

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE VIGAS POSTESADAS DE BLOQUES DE HORMIGÓN

Ruiz, Alvaro Ismael; Nallim, Liz Graciela; Oller, Sergio Horacio
Ingeniero Civil, Dra. en Ingeniería, Dr. Ingeniero de Caminos
CONICET. ICMASA, Facultad de Ingeniería, UNSa.
ismaelair25@gmail.com

RESUMEN

El postesado de estructuras es una tecnología de creciente aplicación en la construcción, tanto en obras nuevas como en la rehabilitación de obras existentes. En particular, las vigas postesadas conformadas por bloques de hormigón son elementos estructurales que buscan ser una alternativa a las tradicionales vigas de hormigón armado, tanto por sus condiciones de fabricación como por el buen comportamiento mecánico observado en determinaciones experimentales. Por esta razón, en este trabajo se desarrolla un modelo numérico, basado en el Método de los Elementos Finitos, que permite analizar el comportamiento estructural de vigas postesadas de bloques de hormigón sometidas a cargas cuasi-estáticas. La herramienta desarrollada utiliza la teoría de mezcla serie-paralelo, como gestora de los modelos constitutivos de los materiales componentes: hormigón y acero de tesado. Para el hormigón se utiliza un modelo de daño continuo isótropo, mientras que para el material acero, se emplea un modelo de plasticidad clásica con una variable de endurecimiento plástico. El tesado del acero en el compuesto es introducido como una deformación impuesta en el material a nivel constitutivo, mientras que la carga externa es introducida como un desplazamiento impuesto. La estimación de la carga última a partir del modelo desarrollado resulta satisfactoria en relación a los resultados experimentales analizados.

ABSTRACT

Post-tensioning of structures is a technology with growing application in construction, both in new projects and in the rehabilitation of existing ones. Particularly, post-tensioned beams formed by concrete blocks are structural elements aimed at being an alternative to traditional reinforced concrete beams, both due to their manufacturing conditions and the good mechanical behavior observed in experimental determinations. For this reason, this work develops a numerical model, based on the Finite Element Method, which allows analyzing the structural behavior of post-tensioned beams made of concrete blocks subjected to quasi-static loads.

Organiza:



The developed tool uses the series-parallel mixture theory as the manager of the constitutive models of the component materials: concrete and prestressing steel. For concrete, an isotropic continuous damage model is used, while for steel, a classical plasticity model with a plastic hardening variable is employed. The prestressing of the steel in the composite is introduced as an imposed deformation in the material at the constitutive level, while the external load is introduced as an imposed displacement. The estimation of the ultimate load from the developed model is satisfactory in relation to the analyzed experimental results.

Organiza:



Tel/Fax: [+54] 11 5252.8838 | Whatsapp: [+54 9] 11 3180.3746 | Hipólito Yrigoyen 1144 Piso 1° - Of. 2 | Buenos Aires
Horario de atención: de lunes a viernes de 13:00 a 18:00 hs. | Mail: info@jornadasaie.org.ar - www.jornadasaie.org.ar

INTRODUCCIÓN

La mampostería se utiliza para la construcción de una variedad de estructuras tales como viviendas, comercios, oficinas y naves industriales, torres, arcos, puentes-viaductos, etc. Las principales ventajas para su empleo, desde la antigüedad hasta ahora son, en general, la disponibilidad de materia prima, su fácil y económica construcción, su belleza natural y su durabilidad.

Particularmente, la mampostería de concreto se emplea comúnmente en la construcción de elementos estructurales, tanto en edificaciones como en obras de infraestructura; en algunos casos prácticos la relación costo - beneficio de esta tipología estructural es mucho más ventajosa que en estructuras similares de concreto reforzado o acero.

La mampostería tiene una resistencia a la compresión relativamente alta, pero una baja resistencia a la tracción, lo que la hace sumamente vulnerable especialmente ante acciones dinámicas.

En la actualidad, la industria de la construcción se enfrenta a la creciente demanda de nuevos procesos de industrialización de los diversos sistemas constructivos, que permita reducir el consumo de materiales y mejorar la eficiencia de los mencionados procesos constructivos ¹. La prefabricación y el postesado son técnicas que aumentan la productividad en la construcción tanto en edificios como en obras de infraestructura, con la finalidad de reducir los costos de construcción y optimizar el tiempo de ejecución de manera razonable.

El postesado es una técnica que, mediante la inclusión de un esfuerzo inicial de compresión en los bloques permite reducir las demandas de esfuerzos de tracción al interior del elemento estructural y mejorar su comportamiento. De esta manera, la mampostería postesada se muestra como una técnica promisorio para ser implementada como tipología estructural en la construcción de obras de infraestructura.

La idea de emplear mampostería postesada no es nueva; en 1825 se utilizó un método de postesado en un proyecto de túnel bajo el río Támesis en Inglaterra ². Existen aplicaciones más recientes de mampostería postesada, tanto para refuerzo como para diseño de construcciones nuevas ^{2,3,4,5,6}.

La mayoría de los sistemas de mampostería postesada propuestos emplean *Grouting*, de manera tal que existe adherencia entre el acero activo y la mampostería. Bonett y Urrego⁷ proponen eliminar este elemento y emplear un sistema de mampostería postesada con barras de acero de alta resistencia no vinculadas. Este sistema puede ser usado para construir vigas, losas en una y dos direcciones y muros estructurales. Estos elementos estructurales están compuestos por ladrillos huecos de hormigón de resistencia normal a la compresión y barras de acero de alta resistencia. Como sistema de anclaje de extremo se emplean bloques de hormigón armado y como elemento deflector se usan bloques desviadores, a fin de mantener constante la distancia entre el centroide de los tendones y la fibra

Organiza:

extrema a compresión en los bloques de hormigón. Por otra parte, con este sistema se logra una reducción de las pérdidas y un menor impacto ambiental debido a la ausencia de grouting ⁸.

Estos sistemas de refuerzo, en combinaciones con variados tipos de mampuesto se traducen en sistemas de muros, vigas y losas que no podrían ser examinados exhaustivamente sólo a través de métodos experimentales. En este sentido el empleo de métodos numéricos, en particular la modelización con elementos finitos es aceptada y se encuentra muy difundida en diversos estándares de diseño.

