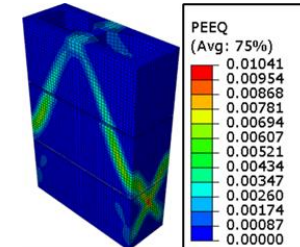
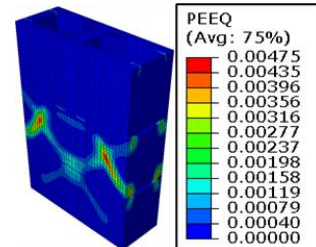
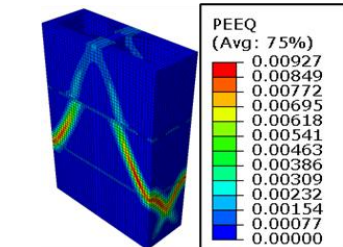
Mortero 17.09 MPa

FULL

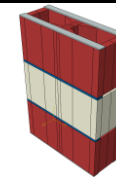
FACE

FULL

FACE



- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)



Mortero 7.50 MPa

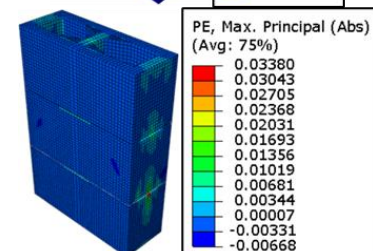
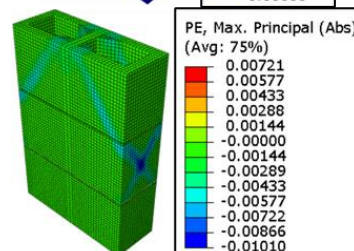
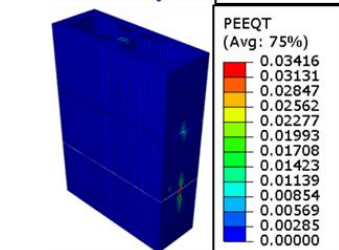
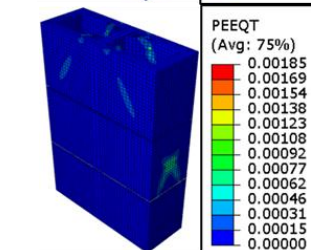
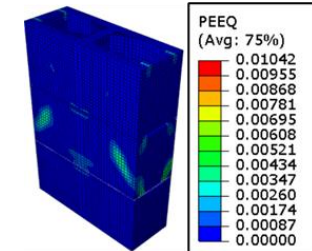
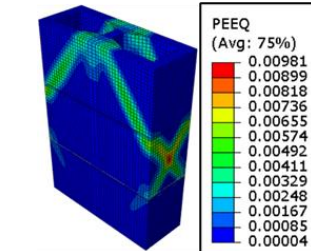
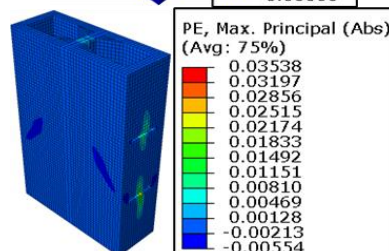
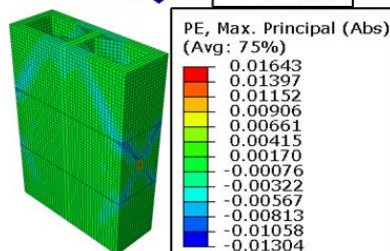
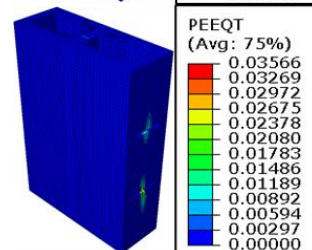
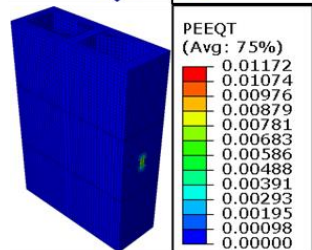
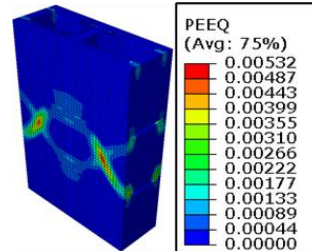
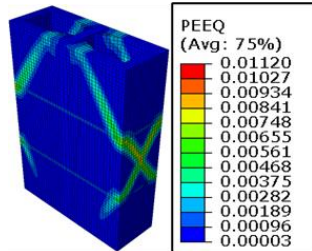
Mortero 17.09 MPa

FULL

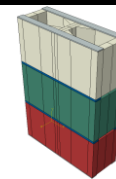
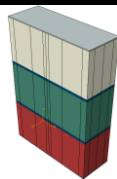
FACE

FULL

FACE



- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)



Mortero 7.50 MPa

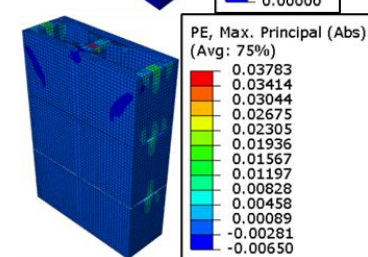
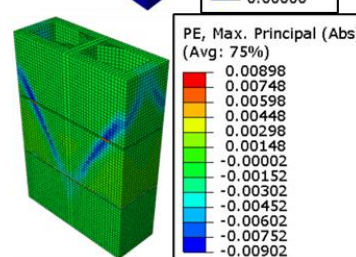
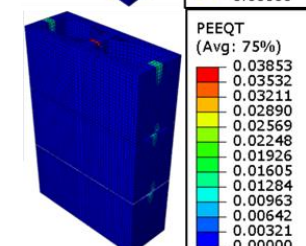
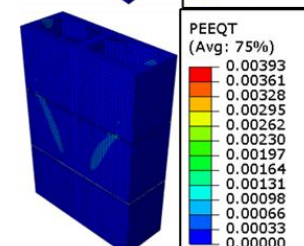
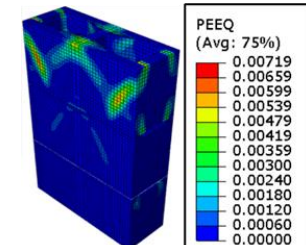
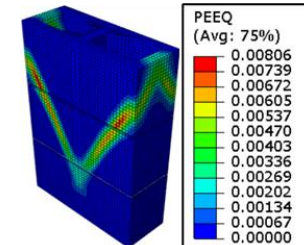
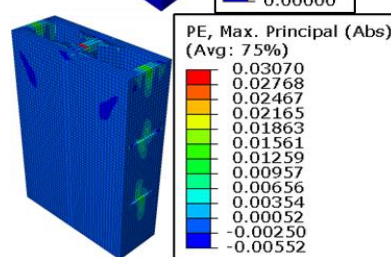
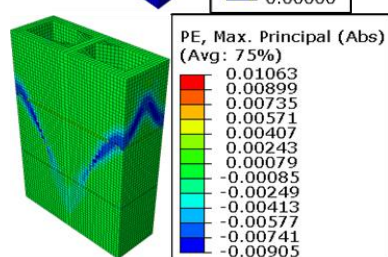
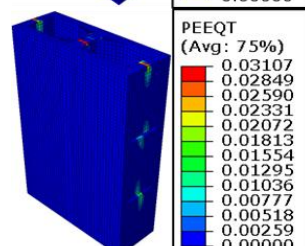
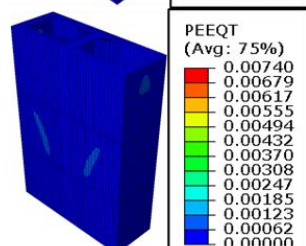
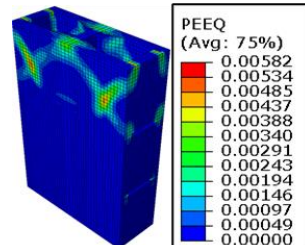
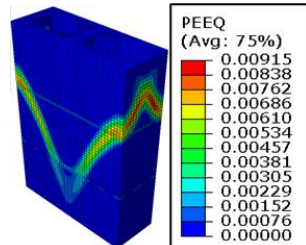
Mortero 17.09 MPa

FULL

FACE

FULL

FACE



- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)



Mortero 7.50 MPa

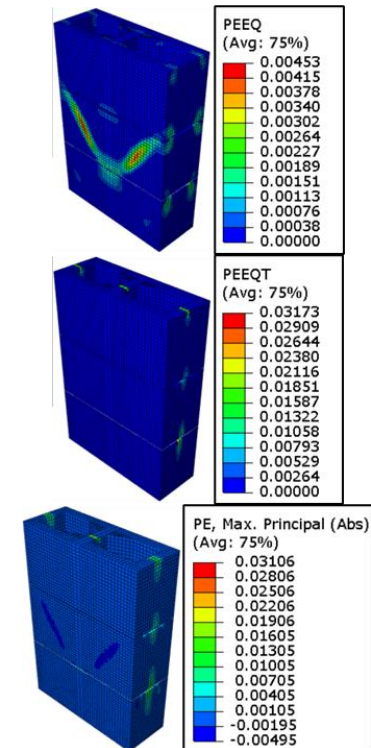
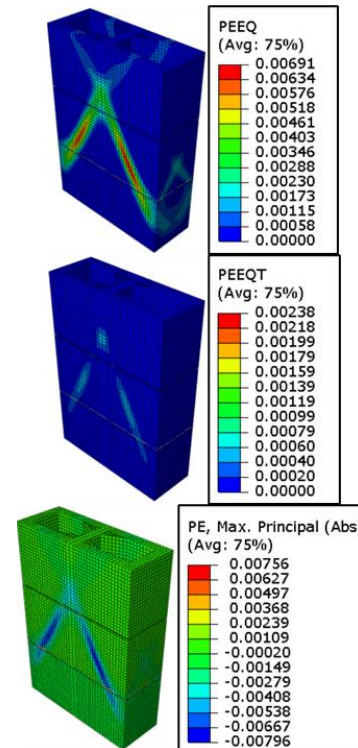
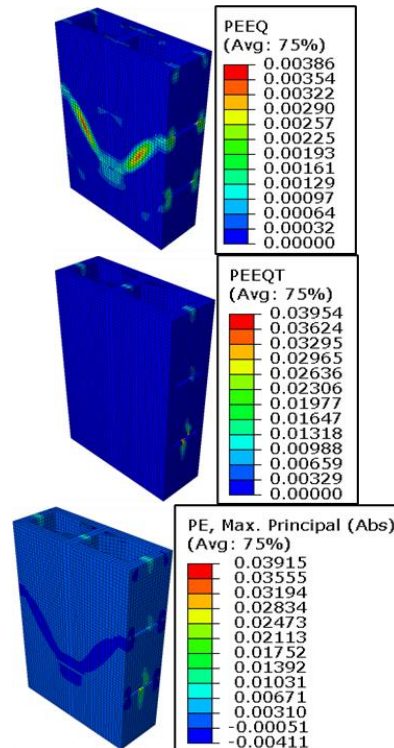
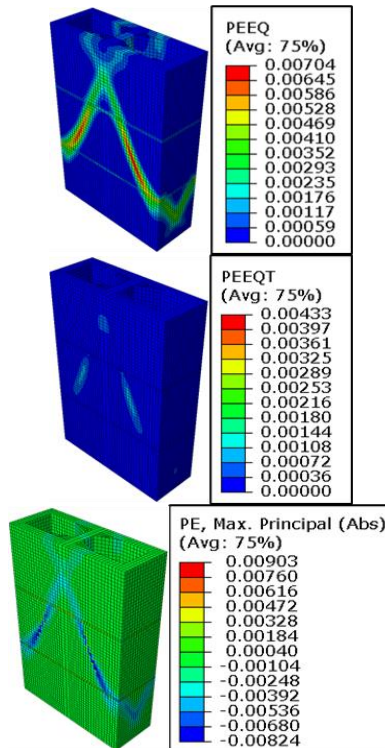
Mortero 17.09 MPa

FULL

FACE

FULL

FACE



- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)



Mortero 7.50 MPa

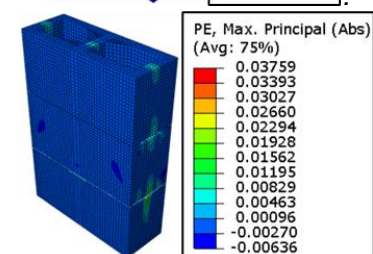
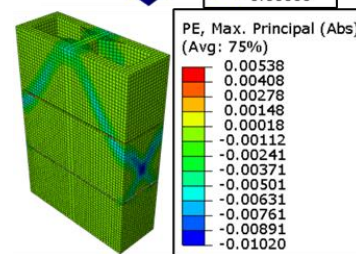
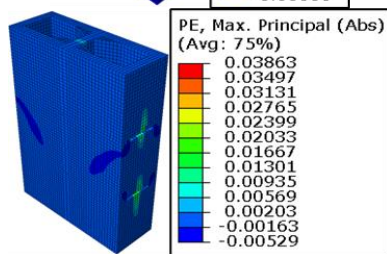
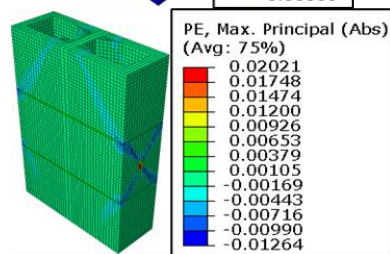
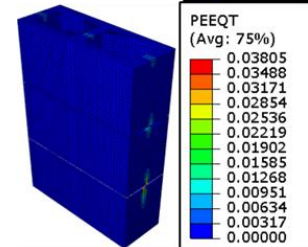
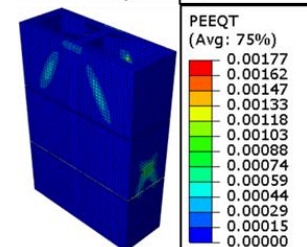
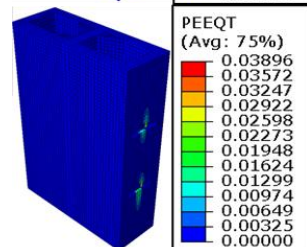
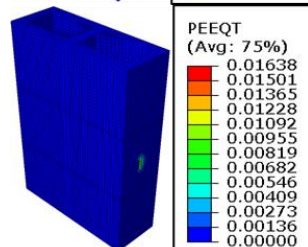
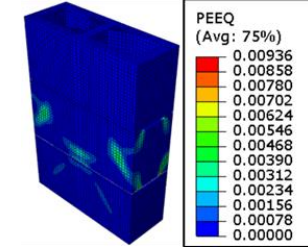
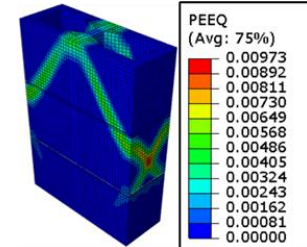
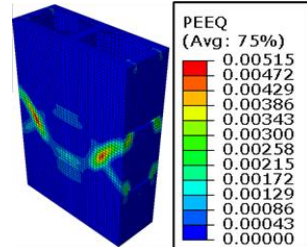
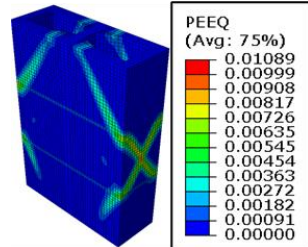
Mortero 17.09 MPa

FULL

FACE

FULL

FACE



- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)