Al ser la mampostería un material que presenta direccionalidad en sus propiedades, debido a que las juntas del mortero actúan como planos de debilidad en el material, es necesario considerar la anisotropía inherente a su comportamiento macromecánico y topológico. En general, la aproximación hacia una modelización numérica puede ser enfocada con micromodelos, los cuales discretizan de forma detallada y separada ladrillos y juntas. Por otra parte, existe la posibilidad de hacer un tratamiento como macromodelo donde se trata a la mampostería como un material compuesto.

El enfoque o alternativa elegida para resolver el problema depende de cuán detallado sea el modelo y, como consecuencia de ello, si el mismo es capaz de describir con exactitud diferentes tipos de fallas^{9,10}.

En el caso de las vigas de mampostería postesada se busca, no sólo una correcta descripción en término de cargas y desplazamientos, sino también una buena aproximación de los patrones de falla observados en los ensayos.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo numérico que permita describir el comportamiento a flexión de vigas de bloques de hormigón postesadas.

No obstante, a pesar de que la mampostería representa uno de los materiales más antiguos, la simulación numérica usada para evaluar su comportamiento ante diferentes tipos de esfuerzos, tanto en el plano como fuera de éste es aún un tema de estudio que presenta complejidades que requieren análisis específicos. Esto debido, no sólo a la no linealidad de sus materiales constituyentes sino también a sus complejas interacciones¹¹⁻¹³. Particularmente, para el caso de la mampostería postesada con elementos no adheridos y sin mortero de relleno, son aún más escasos los desarrollos a nivel numérico ya que, además, deben tenerse en cuenta variables propias que corresponden a la mampostería postesada, haciendo necesario el desarrollo de modelos que incluyan los siguientes aspectos: tipo y disposición de mampuestos, presencia (o no) de juntas horizontales/verticales, ubicación de las barras de acero activas y consideración de sus restricciones (con o sin inyección de mortero en las guías), presencia de bloques desviadores, fuerzas de tesado, pérdidas por relajación, etc.

Entre los trabajos que abordan el estudio de mampostería postesada, puede mencionarse el realizado por Ewing¹⁴, quien llevó a cabo un estudio para evaluar el comportamiento cíclico de muros de mampostería de arcilla postesada con aberturas, cables no adheridos, placas de confinamiento y acero de refuerzo

Organiza:

suplementario que fue confrontado con un estudio paramétrico en elementos finitos mediante el software ANSYS. Por otra parte, Farshchi et al¹⁵ desarrollaron un micro modelo no lineal mediante elementos finitos con la ayuda del software ANSYS para simular el comportamiento en el plano de muros de mampostería con postesado vertical y horizontal, así como su comparación con elementos similares en mampostería no reforzada. Dentro de Los resultados mostraron que, a pesar de que el tensionamiento vertical mejora la resistencia lateral de los muros, también pueden reducir su ductilidad. Bean y Schultz¹⁶ desarrollaron un modelo no lineal de Elementos Finitos con el software DRAIN-2DX, para simular la respuesta experimental de muros de mampostería postesada y observaron que el modelo de elementos finitos reproduce adecuadamente la curva carga-desplazamiento y el incremento de la tensión del cable durante el proceso de carga del muro hasta el instante de la carga máxima. Por otra parte, Stará et al¹⁷ desarrollaron un modelo 3D en elementos finitos mediante ANSYS para determinar el desempeño de la mampostería postesada, con la finalidad de poder describir y entender el comportamiento de este sistema e implementarlo en la repotenciación de estructuras existentes. Como resultado principal, en este estudio concluyeron que todavía existe un largo camino para definir reglas claras y sencillas en el diseño simplificado de la mampostería postesada. Ryu et al¹⁸ investigaron el comportamiento en el plano de muros de mampostería de arcilla postesada con cables no adheridos que fueron modelados en el software de Elementos Finitos LS-DYNA y cuyos resultados fueron validados con ensayos experimentales.

Del análisis de los trabajos arriba descriptos, se puede concluir que los modelos pueden representar el comportamiento del material compuesto, es decir de la mampostería postesada, pero, implícitamente, la malla de elementos finitos es fuertemente dependiente de la trayectoria de los tendones de acero ya que ellos conectan pares de nodos de los elementos finitos. Esto significa que en zonas con grandes curvaturas de los tendones se debe densificar fuertemente el mallado, con el consecuente incremento del costo computacional, lo que es especialmente crítico en problemas de diseño u optimización donde se requiere de cálculos repetitivos. Además, los efectos de fricción y deslizamiento entre el hormigón y el acero no pueden ser fácilmente incluidos.

Barbu et. al¹⁹ propusieron en el año 2019 una formulación para modelar hormigón pretensado, en la cual se requiere únicamente una malla de elementos finitos, sin ningún tipo de restricción en cuanto a su forma, y una descripción lineal del refuerzo activo. El hormigón pretensado es modelado como un material compuesto cuyo comportamiento es descripto con la teoría de mezcla generalizada serie-paralelo (S/P RoM), la tensión de pretensado efectiva es aplicada como una deformación inicial impuesta únicamente en el material acero usado para modelar el refuerzo activo. Por medio de la S/P RoM se alcanza el equilibrio en cada punto de integración entre el acero del refuerzo activo y el hormigón; a continuación, el tensor de deformación del acero es actualizado con la contribución del material hormigón. Finalmente, el campo de desplazamientos es actualizado hasta que se logra la convergencia global de las fuerzas. La metodología es válida tanto para tendones de

Organiza:

acero rectos como curvilíneos. Otra ventaja importante de la aplicación de esta metodología es que es posible asumir que cada material se comporta siguiendo su propia ley constitutiva (elasticidad, daño, plasticidad, visco elasticidad, etc.). Esta última, es la técnica escogida para realizar las modelaciones numéricas y simular el tesado del refuerzo activo en las estructuras de mampostería postesada presentadas en este trabajo.

METODOLOGÍA

Para este estudio se utilizó el método de los elementos finitos a efectos de simular el comportamiento mecánico no lineal de las vigas de mampostería postesada.

El enfoque elegido para el análisis es a través de micremodelos con el fin de capturar el patrón de falla observado en los ensayos pero, al mismo tiempo, se utilizan macromodelos que permiten simular el postesado en un compuesto matriz-fibra que forma parte del elemento estructural.

Se utilizó S/P RoM (macromodelo) para el tratamiento del postesado. Esta potente herramienta permite tener en cuenta, no sólo la anisotropía de los materiales componentes, sino también la interacción entre las distintas leyes constitutivas de los mismos. La S/P RoM permite, además, liberar la restricción sobre el mallado que imponía la definición del refuerzo activo. De esta manera, queda abierta la posibilidad de introducir cambios en la dirección del refuerzo, lo cual visibiliza aún más la potencia del método.