Mortero 7.50 MPa

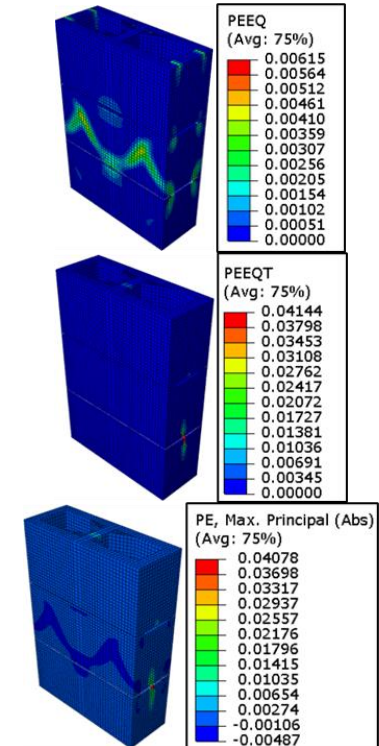
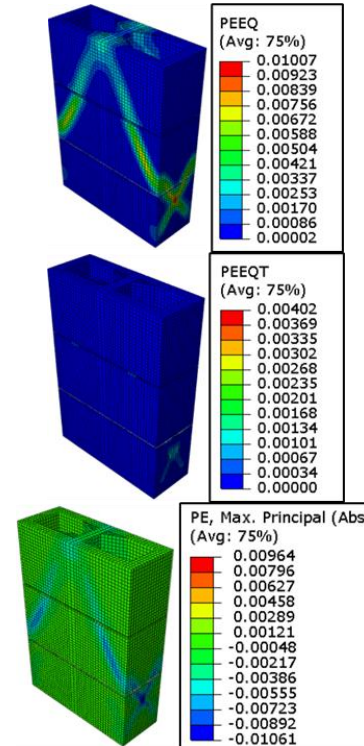
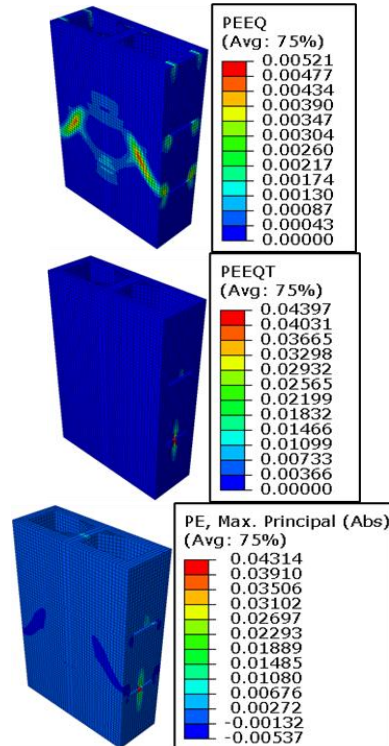
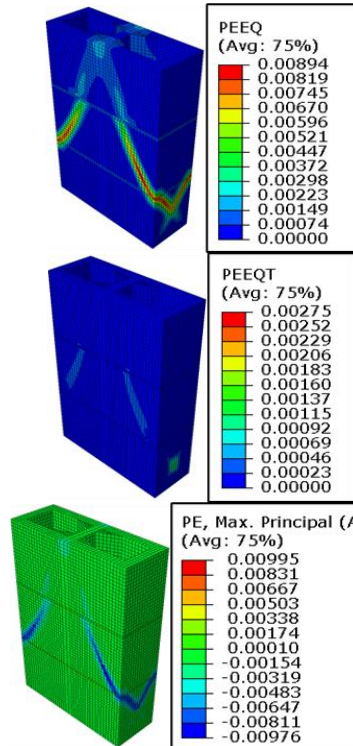
Mortero 17.09 MPa

FULL

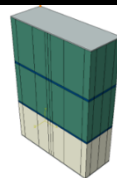
FACE

FULL

FULL



- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)



Mortero 7.09 MPa

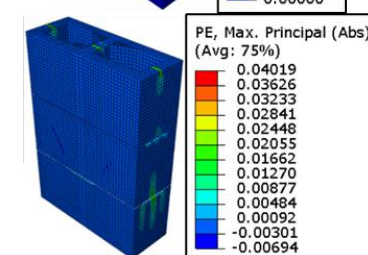
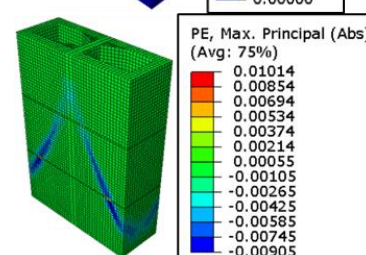
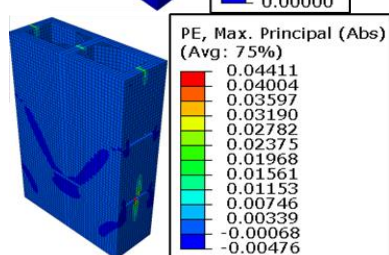
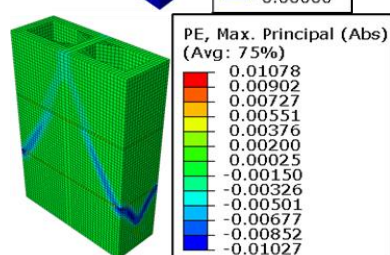
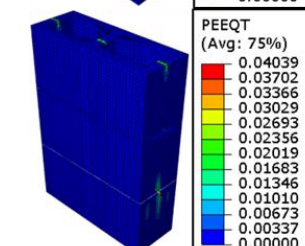
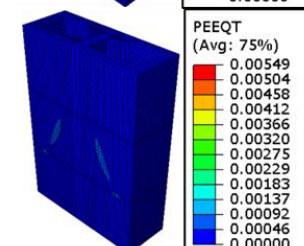
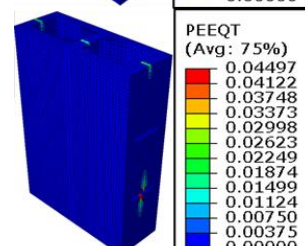
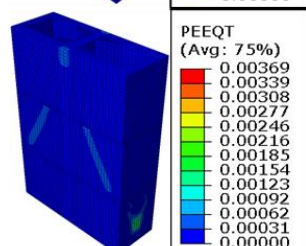
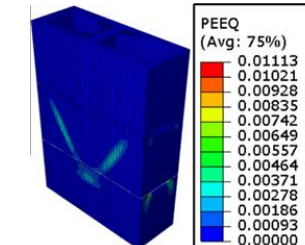
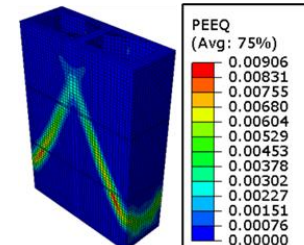
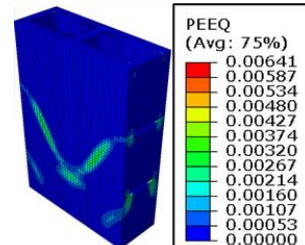
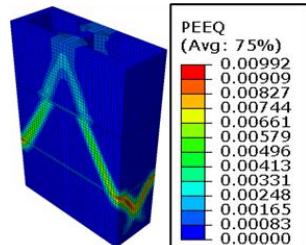
Mortero 17.09 MPa

FULL

FACE

FULL

FACE



- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)



Mortero 7.50 MPa

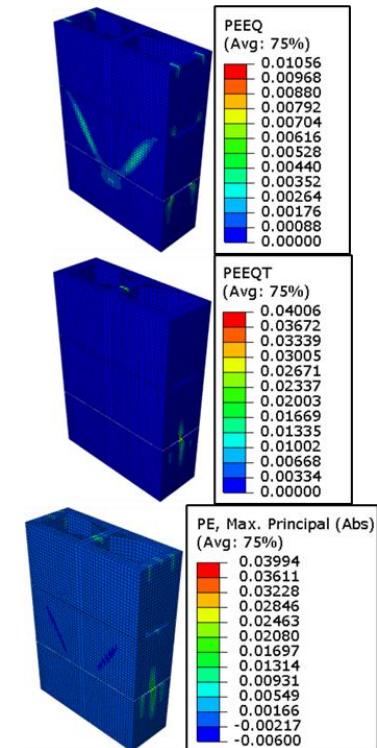
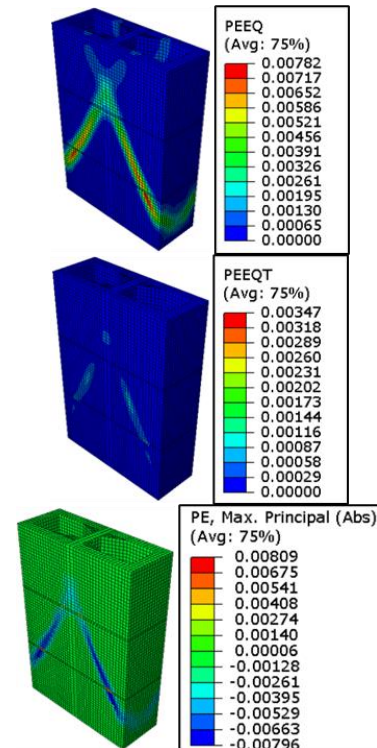
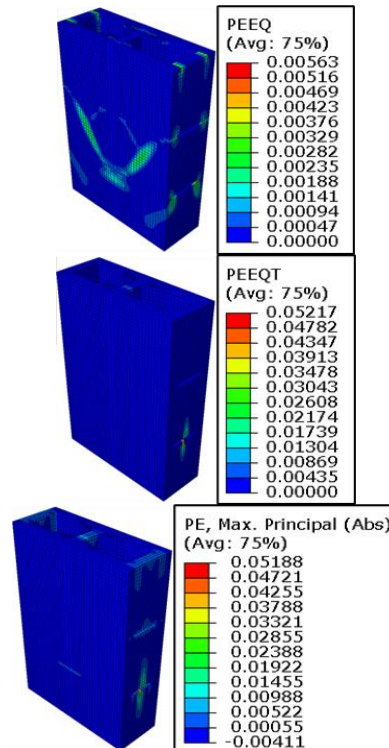
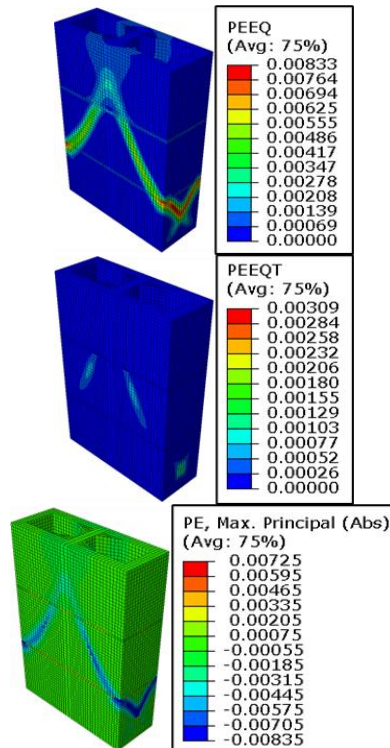
Mortero 17.09 MPa

FULL

FACE

FULL

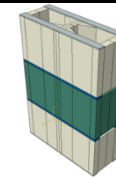
FACE



- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)

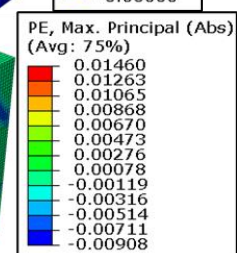
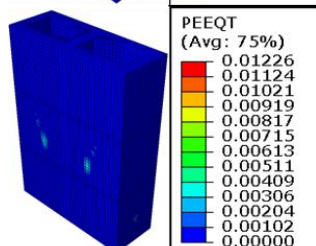
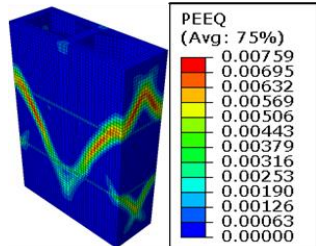


Mortero 7.50 MPa

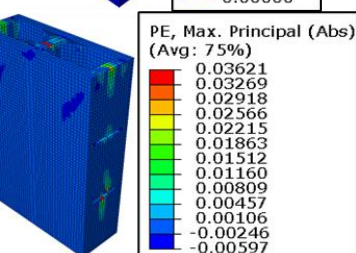
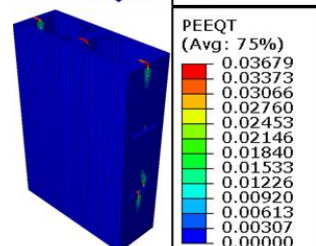
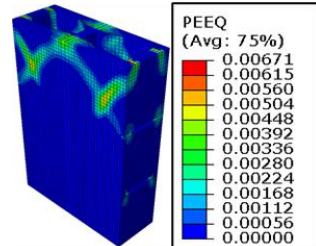


Mortero 17.09 MPa

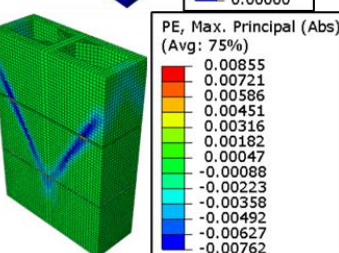
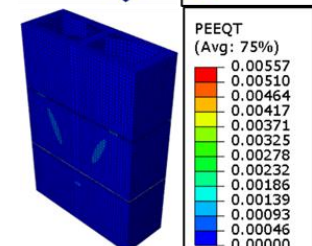
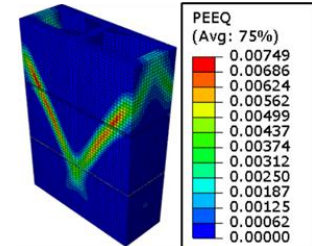
FULL



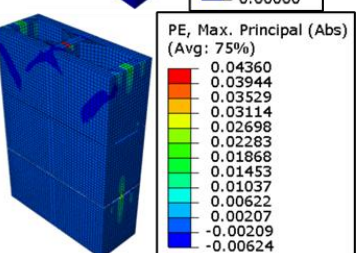
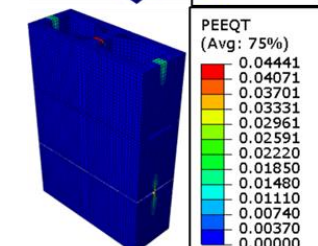
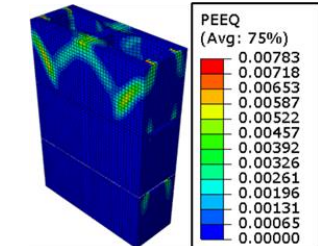
FACE



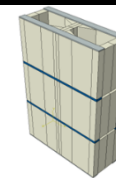
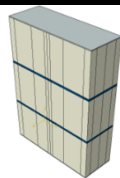
FULL



FACE



- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)



Mortero 7.50 MPa

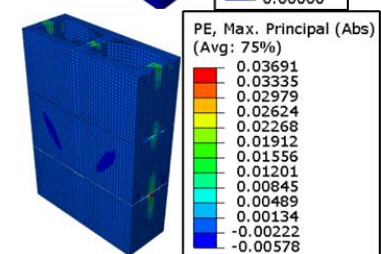
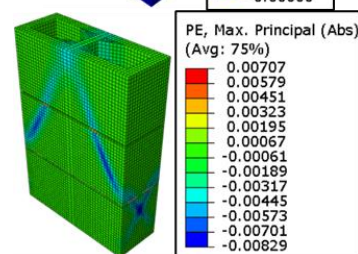
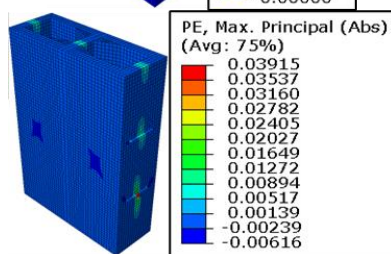
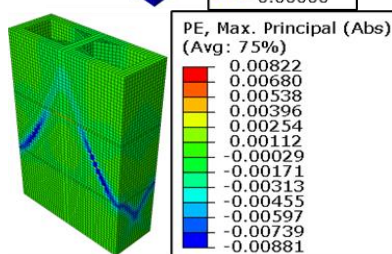
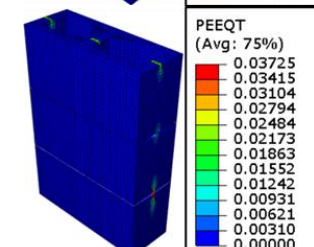
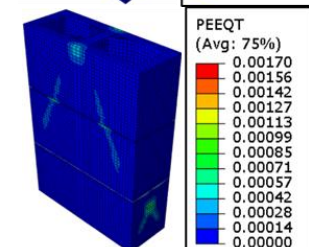
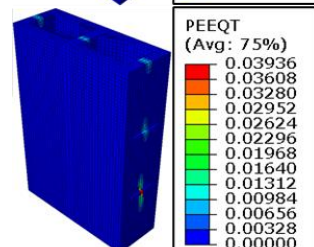
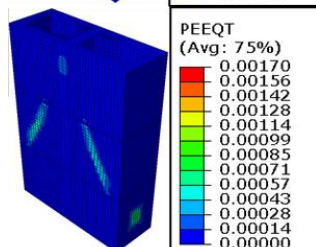
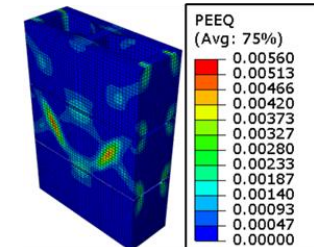
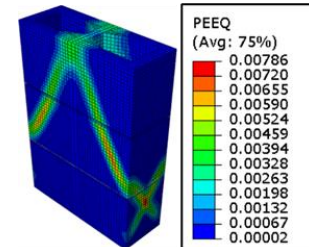
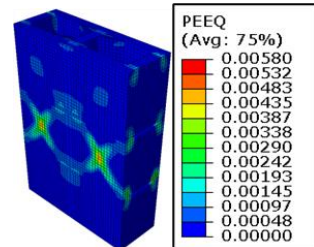
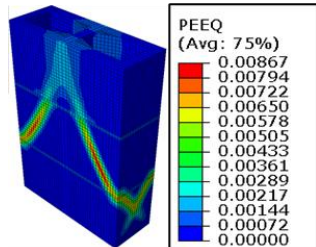
Mortero 17.09 MPa

FULL

FACE

FULL

FACE

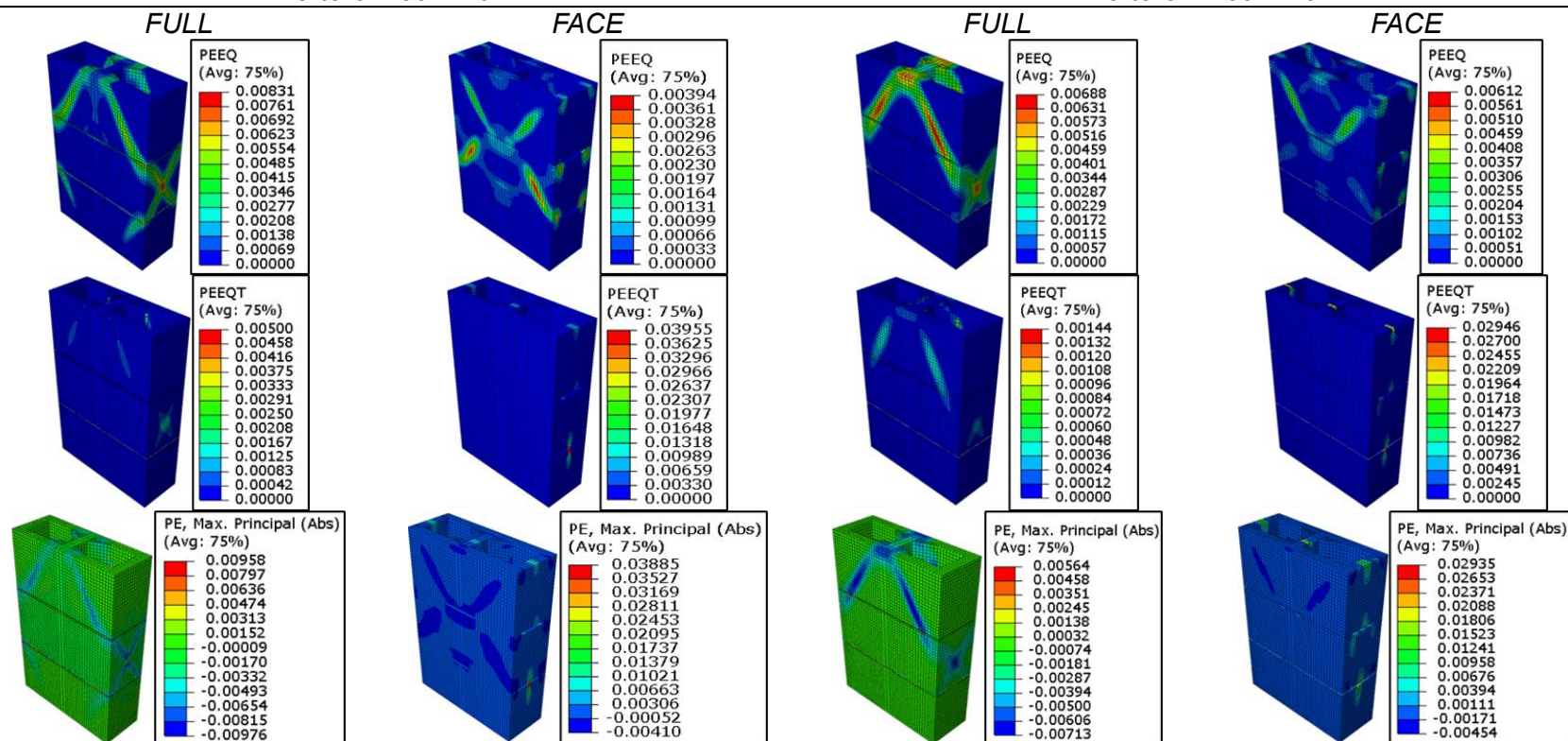


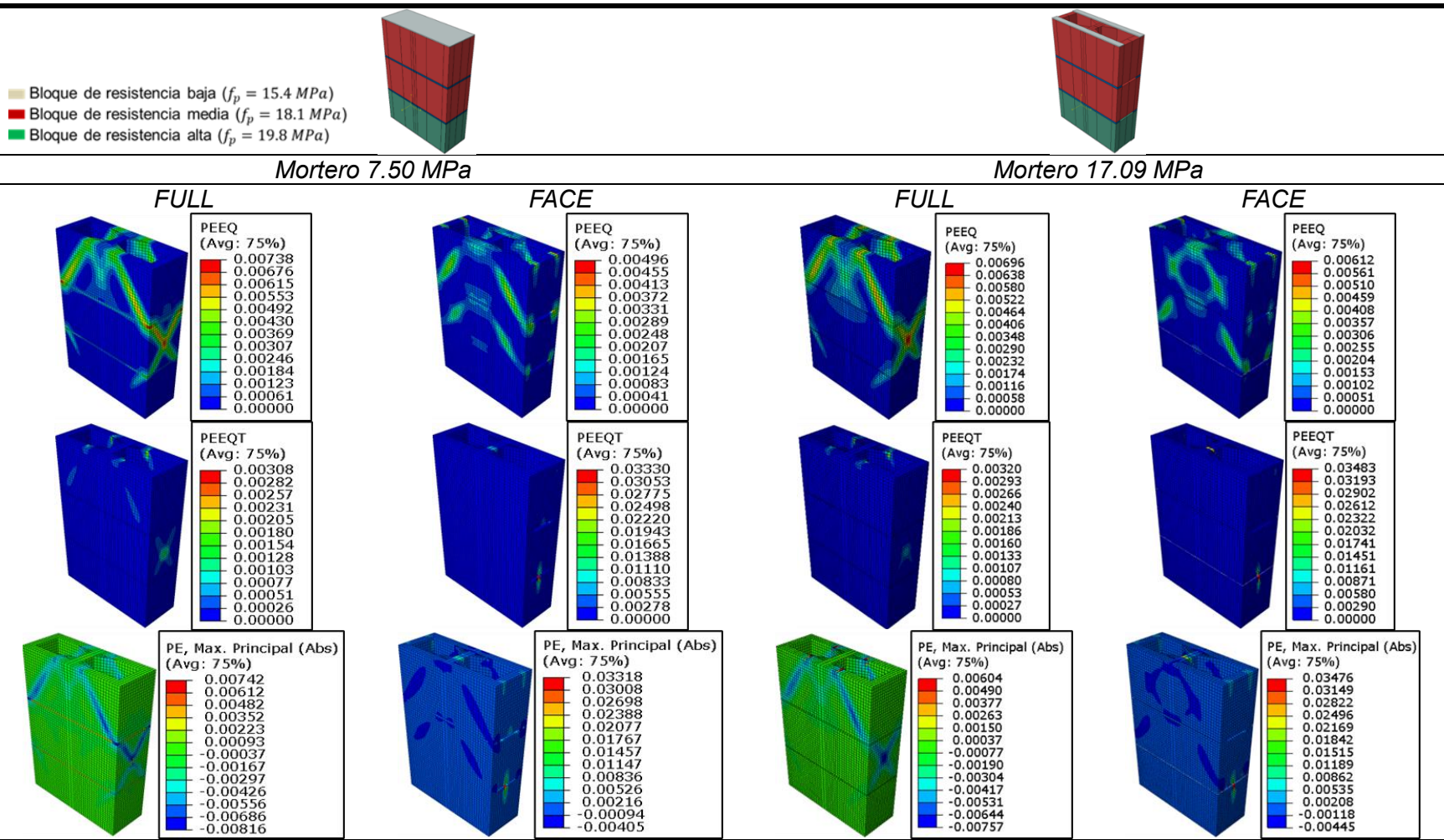
- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)

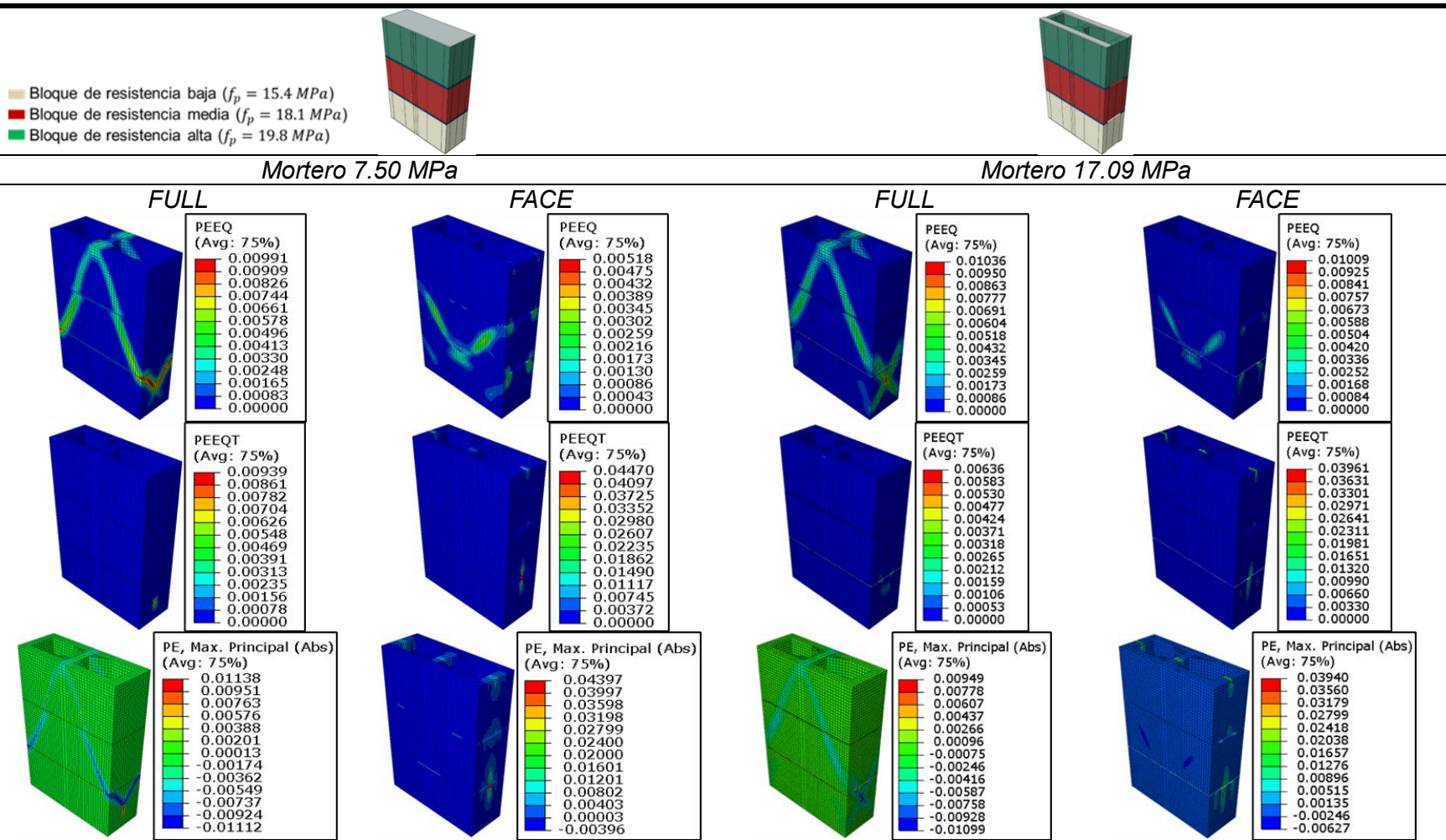


Mortero 7.50 MPa

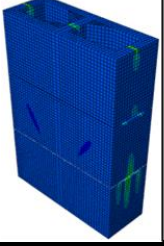
Mortero 17.09 MPa



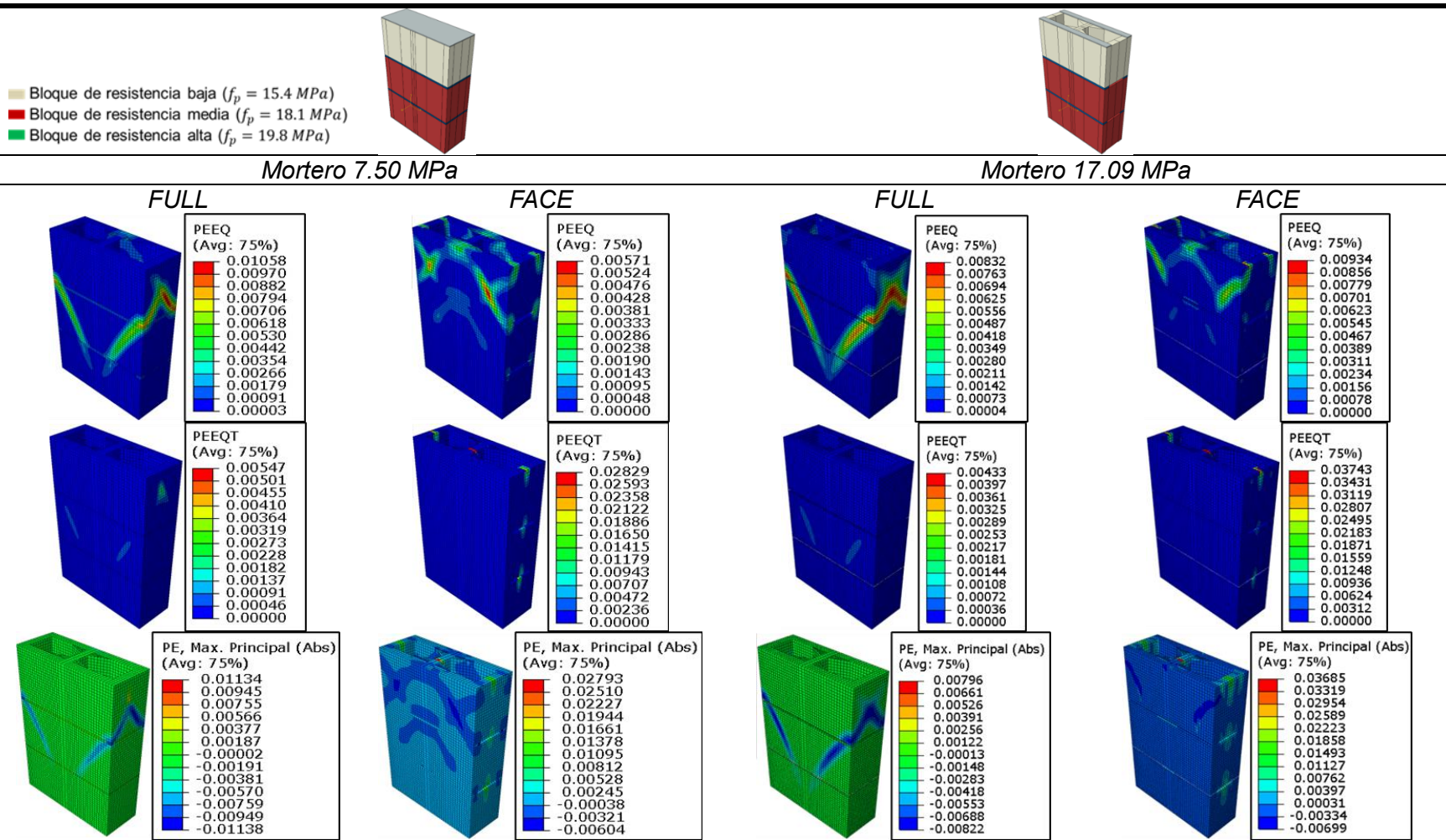




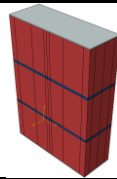
PE, Max. Principal (Abs)
(Avg: 75%)