En el compuesto analizado (mampostería postesada) no existe adherencia entre el refuerzo y la matriz, esto se modela considerando los tres módulos transversales del acero cercano a 0 (cero) y, por lo tanto, permitiendo que el acero se “deslice” sin fricción dentro de la matriz. Para permitir la deformación del acero de forma completamente desacoplada de la matriz, sus coeficientes de Poisson se establecen como nulos, lo que permite la descripción completa del proceso de postesado¹⁹.

Cada uno de los distintos materiales componentes se modela considerando una ley constitutiva adecuada a su comportamiento: un modelo de daño continuo isótropo para la mampostería y un modelo de plasticidad para el refuerzo activo.

Esta propuesta se implementa a través de un modelo en elementos finitos mediante el software PLCd²⁰.

Modelo de daño continuo isótropo.

Los bloques huecos de hormigón representan un volumen importante en el material compuesto denominado mampostería postesada, por lo tanto, es fundamental una correcta descripción de su comportamiento dentro del modelo numérico del compuesto.

La correcta descripción del comportamiento de este material “simple”, hormigón, Organiza:

que conforma los bloques huecos tiene que abarcar tanto el campo lineal como el no lineal. Es por esto, que se utiliza la formulación del modelo constitutivo de daño continuo isótropo, con la cual se logran buenos resultados para predecir el comportamiento de materiales cohesivo-friccionales, como es el caso del hormigón o la mampostería.

Teniendo en cuenta el concepto de tensiones efectivas presentado por Kachanov^{21, 22} y la variable interna de daño d , las tensiones efectivas están dadas por:

$$\sigma_0 = \sigma / (1 - d) \quad , \quad 0 < d < 1 \quad (1)$$

donde d es la variable interna de daño, σ es el tensor de tensiones de Cauchy y σ_0 es el tensor de tensiones efectivas.

La siguiente expresión corresponde a la ley constitutiva secante para el problema de daño escalar, la cual se obtiene de un análisis termodinámico:

$$\sigma = (1 - d)\mathbb{C}_0 : \varepsilon \quad , \quad \mathbb{C}_s = (1 - d)\mathbb{C}_0 \quad (2)$$

donde $\mathbb{C}_0$ es el tensor constitutivo elástico del material sin daño y $\mathbb{C}_s$ es el tensor constitutivo de daño secante.

La expresión del tensor constitutivo de daño tangente ($\mathbb{C}_T$) se obtiene considerando la variación temporal de la ecuación constitutiva secante ($\mathbb{C}_s$):

$$\mathbb{C}_T = (1 - d)\mathbb{C}_0 - \frac{\partial G[f(\sigma_0)]}{\partial [f(\sigma_0)]} [\mathbb{C}_0 : \varepsilon] \otimes \left[\frac{\partial f(\mathbb{C}_0 : \varepsilon)}{\partial \varepsilon} \right] \quad (3)$$

donde $f(\sigma_0)$ es una función del tensor de tensiones $\sigma_0 = \mathbb{C}_0 : \varepsilon$ que depende del criterio de umbral de daño elegido.

Al tratarse de un material friccional es necesario tener en cuenta que la resistencia crece con el aumento de las fuerzas de rozamiento interno, que a su vez vienen influenciadas por la tensión hidrostática (primer invariante de tensiones $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$). Por lo anterior, se adoptó para el criterio de umbral de daño, la función de Mohr Coulomb con una modificación introducida por Oller²¹

La expresión matemática del criterio umbral de daño es la siguiente:

$$\mathbb{F}(\sigma, c, \phi) = \left\{ \frac{I_1}{3} \mathbb{K}_3 + \sqrt{J_2} \left[\mathbb{K}_1 \cos(\theta) - \mathbb{K}_2 \frac{\sin(\theta) \sin(\phi)}{3} \right] \right\} - c(d) \cdot \cos(\phi) = 0 \quad (4)$$

Con,

$$\begin{aligned} \mathbb{K}_1 &= \left[\frac{(1 + \alpha)}{2} - \frac{(1 - \alpha)}{2} \sin(\phi) \right] \\ \mathbb{K}_2 &= \left[\frac{(1 + \alpha)}{2} - \frac{(1 - \alpha)}{2} \frac{1}{\sin(\phi)} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

Organiza:

$$\mathbb{K}_3 = \left[\frac{(1 + \alpha)}{2} \sin(\phi) - \frac{(1 - \alpha)}{2} \right]$$

donde $\alpha = R^0/R_{\text{Mohr}}$ representa el cociente entre la relación de resistencia requerida R^0 y la relación de resistencia propia de la función clásica de Mohr-Coulomb R_{Mohr} , I_1 es el primer invariante tensiones, $J_2 = I_2 - \frac{I_1^2}{3}$ es el segundo invariante del tensor desviador, θ es el ángulo de similaridad de Lode, Φ es el ángulo de rozamiento interno y $c(d)$ es una función que define la posición del umbral de daño y depende de la variable interna de daño²³.

El tipo de ablandamiento a definir en el criterio de daño depende del problema a resolver. Para este trabajo se definió una regla de evolución del umbral de daño de tipo exponencial tanto en tracción como en compresión. Su expresión matemática es la siguiente:

$$G[c(d)] = 1 - \frac{c^{\max}}{c(d)} e^{A \left(1 - \frac{c(d)}{c^{\max}} \right)} \quad (6)$$

$$c^{\max} = c(d^0) = \sigma^{\max} \quad (7)$$

siendo $\sigma^{\max}$ el valor inicial del umbral de daño el cual es una propiedad del material y está relacionada con su resistencia a la compresión²³, A es un parámetro que depende de la energía de fractura del material. Para el caso de un proceso uniaxial con ablandamiento exponencial, teniendo en cuenta una función de umbral de daño cualquiera, el parámetro A se obtiene como:

$$A = \frac{1}{\frac{C_0 g_f}{[\sigma^{\max}]^2} - \frac{1}{2}} \quad (8)$$

donde g_f es la densidad de energía de fractura.