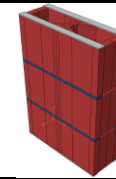
0.03940
0.03560
0.03179
0.02799
0.02418
0.02038
0.01657
0.01276
0.00896
0.00515
0.00135
-0.00246
-0.00627



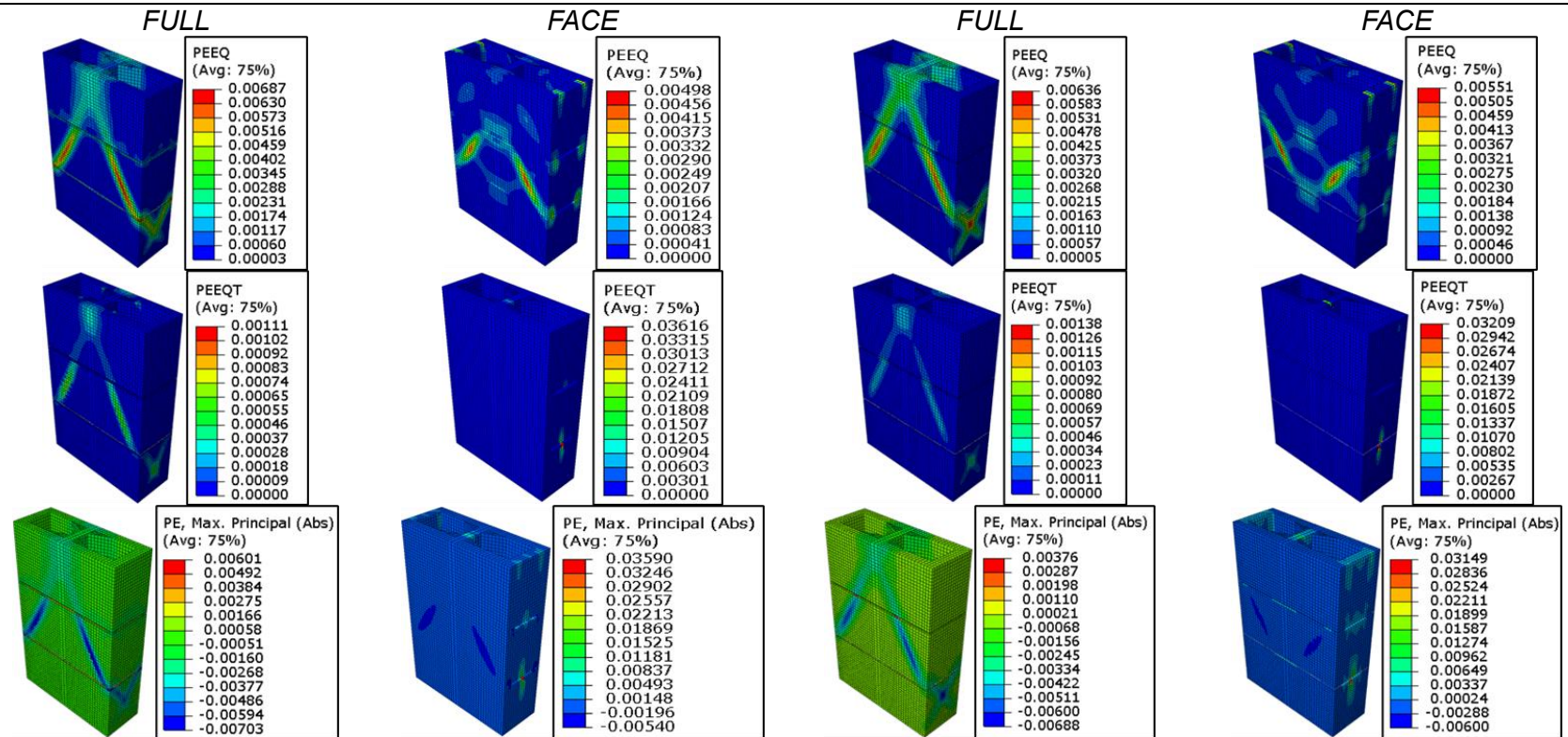
- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)



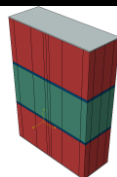
Mortero 7.50 MPa



Mortero 17.09 MPa



- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)



Mortero 7.50 MPa

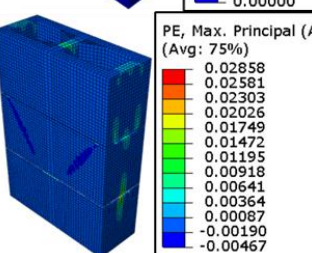
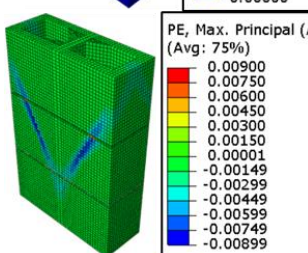
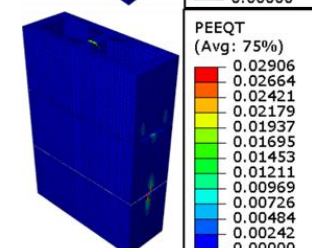
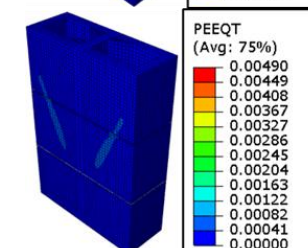
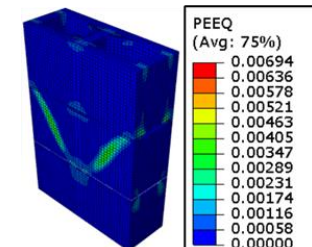
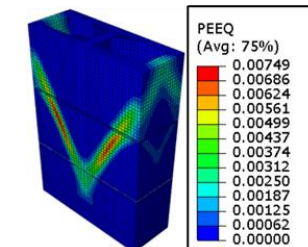
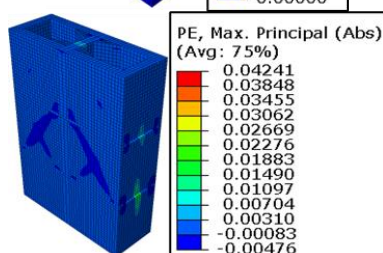
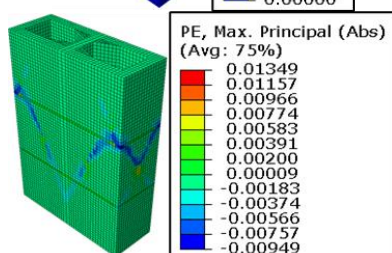
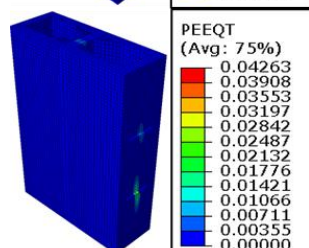
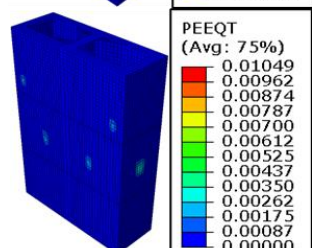
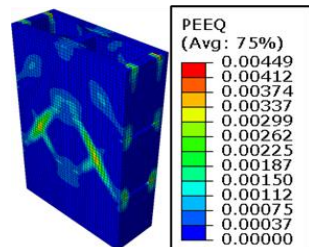
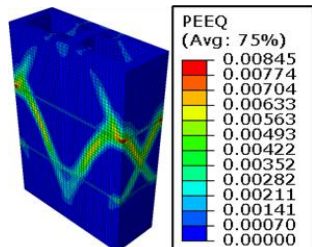
Mortero 17.09 MPa

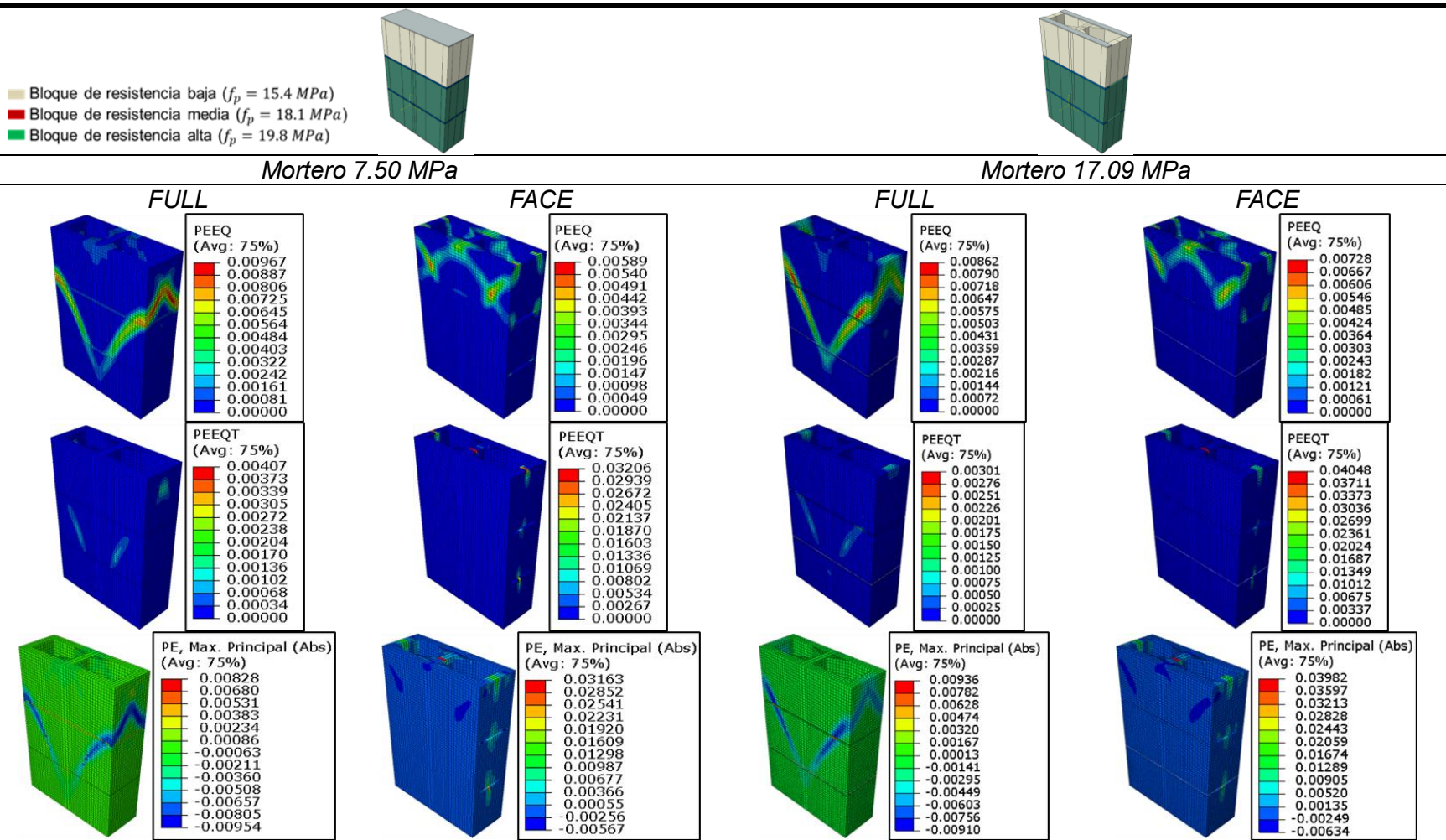
FULL

FACE

FULL

FACE

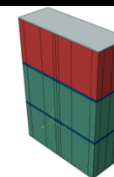




- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)

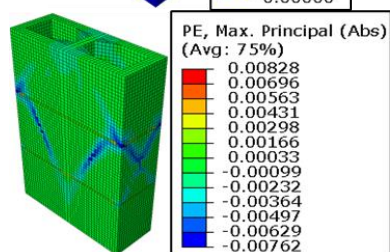
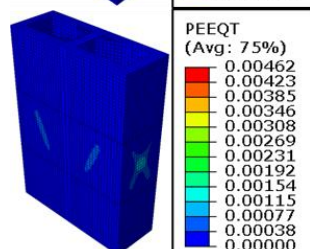
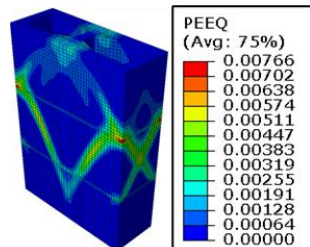


Mortero 7.50 MPa

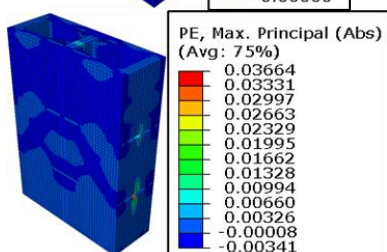
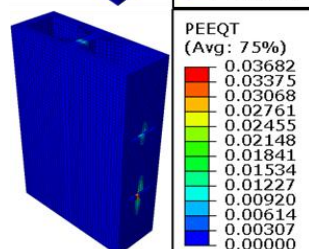
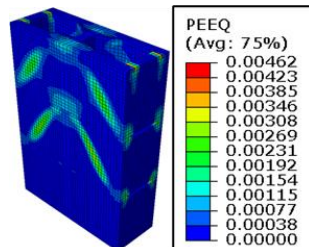


Mortero 17.09 MPa

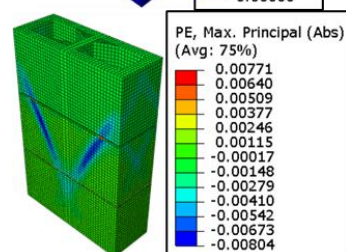
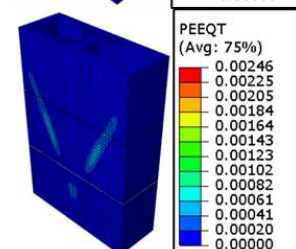
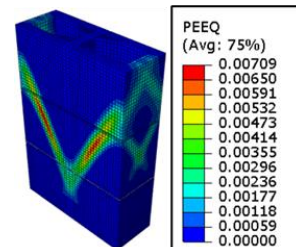
FULL



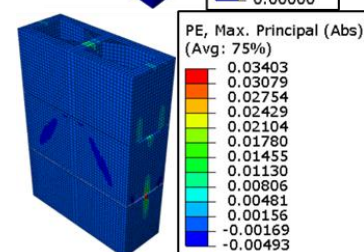
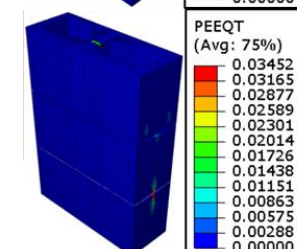
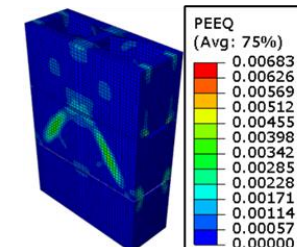
FACE



FULL



FACE



- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)



Mortero 7.50 MPa

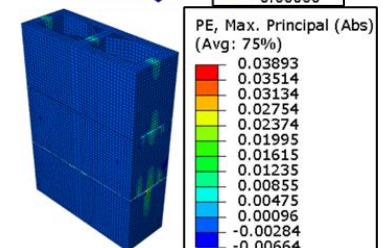
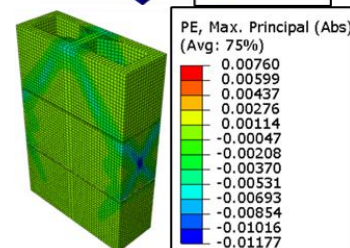
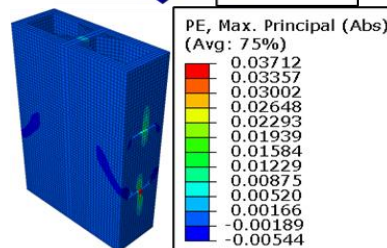
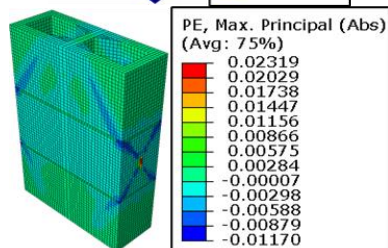
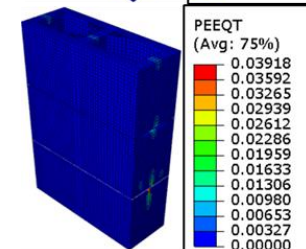
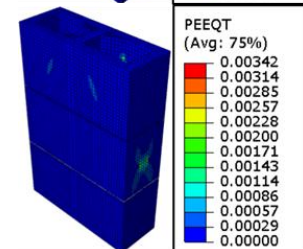
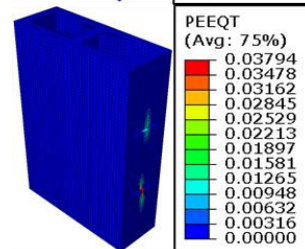
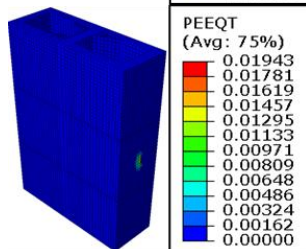
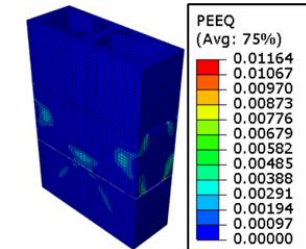
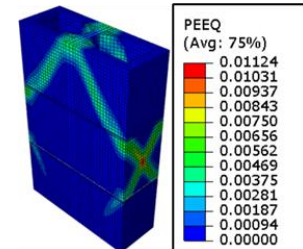
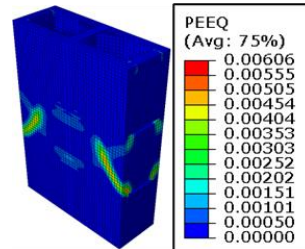
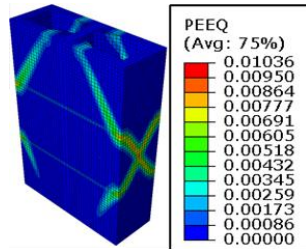
Mortero 17.09 MPa

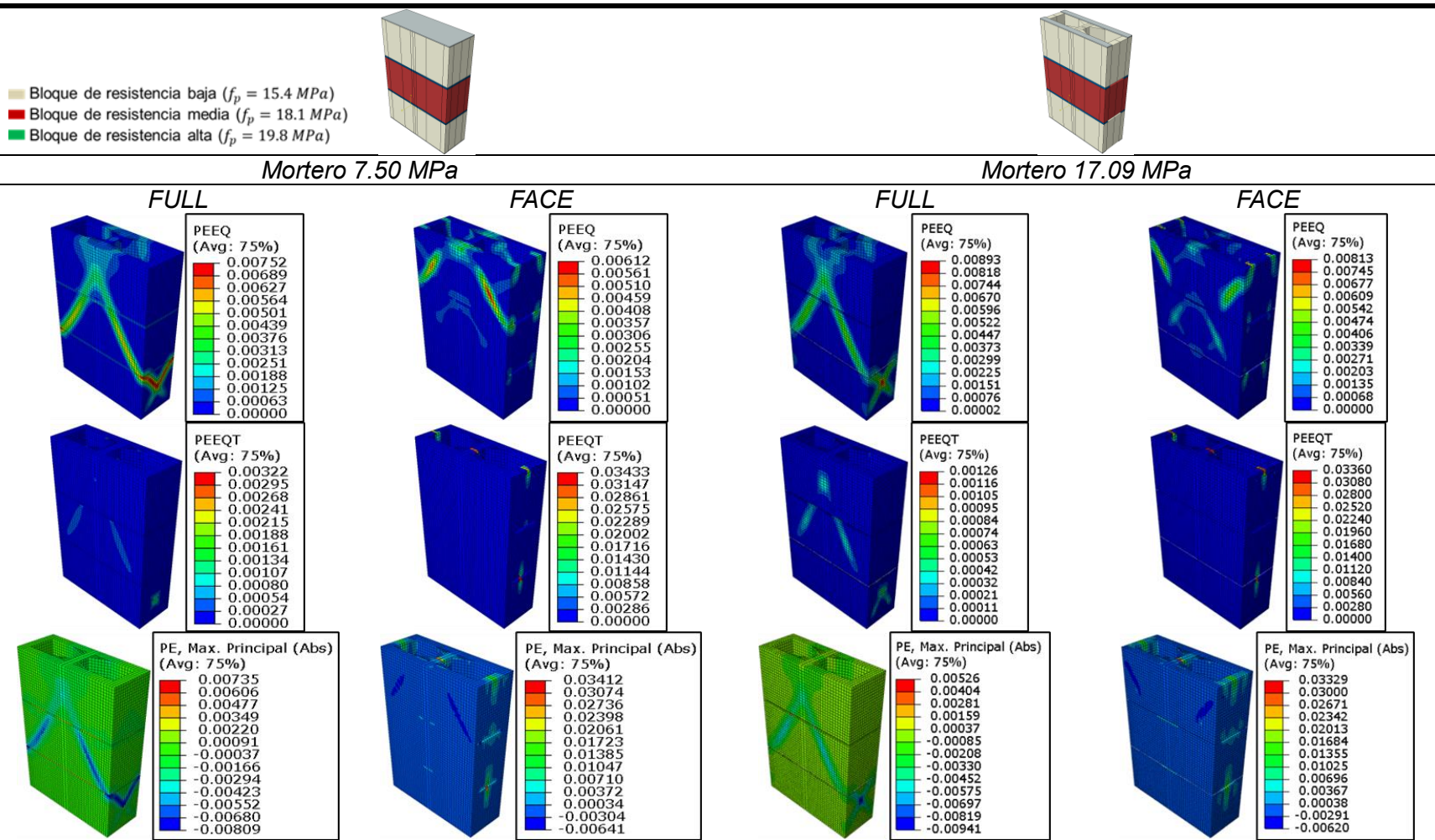
FULL

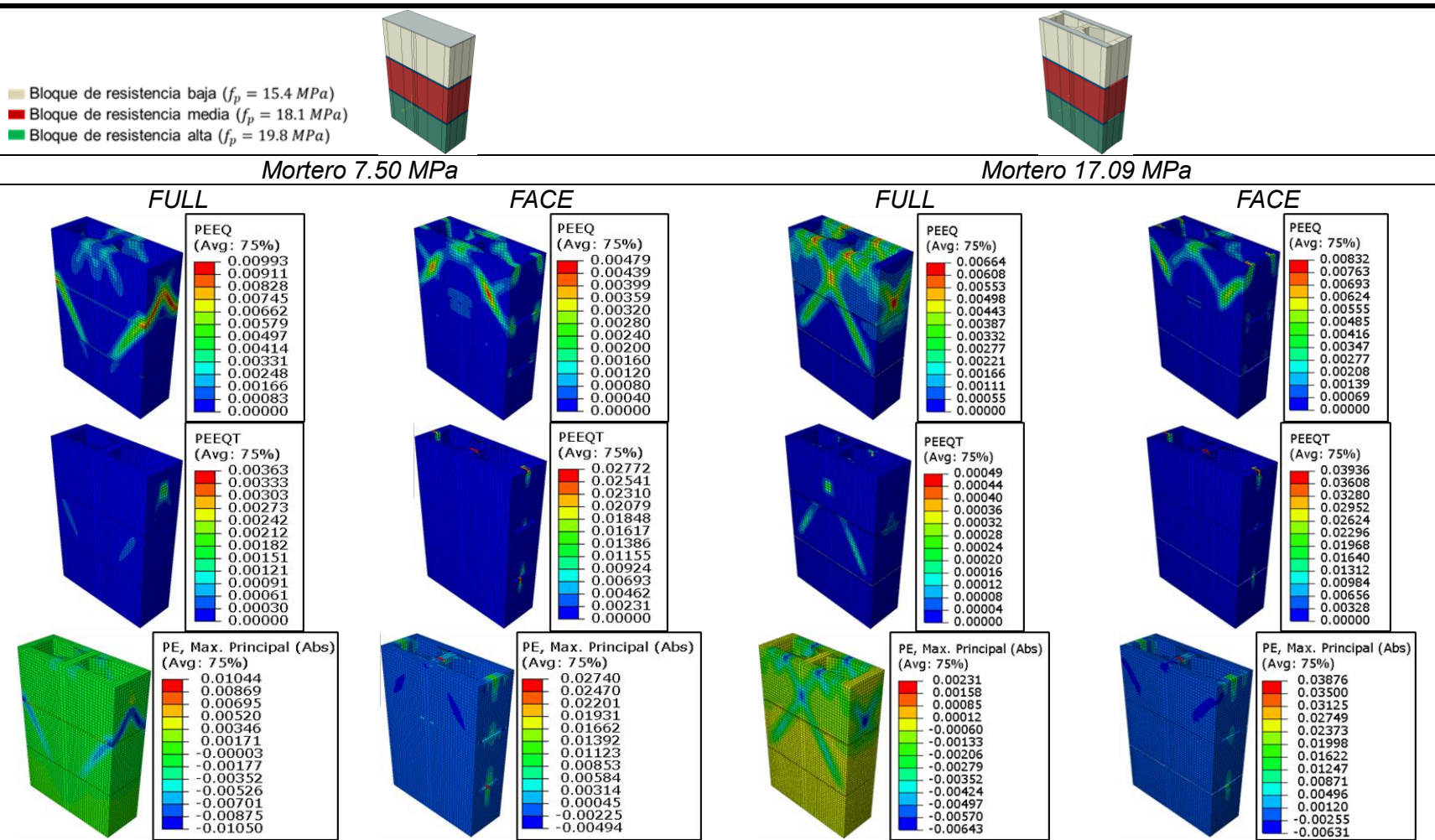
FACE

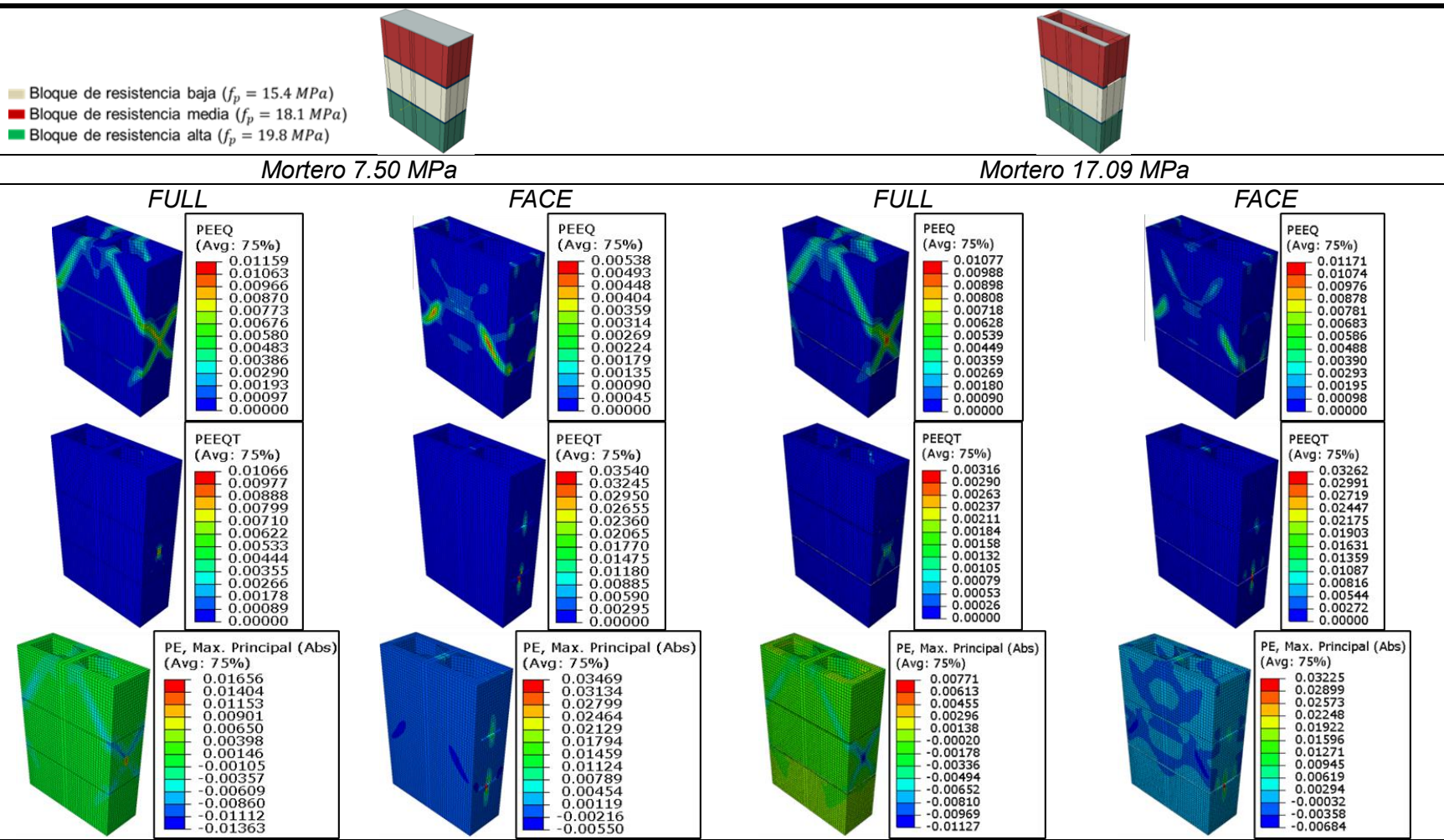
FULL

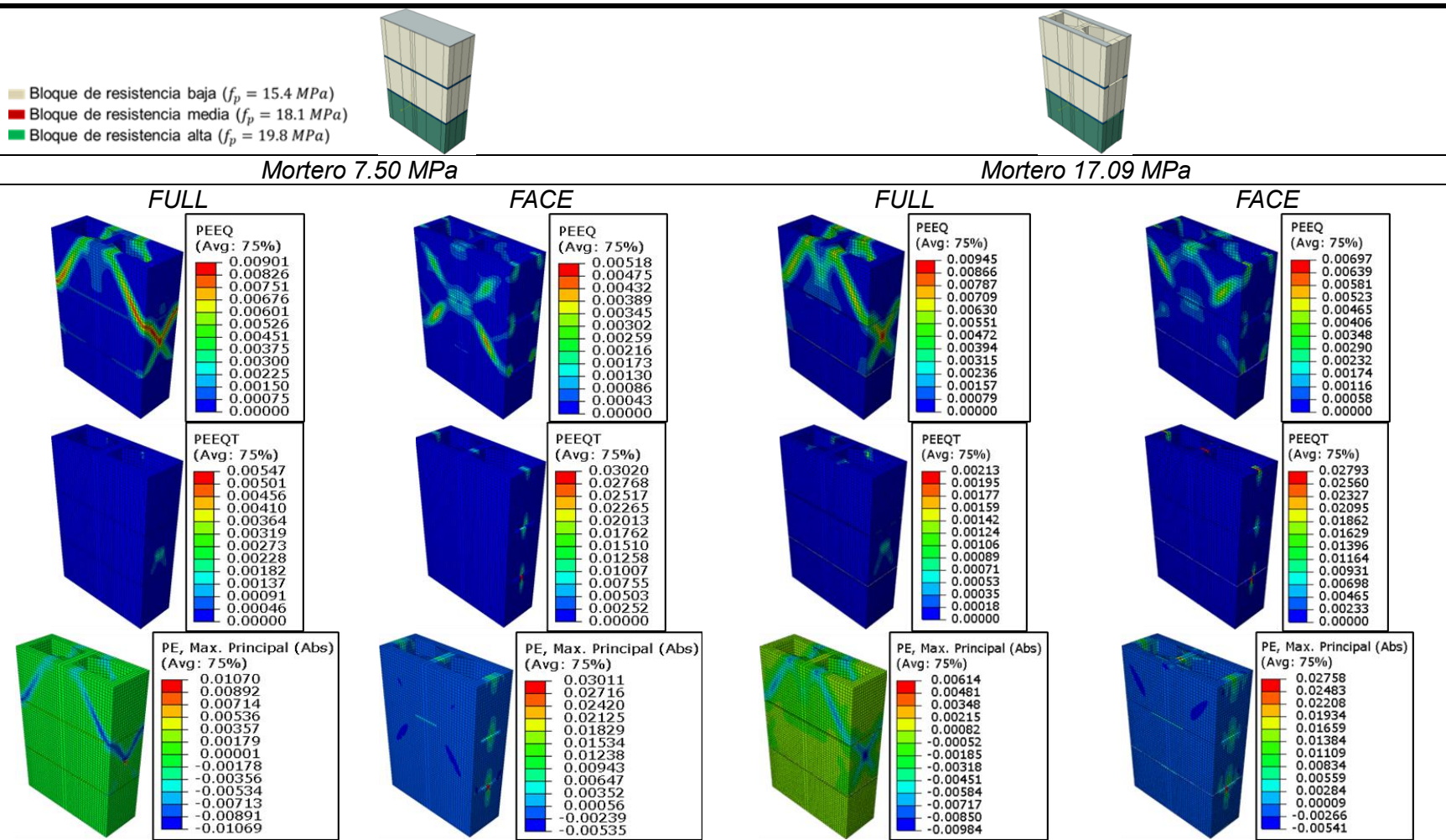
FACE



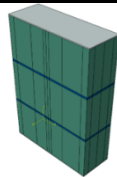




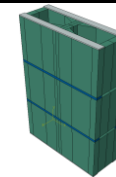




- Bloque de resistencia baja ($f_p = 15.4 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia media ($f_p = 18.1 \text{ MPa}$)
- Bloque de resistencia alta ($f_p = 19.8 \text{ MPa}$)