MODELADO Y ANÁLISIS

Se utilizaron dos herramientas para el modelado y análisis mediante elementos finitos. La primera fue GID, software de pre y postproceso que permite, entre otras cosas, el modelado geométrico, la definición efectiva de datos, el mallado, la transferencia de datos al software de análisis, así como el proceso y visualización de resultados numéricos. Como código específico se utilizó el PLCd²⁶, software de elementos finitos 3D, dinámico, no lineal, desarrollado en el Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería de la Universidad Politécnica de Cataluña-España. Este código permite trabajar con problemas de la

Organiza:

mecánica de sólidos lineal, no lineal y en pequeñas o grandes deformaciones. Asimismo, permite el uso de diferentes elementos finitos uniaxiales, bidimensionales y sólidos 3D. A su vez tiene la posibilidad de emplear distintos modelos constitutivos (plasticidad, daño, viscoelasticidad, entre otros) para describir el comportamiento de los materiales.

Geometría

Para la calibración del modelo a desarrollar se utilizaron datos y resultados de los prototipos perteneciente a la campaña experimental desarrollada por Bonett y García Giraldo en la Universidad de Medellín²⁴. En la *Figura 1*, se muestra un esquema de la geometría de la viga de mampostería postesada ensayada a flexión en cuatro puntos que se desea simular.

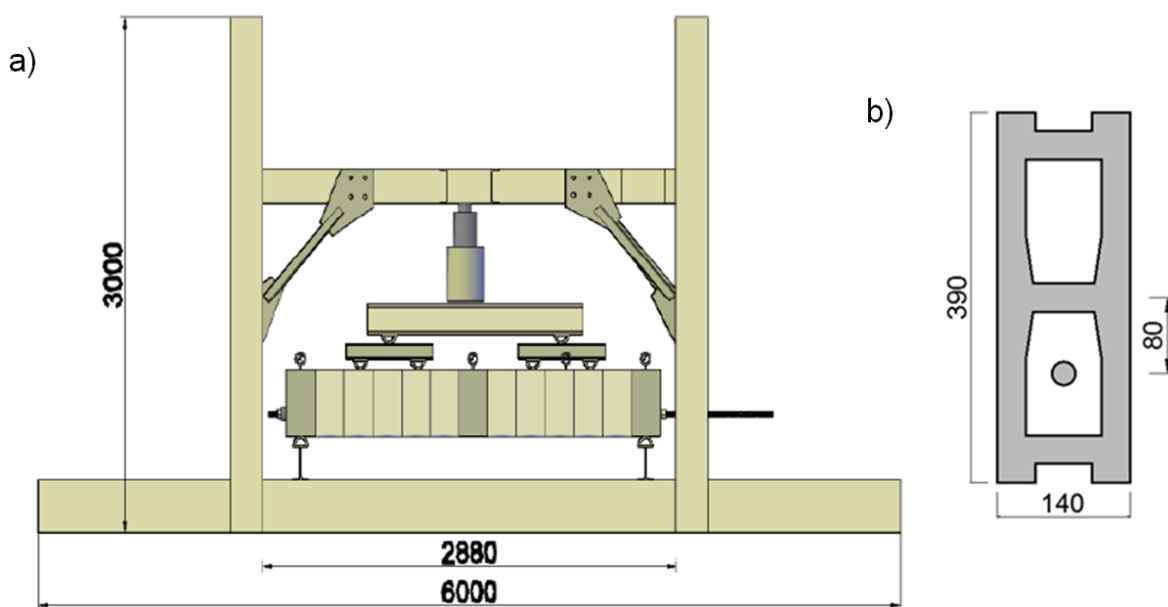


Figura 1. a) Montaje del ensayo a flexión en 4 puntos²⁵. Autor: John Mario García Giraldo. b) Sección transversal de la viga.

La viga de mampostería postesada presenta las características geométricas y mecánicas que se detallan en la Tabla 1, donde f'_b representa la resistencia a compresión de los mampuestos que conforman la viga, T_i es la fuerza de tesado inicial introducida a la barra de acero y e representa la excentricidad de la barra de acero.

Viga	f'_b	T_i	L	e	P_u	δ_{mid}	T_u
	MN/m ²	KN	m	mm	KN	mm	KN

Organiza:

B-2	10	40.39	2.60	80	76.21	14.7	99.98
-----	----	-------	------	----	-------	------	-------

Tabla 1. Propiedades de la viga experimental. Resultados de los ensayos

En la Tabla 1 se muestran también los principales resultados del ensayo experimental, entre ellos P_u es la carga aplicada al momento de la rotura, δ_{mid} es la flecha medida instantes antes de la rotura y T_u es la fuerza medida en la barra de acero en el mismo momento.

Para simular el ensayo se decidió modelar los elementos de transferencia de carga, de esta manera puede aplicarse un desplazamiento controlado y el mismo es introducido solamente en la parte superior del elemento de transferencia y luego la carga se transmite hasta la viga a través del conjunto de vigas y apoyos metálicos (Figura 2).

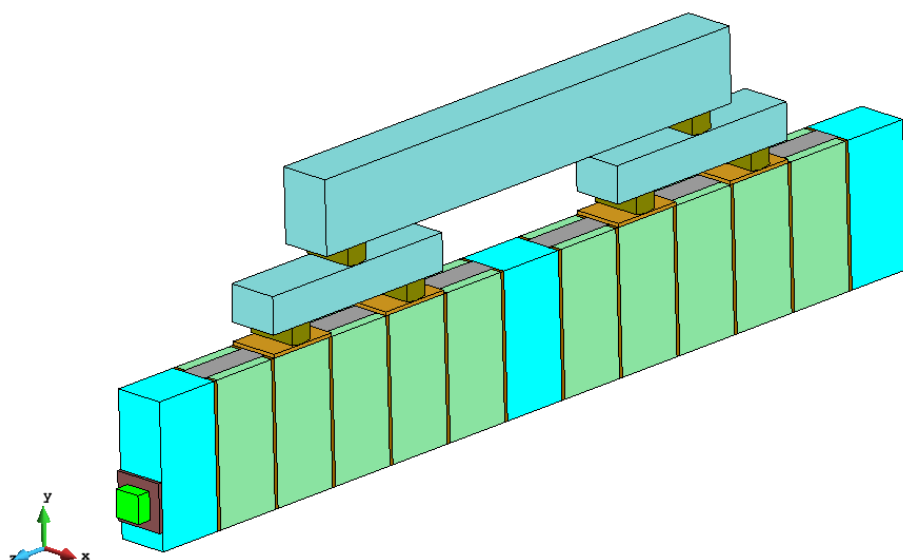


Figura 2. Geometría del modelo

Se modeló además de la barra de acero activa, los elementos que componen al sistema de tesado: placas de anclajes, elementos de sujeción, para evaluar en posteriores trabajos fenómenos locales tales como la penetración de la placa en los bloques de anclaje, entre otros.