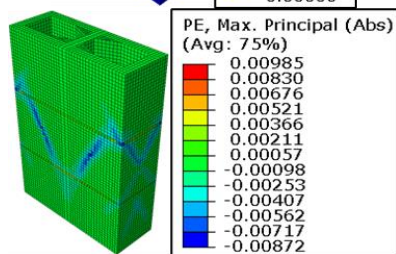
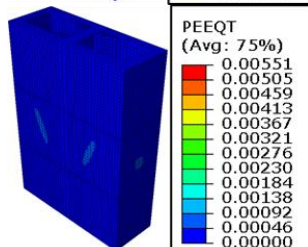
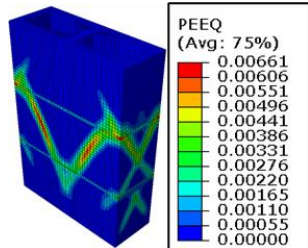


Mortero 7.50 MPa

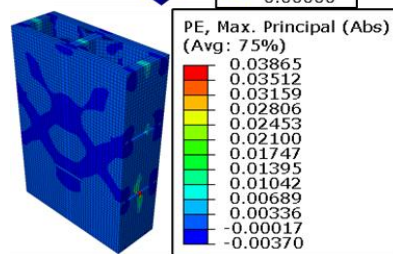
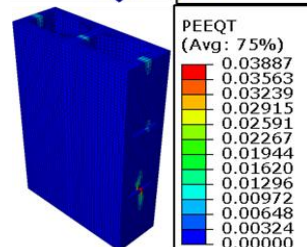
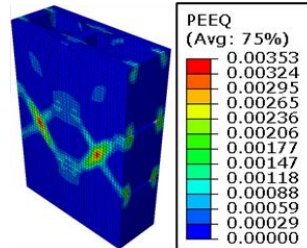


Mortero 17.09 MPa

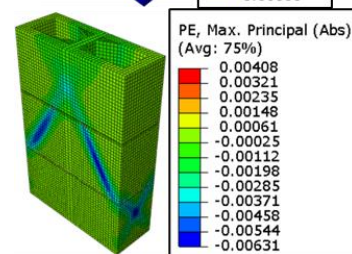
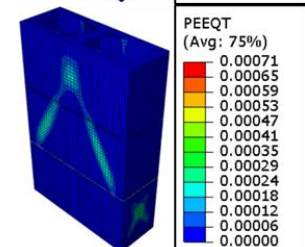
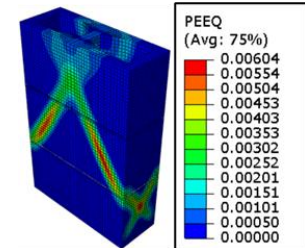
FULL



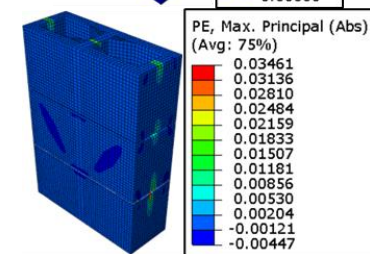
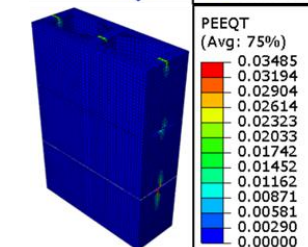
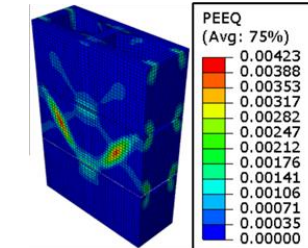
FACE

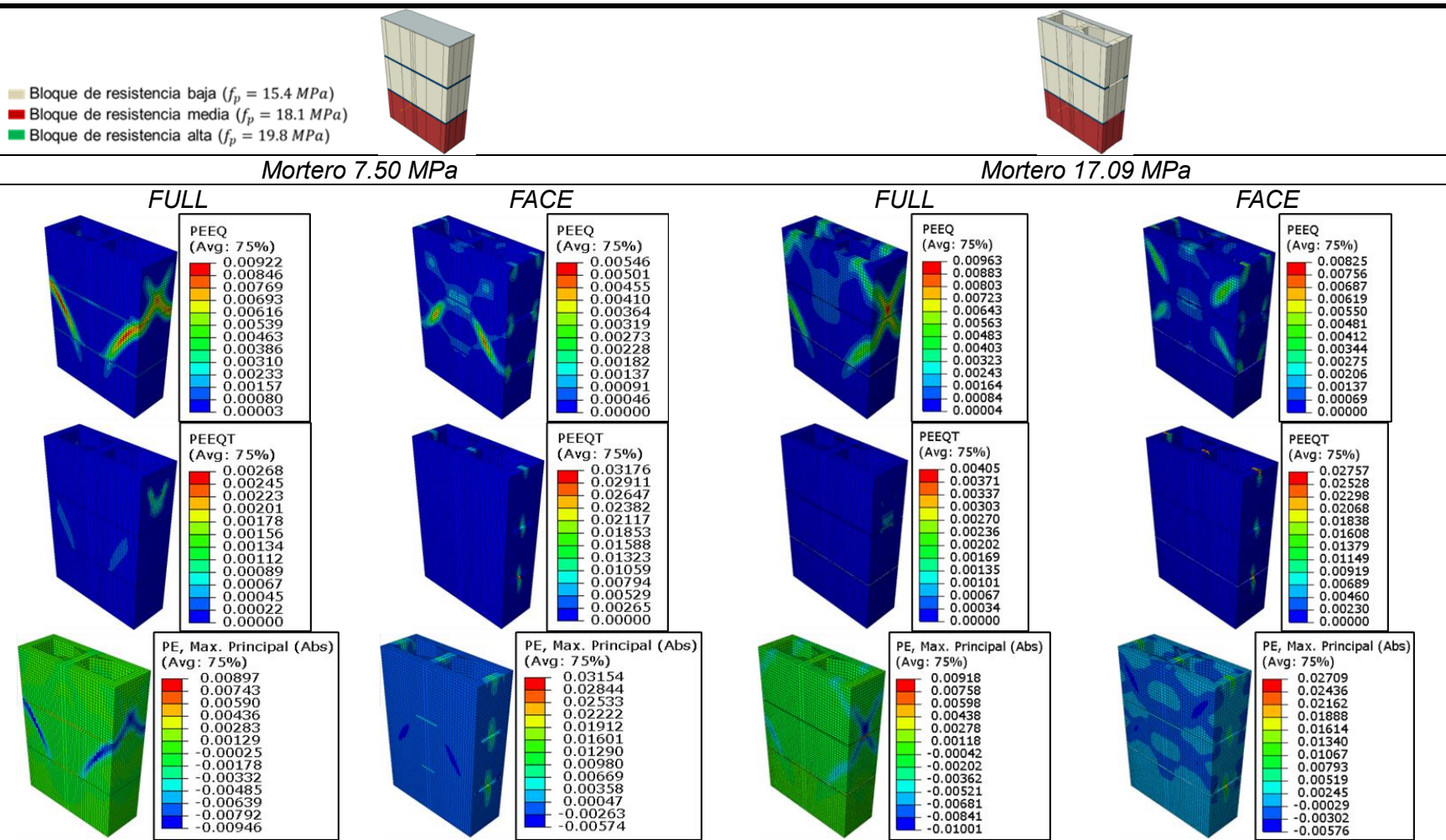


FULL



FACE

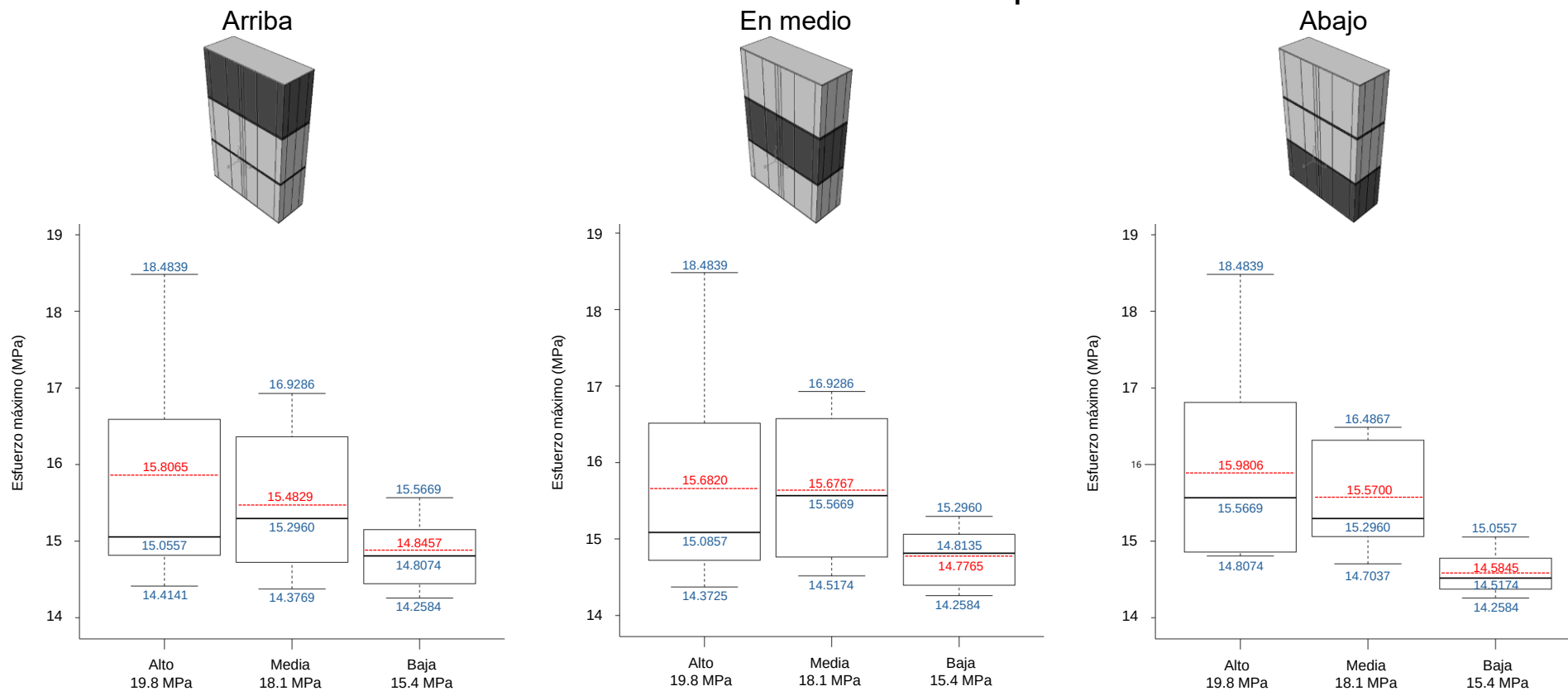




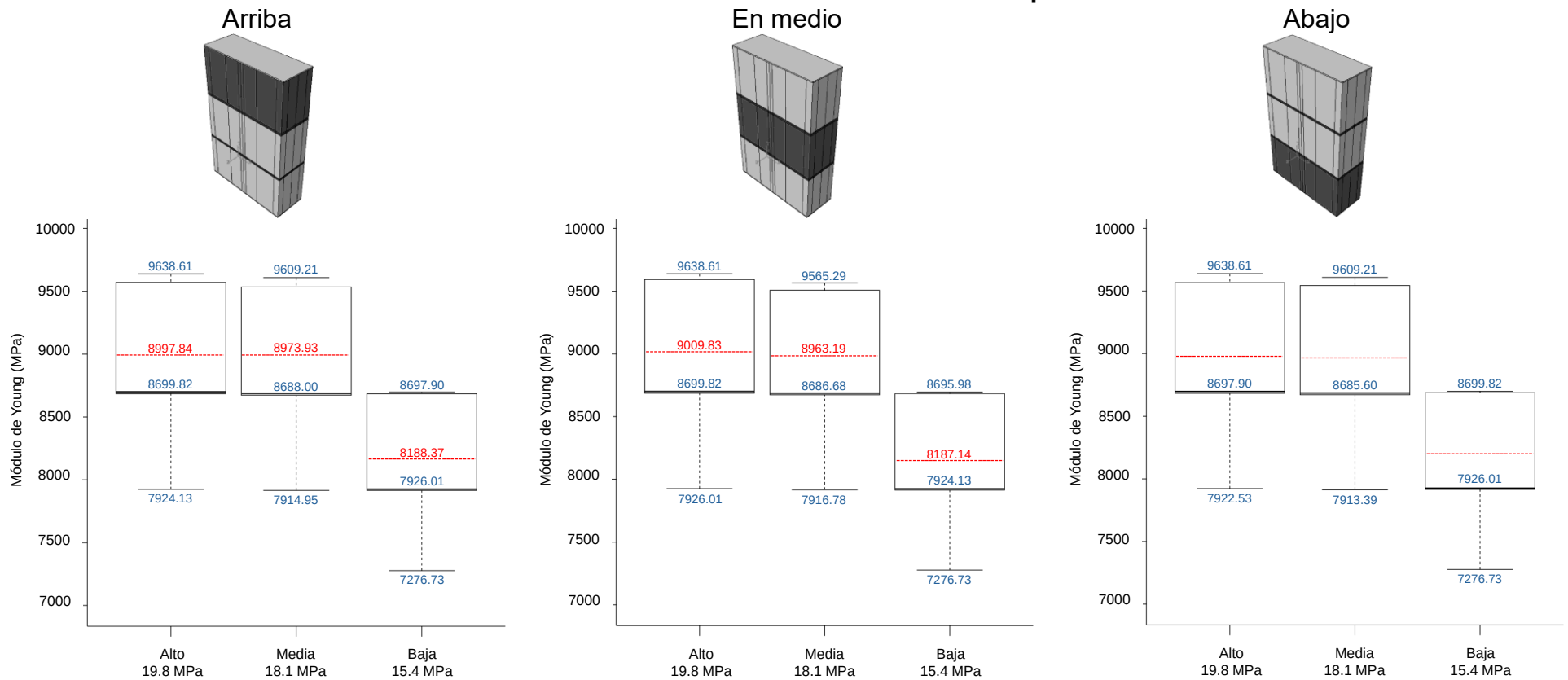
ANEXO B. Influencia de la posición de los bloques en el prisma

Pilas con mortero de 17.09 MPa (*full*)