Mallado

Para discretizar la geometría del modelo se emplearon elementos finitos hexaédricos lineales de 8 nodos y 2x2 puntos de Gauss (Figura 3). El lado máximo promedio de los elementos finitos hexaédricos es de 30 mm.

Se utilizaron 8978 elementos con un total de 12112 nodos (ver Figura 4).

Organiza:

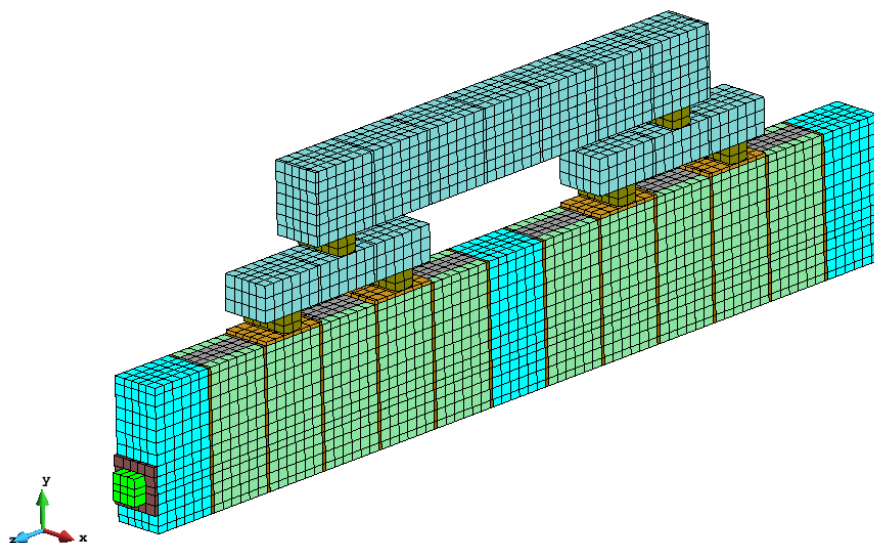


Figura 3. Mallado de la geometría.

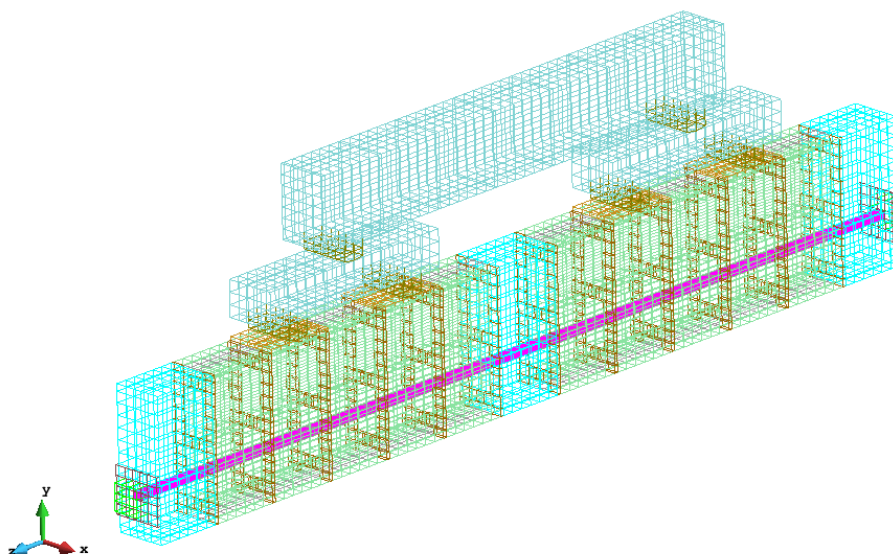


Figura 4. Definición de la geometría. Asignación de material compuesto que simula el refuerzo activo.

La trayectoria del refuerzo activo tiene en cuenta la excentricidad del prototipo experimental como se observa en la Figura 4.

Se eligieron elementos hexaédricos de 8 nodos, debido a que la geometría del problema se ajustaba mejor a través de estos elementos (Figura 5).

Organiza:

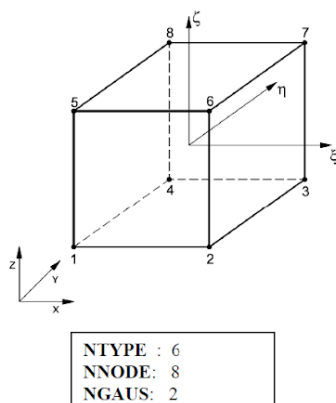


Figura 5. Elemento finito hexaédrico de 8 nodos.²⁰

Condiciones de contorno

En un apartado anterior se justificó la propuesta de modelar parte del marco de carga. Por lo tanto, definida la geometría del modelo, se puede señalar sobre la misma las condiciones de contorno del problema (Figura 6).

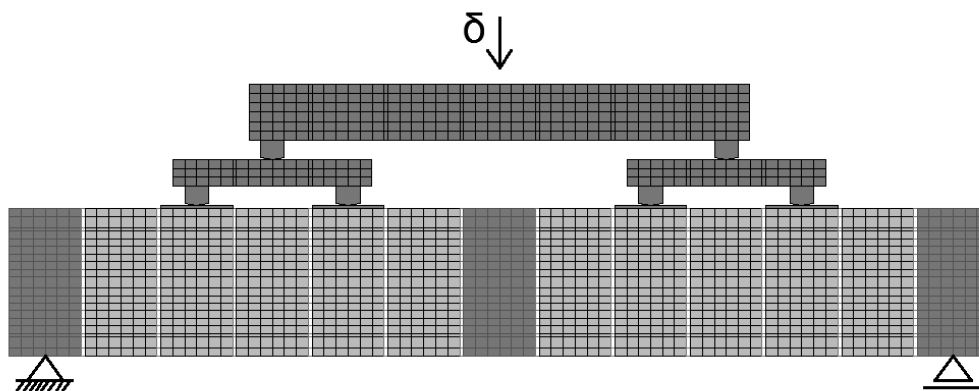


Figura 6. Esquema del ensayo. Condiciones de contorno.

Se impuso al modelo un desplazamiento vertical δ de igual magnitud en todos los nodos superiores ubicados en el centro de la viga metálica (nodos verdes) y se restringió el desplazamiento vertical y horizontal de los nodos inferiores ubicados en el centro del bloque de retención izquierdo (nodos rojos) y, para el bloque de retención derecho, sólo se restringieron los desplazamientos verticales (nodos naranjas). Estos nodos se pueden identificar con los colores indicados en la Figura 7. Esto es congruente con la tipología de carga empleada y las restricciones presentes durante los ensayos experimentales.

Organiza:

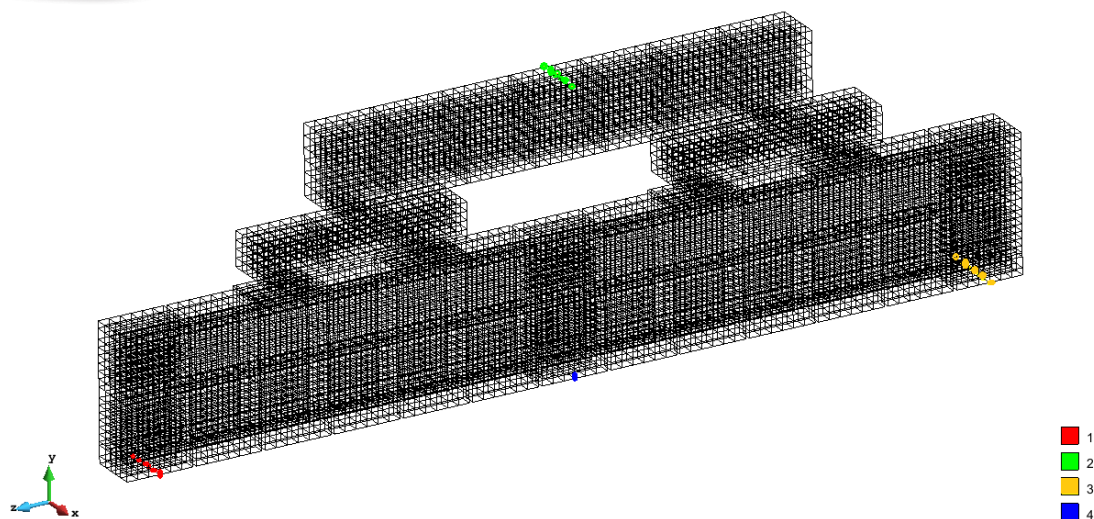
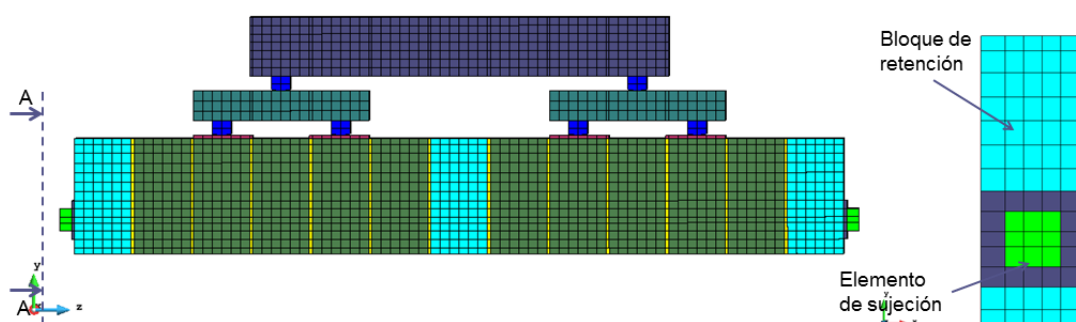


Figura 7. Nodos donde se aplican las condiciones de contorno.

Materiales

Este estudio plantea el análisis del fenómeno a través del uso de materiales compuestos asignados a elementos finitos en una forma controlada que permita estudiar también la evolución del patrón de falla. Los compuestos son tratados con la teoría de mezclas serie-paralelo, esta teoría actúa como una gestora de los modelos constitutivos de los distintos materiales que forman parte del compuesto, a nivel punto de integración.

Para modelar la viga de mampostería postesada se utilizaron cinco materiales compuestos conformados con distintas proporciones de los materiales simples.



Organiza:

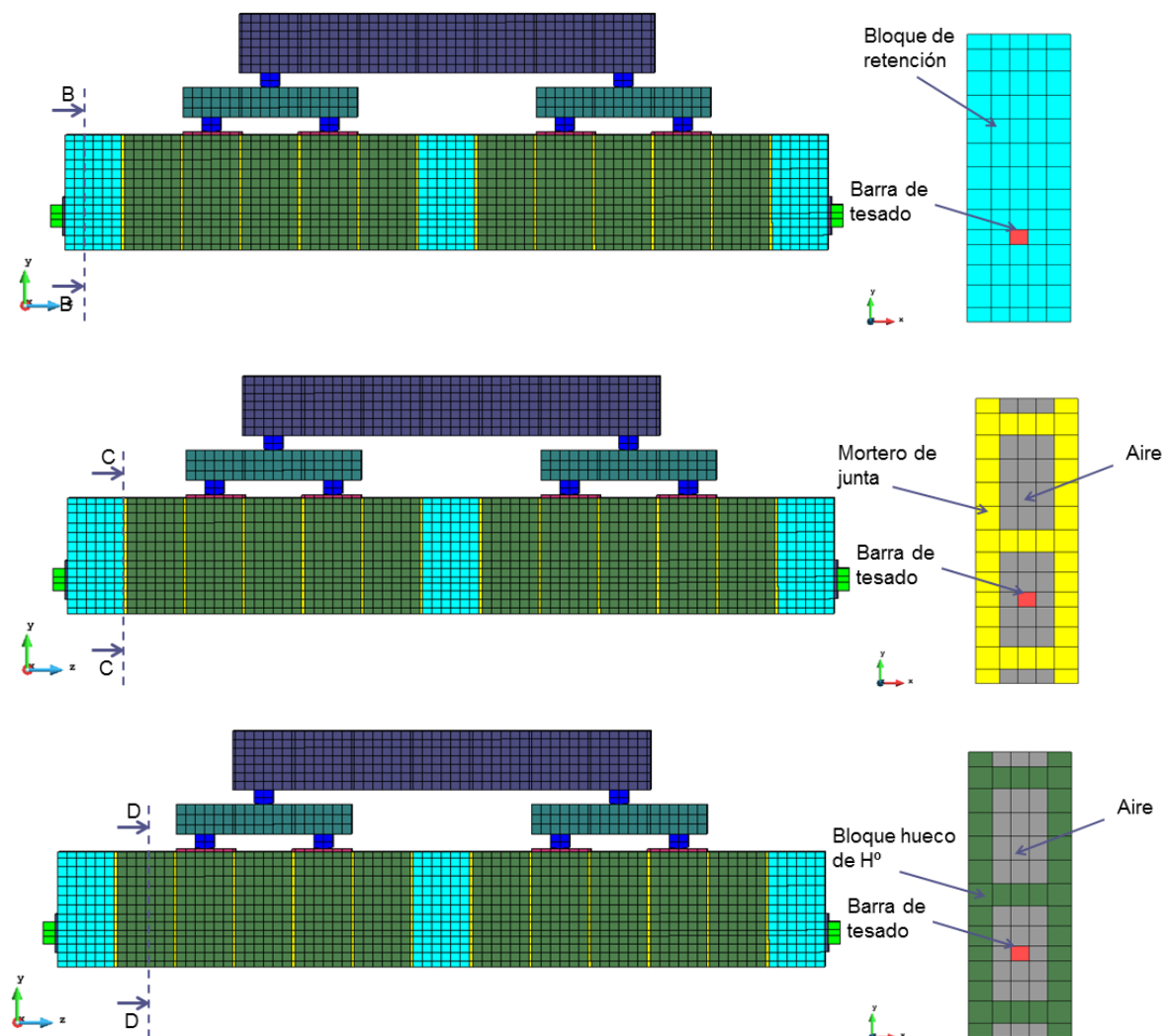


Figura 8. Asignación de materiales compuestos.

En la Figura 8, se muestran cortes transversales de la viga, para comprender la distribución y asignación de los materiales compuestos en la geometría.

Materiales compuestos	Materiales simples o constitutivos				
	Hormigón H-35	Hormigón H-10	Mortero	Aire	Acero
Bloque de retención	100%	0%	0%	0%	0%
Bloque hueco de H°	0%	100%	0%	0%	0%
Mortero de junta	0%	0%	100%	0%	0%

Organiza:

Aire	0%	0%	0%	100%	0%
Barra de tesado (1)	0%	0%	0%	1%	99%
Barra de tesado (2)	1%	0%	0%	0%	99%

Tabla 2. Definición de materiales compuestos

El material compuesto denominado: Barra de tesado (1) corresponde a la zona en la cual la barra de acero activo atraviesa los huecos de los bloques de hormigón. Mientras que el material: Barra de tesado (2) corresponde a las zonas en la cual la barra de acero activo atraviesa los bloques de retención y bloque desviador central.

Los materiales compuestos usados para simular los elementos que transmiten la carga a la viga de mampostería postesada: vigas, placas de apoyo, y elementos de fijación fueron modelados con un material elástico lineal con módulo de Young igual a 200000 MN/m².

A continuación, en la *Tabla 3* se presenta un resumen de las principales características mecánicas de los materiales simples utilizadas para simular el ensayo^{26,27}.

			Hormigón H-35	Hormigón H-10	Mortero	Aire	Acero
Modelo constitutivo			Daño	Daño	Daño	Elástico	Plasticidad
Criterio de Fluencia			Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	-	Von Mises
Módulo de Young	E	$\frac{MN}{m^2}$	27800	3250	3100	1	200000
Coeficiente de Poisson	ν		0.20	0.20	0.2	0.2	0.2
Resistencia a la compresión	σ_c	$\frac{MN}{m^2}$	35	10	10	1	517
Resistencia a la tracción	σ_t	$\frac{MN}{m^2}$	3.5	1.0	0.5	1	517
Energía de fractura a la compresión	G_c	$\frac{MN \cdot m}{m^2}$	0.003	0.003	0.2	1	1000
Energía de fractura a la tracción	G_t	$\frac{MN \cdot m}{m^2}$	0.00003	0.00003	0.0005	1	1000

Tabla 3. Definición de materiales simples

RESULTADOS

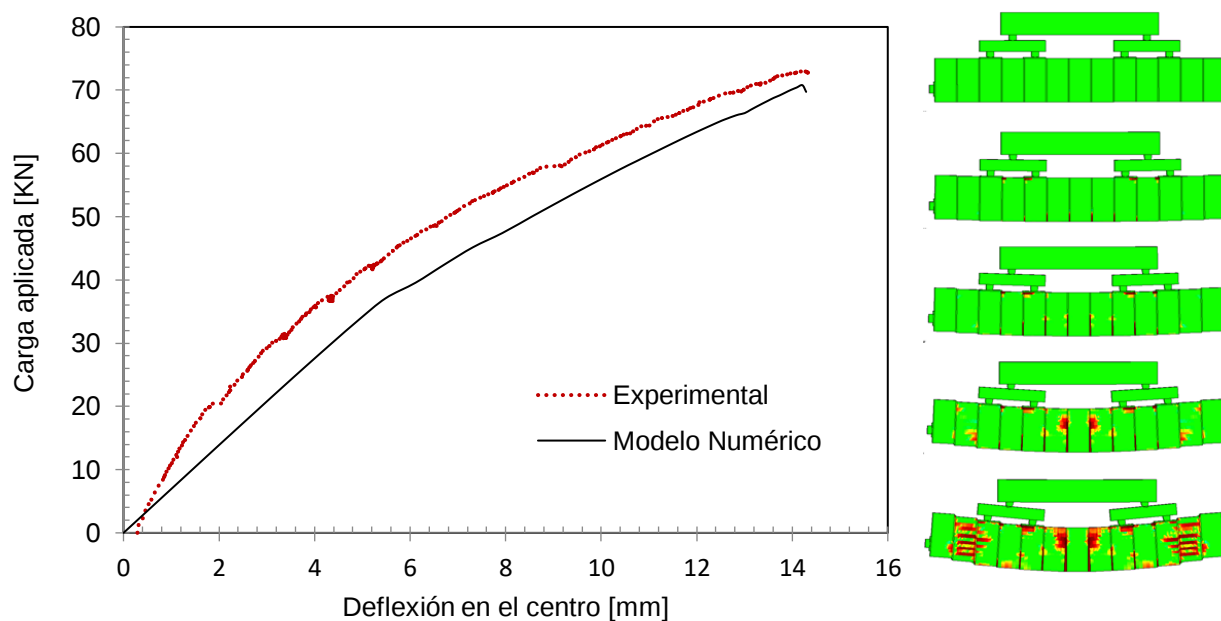
Del modelo numérico se obtuvieron los resultados que se presenta en la Tabla 4.