Esfuerzo máximo vs Posición del bloque

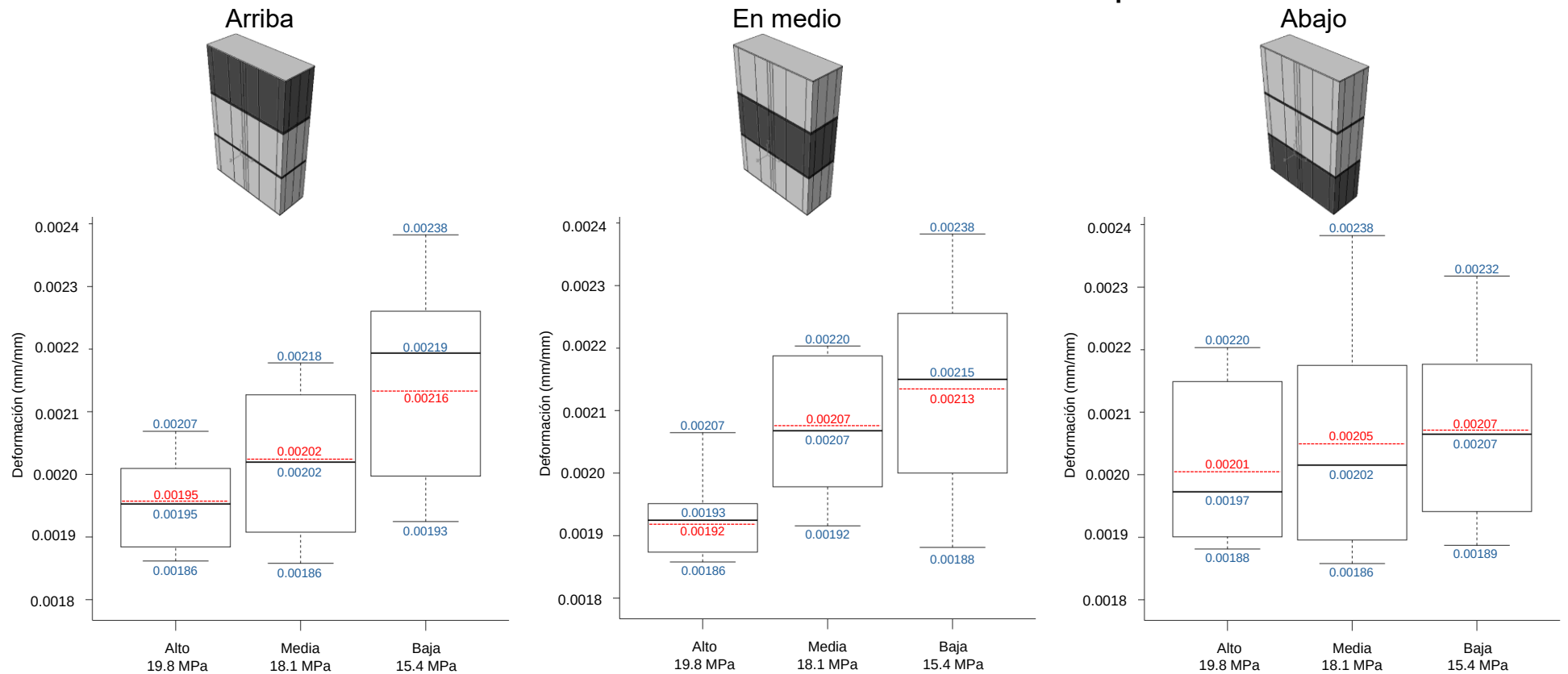


Pilas con mortero de 17.09 MPa (*full*)
Modulo de elasticidad vs Posición del bloque

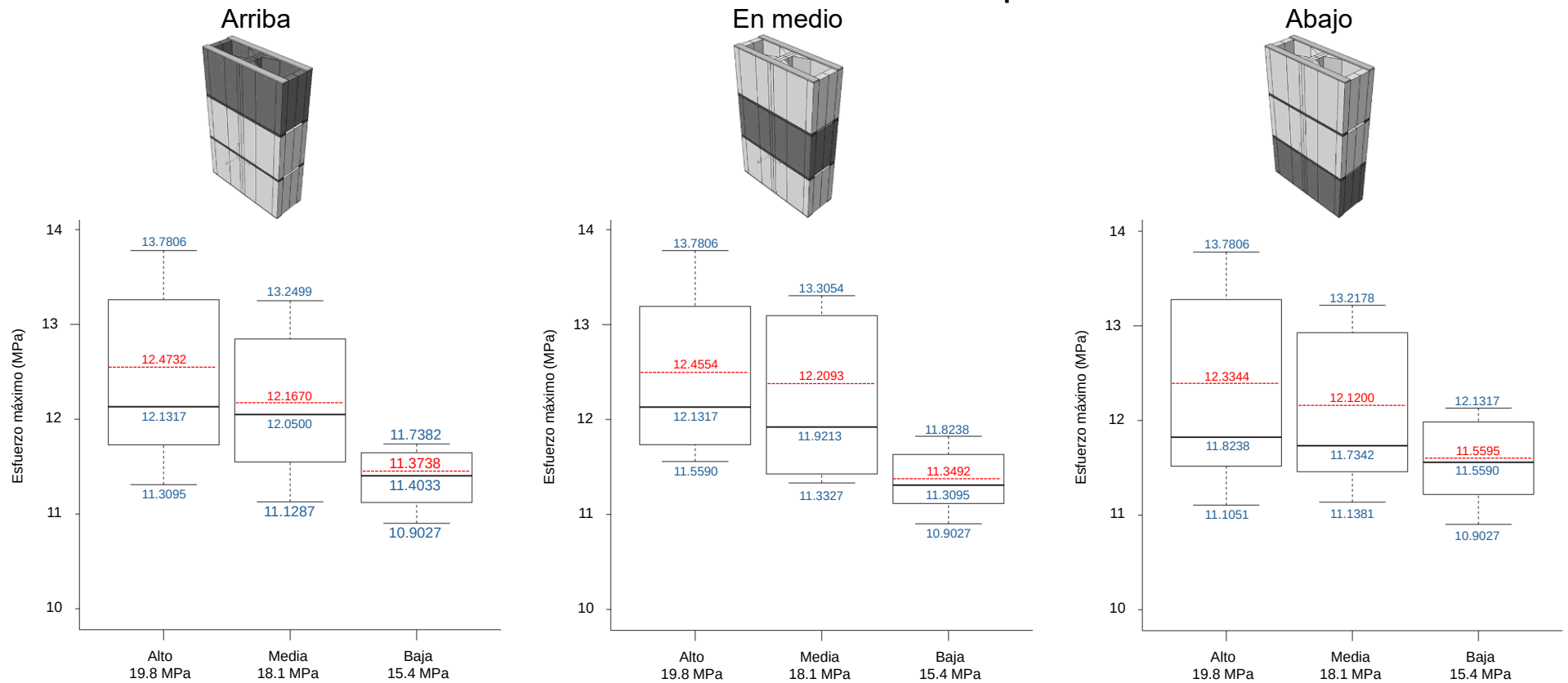


Pilas con mortero de 17.09 MPa (*full*)

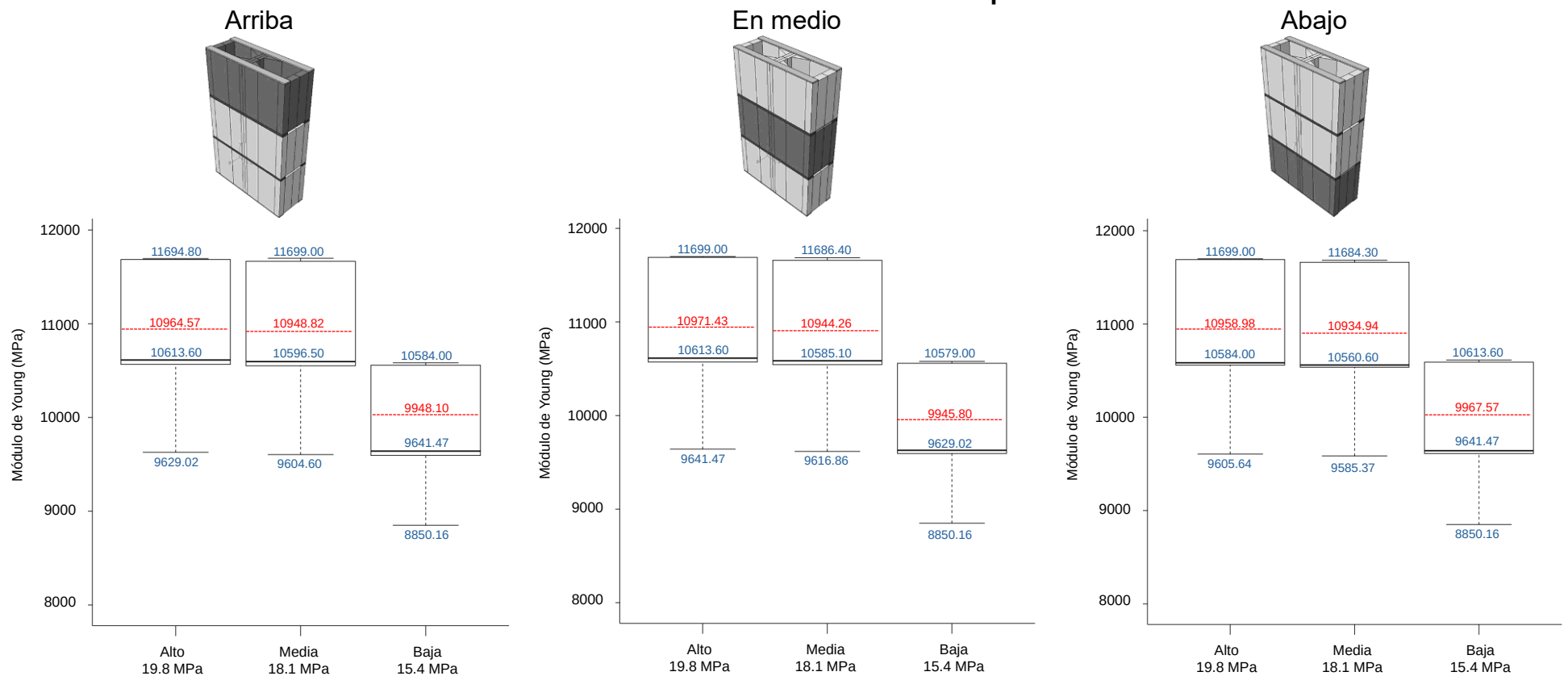
Deformación en el Esfuerzo máximo vs Posición del bloque



Pilas con mortero de 17.09 MPa (face)
Esfuerzo máximo vs Posición del bloque



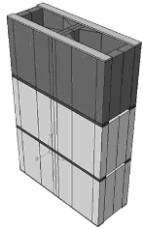
Pilas con mortero de 17.09 MPa (face)
Módulo elástico vs Posición del bloque



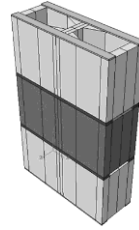
Pilas con mortero de 17.09 MPa (face)

Deformación en el Esfuerzo máximo vs Posición del bloque

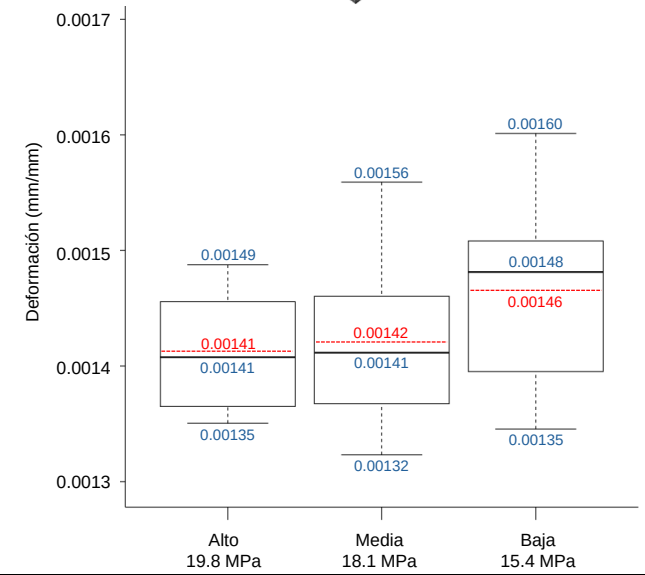
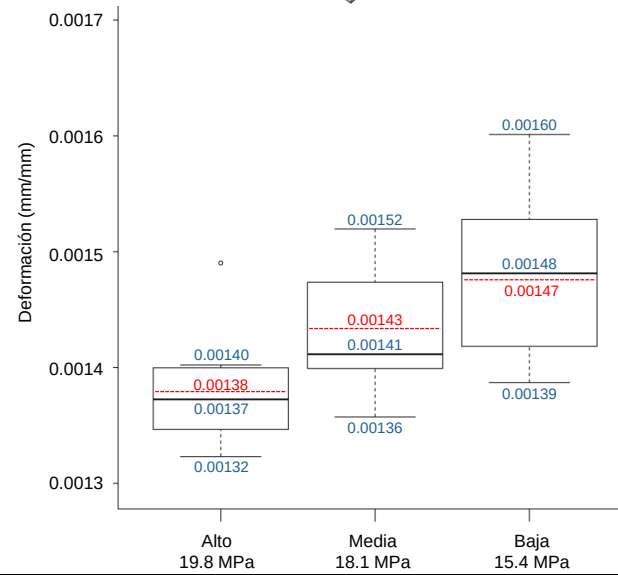
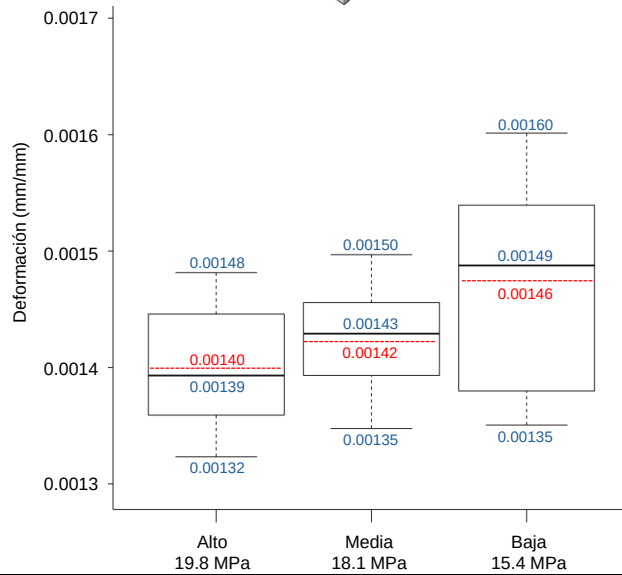
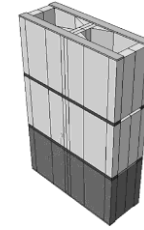
Arriba



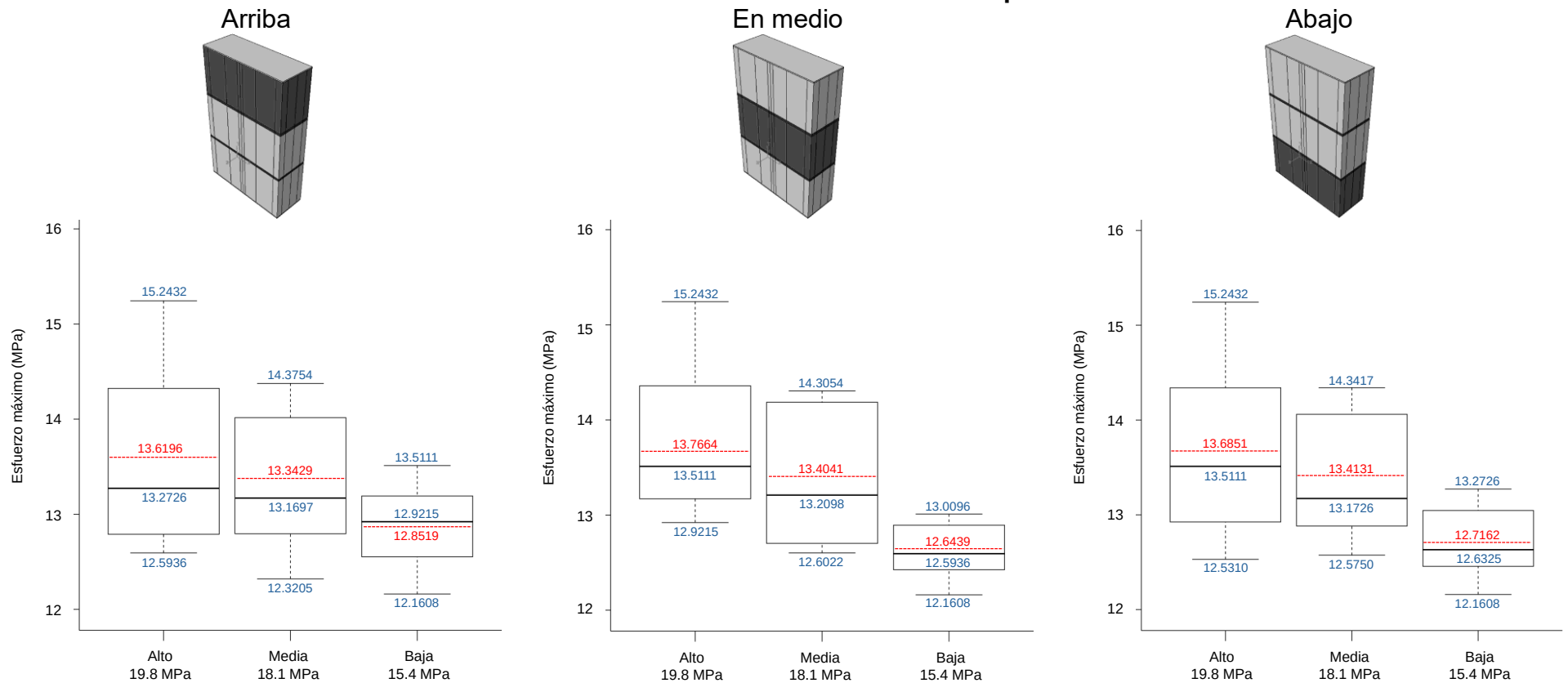
En medio



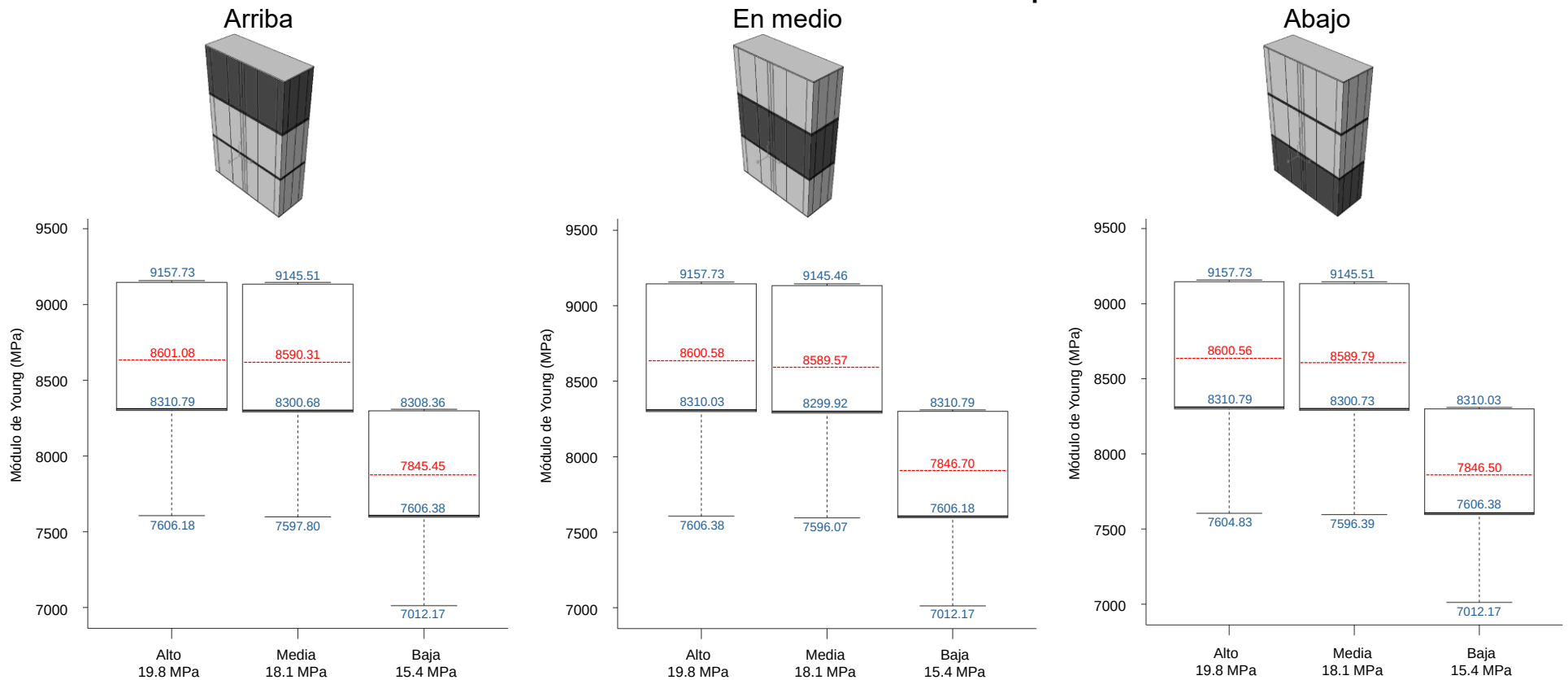
Abajo



Pilas con mortero de 7.50 MPa (*full*)
Esfuerzo máximo vs Posición del bloque



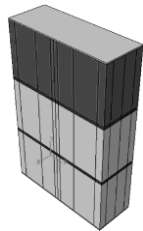
Pilas con mortero de 7.50 MPa (*full*)
Módulo de elasticidad vs Posición del bloque



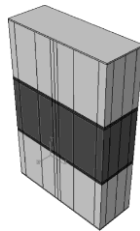
Pilas con mortero de 7.50 MPa (*full*)

Deformación en el Esfuerzo máximo vs Posición del bloque

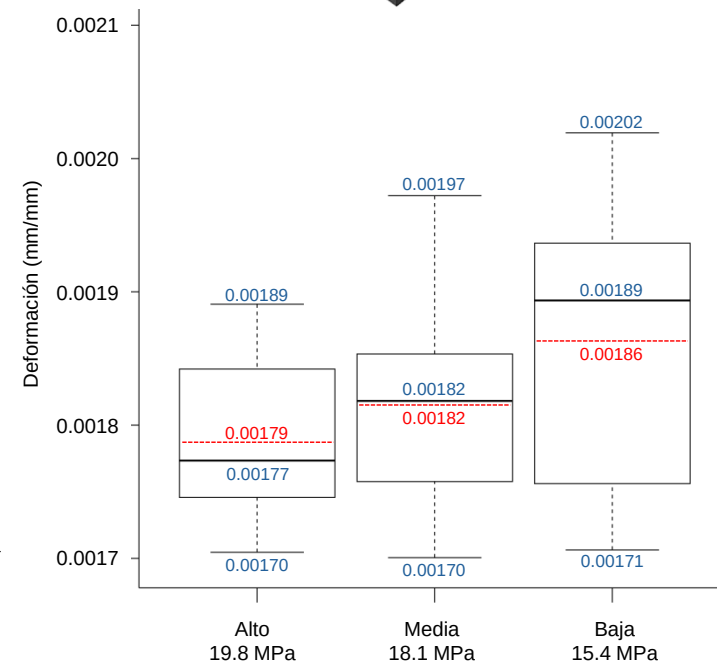
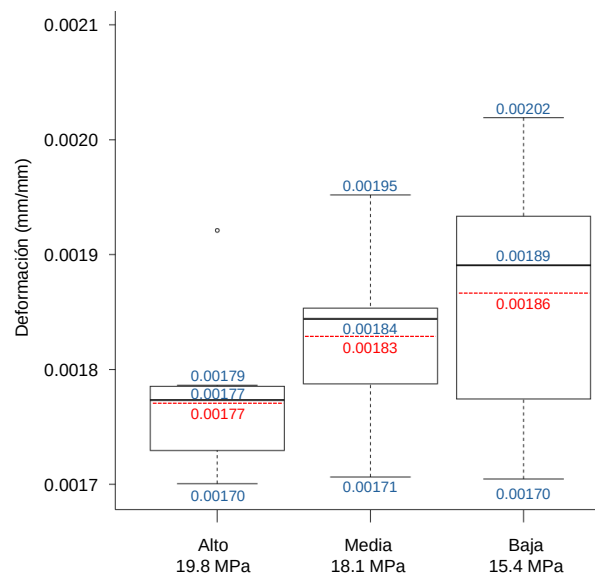
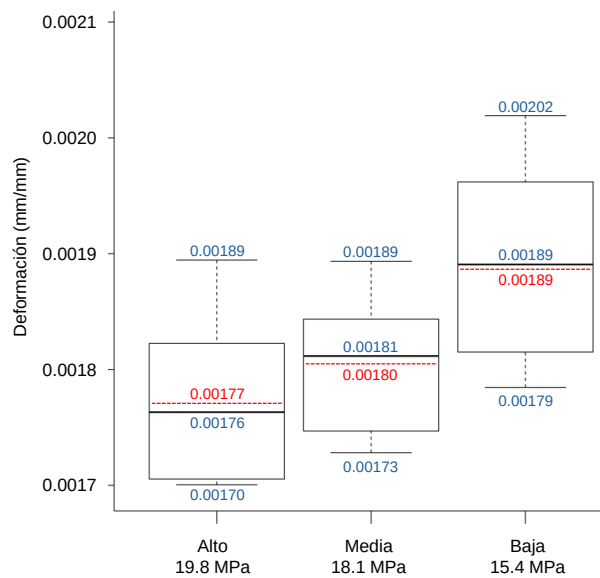
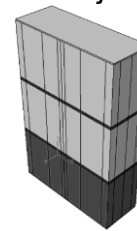
Arriba



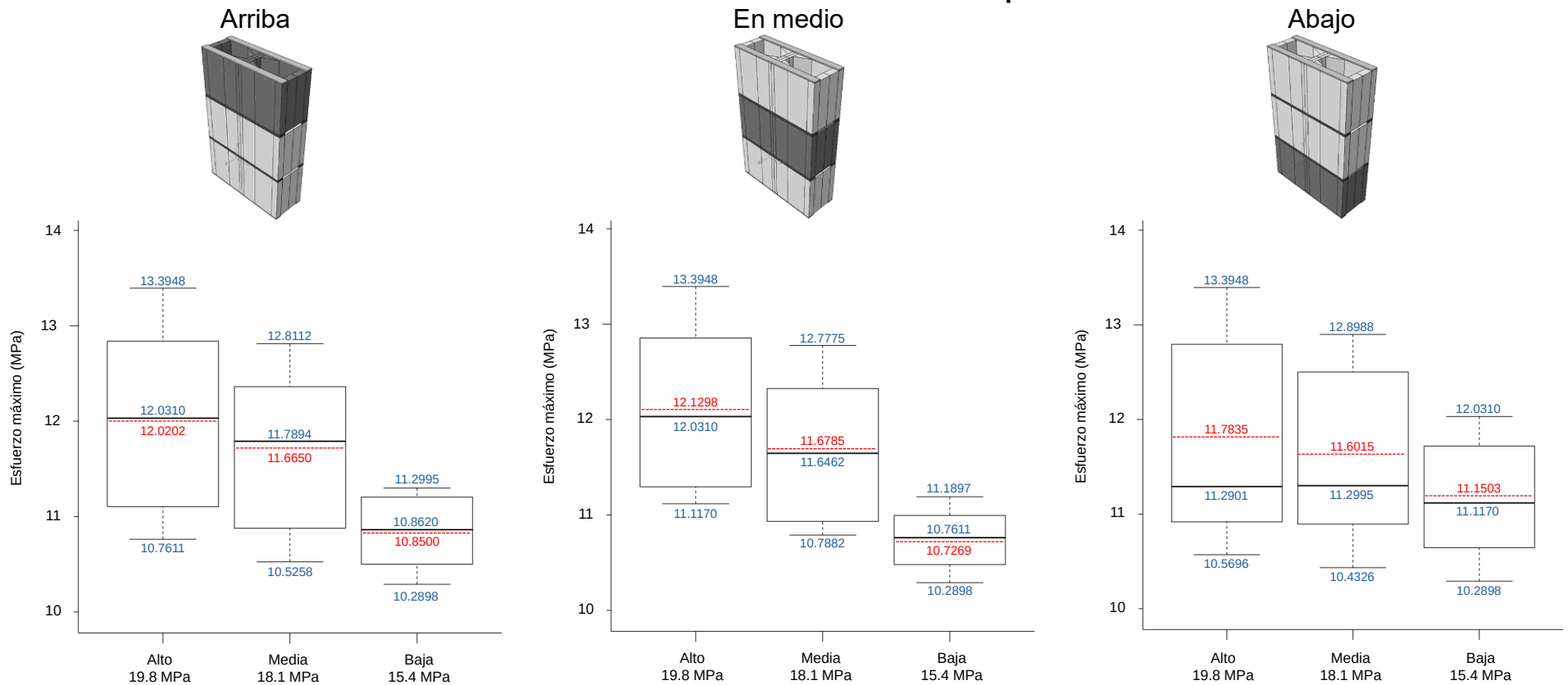
En medio



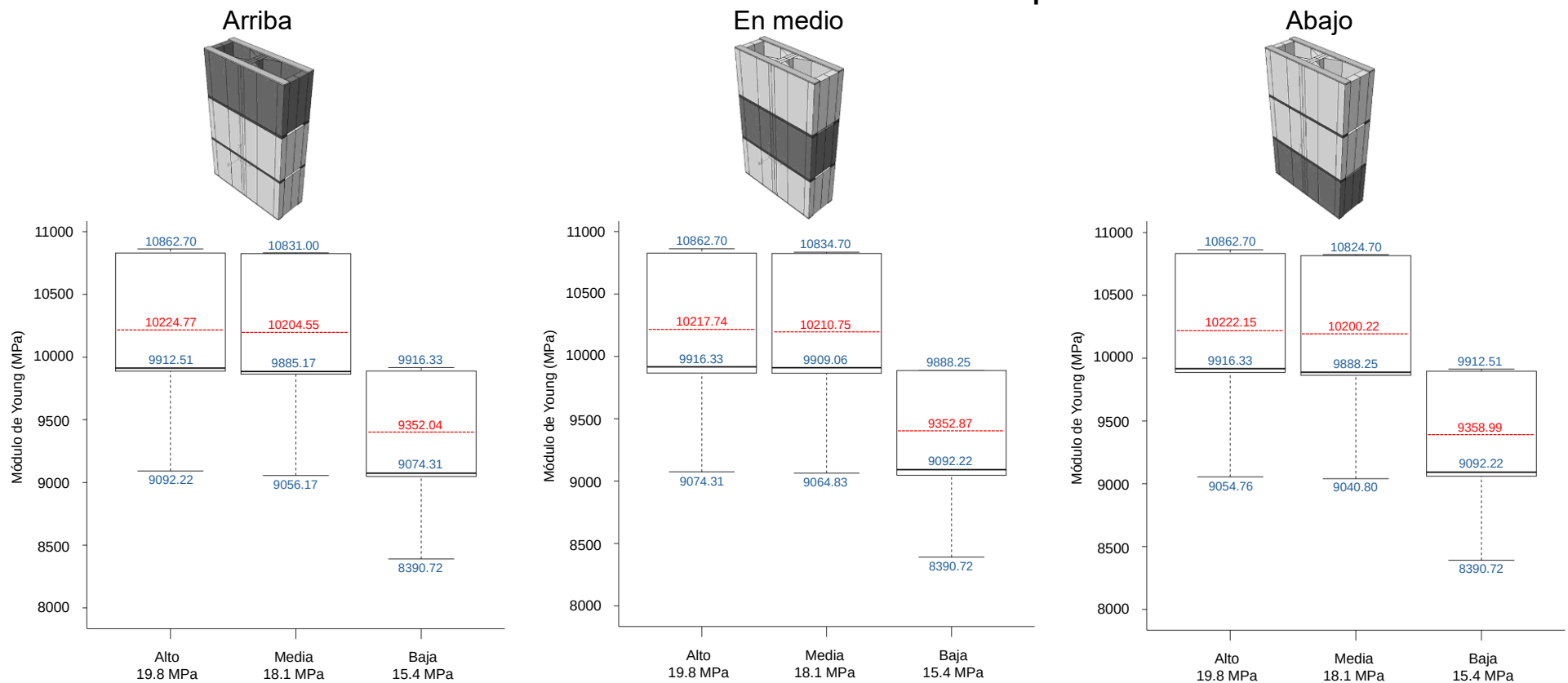
Abajo



Pilas con mortero de 7.50 MPa (face)
Esfuerzo máximo vs Posición del bloque



Pilas con mortero de 7.50 MPa (face)
Módulo de elasticidad vs Posición del bloque



Pilas con mortero de 7.50 MPa (face)

Deformación en el Esfuerzo máximo vs Posición del bloque