Organiza:

Viga	P_u	δ_{mid}	T_u
	KN	mm	KN
experimental	76.21	14.7	99.98
numérico	70.42	14.3	93.75

Tabla 4. Resultados. Comparación modelo numérico vs experimental

El desplazamiento δ_{mid} fue medido en un nodo inferior del bloque desviador central y la fuerza T_u se obtuvo integrando las tensiones normales en la sección



transversal de la barra de acero ubicada a la mitad de la luz entre apoyos. Se muestra en la Figura 9 el resultado de la simulación del comportamiento de la viga durante todo el ensayo a flexión en términos de carga-deflexión.

Figura 9. Respuesta carga vs deflexión. Modelo experimental y numérico.

Organiza:

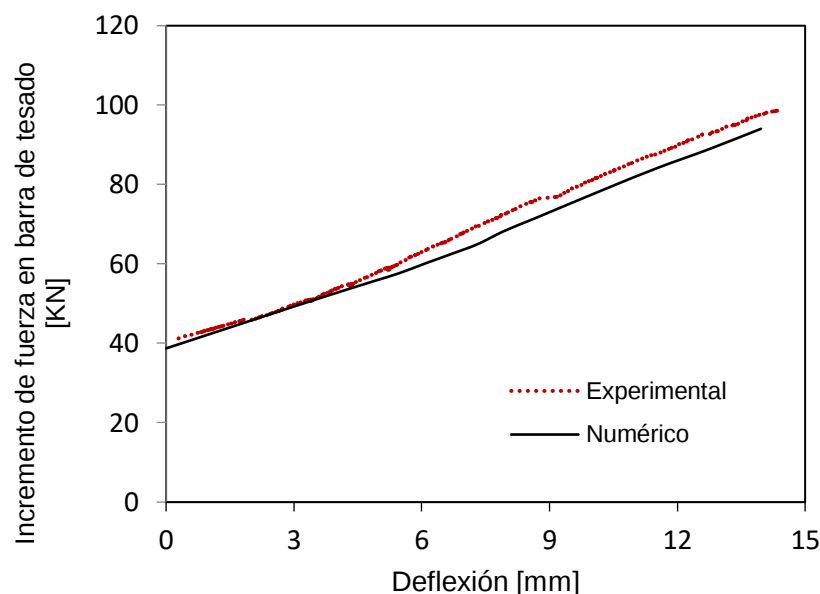


Figura 10. Incremento de fuerza en la barra de tesado

El modelo predice valores un tanto menores de carga que los observados experimentalmente y la rigidez inicial también es menor en un 65% aproximadamente a la medida durante el ensayo. Sin embargo, la aproximación de la carga y la deflexión última son muy buenas, siendo un 92% y 97% de los valores registradas experimentalmente, respectivamente.

En cuanto al patrón de falla observado en el modelo, avanzado el crecimiento de las fisuras en las juntas de los mampuestos hasta aproximadamente la mitad de la altura de la sección, se inicia un proceso de daño en los extremos asociados a una falla por corte el cual difiere del observado experimentalmente, falla por aplastamiento del bloque de compresión. Sin embargo, durante la campaña experimental los investigadores registraron prototipos con fallas por corte que en el caso de la simulación se presenta con mayor notoriedad que la falla por aplastamiento.

La fuerza de tesado en la barra de acero aproximada por el modelo numérico registró un incremento durante el proceso de carga igual al 94% del valor registrado durante el ensayo experimental.

CONCLUSIONES

Esta investigación alcanzó el objetivo propuesto inicialmente, es decir: desarrollar una herramienta capaz de simular el comportamiento elástico e inelástico de vigas postesadas conformadas por bloques de hormigón sin mortero de relleno y con refuerzo no adherido. Este comportamiento que se ve influenciado por múltiples fenómenos, por ej.: anisotropía, no linealidad material, daño, plasticidad, complejos mecanismo de unión entre los materiales componentes, postesado, deslizamiento

entre materiales, entre otros.

En particular se pueden resumir las siguientes conclusiones:

El modelo numérico permite aproximar el comportamiento, tanto en el rango elástico como en el inelástico, de las vigas postesadas ensayadas experimentalmente, descripto a través de la curva carga-deflexión.

La predicción de la carga última y la deflexión correspondiente a la misma resultan muy buenas.

El modo de falla observado en las experiencias de laboratorio corresponde a una falla por aplastamiento de las fibras más comprimidas del bloque. El modelo numérico no exhibe el modo de falla por aplastamiento, sino que la misma está asociada a una concentración de daño en los extremos (falla por corte).

El modelo logra capturar correctamente la primera etapa del proceso de evolución del daño observado durante la campaña experimental que se basa en la apertura de fisuras en las juntas de mortero que unen los bloques.

Con respecto al incremento de la fuerza en la barra de tesado relacionada con la deflexión en el centro de la viga, el modelo logra una buena predicción de la evolución de esta variable.

Sin embargo, existen aspectos de este modelo que pueden ser mejorados para lograr una mayor precisión en las predicciones. Se plantean entonces líneas futuras que pueden abordarse con el fin de obtener una herramienta más robusta, como ser: Incluir en el modelo de daño una segunda variable de degradación (Modelo d+ d-) que tenga en cuenta fenómenos como la apertura y cierre de fisuras que se dan durante el proceso de fabricación de las vigas. Profundizar el estudio de las propiedades mecánicas de las juntas de mortero y su comportamiento ante diferentes estados de cargas.

Agradecimientos:

A los profesores Dr. Ricardo León Bonett y John Mario Garcia Giraldo de la Universidad de Medellín por brindar información de ensayos experimentales llevados a cabo sobre vigas de mampostería postesada. Al Consejo de Investigación de la UNSa y al CONICET.

Referencias

1. Pedreschi, R. A feasibility study of post-tensioned stone for cladding. *Constr Build Mater* (2013) doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.02.008.
2. Ganz, H. R. Post-tensioned masonry around the world. *Concrete International* (2003).
3. Lissel S.; Shrive N. Construction of diaphragm walls post-tensioned with carbon fiber reinforced polymer tendons. Preprint at (2003).
4. Foti, D. & Monaco, P. Post-tensioned masonry: state of the art. *Progress in*

Organiza:

- Structural Engineering and Materials* (2000) doi:10.1002/1528-2716(200007/09)2:33.0.CO;2-2.
5. Wight, G. D., Ingham, J. M. & Wilton, A. R. Innovative seismic design of a post-tensioned concrete masonry house. This article is one of a selection of papers published in this Special Issue on Masonry. *Canadian Journal of Civil Engineering* (2007) doi:10.1139/L07-104.
 6. Wight, G. D., Ingham, J. M. & Kowalsky, M. J. Shaketable testing of rectangular post-tensioned concrete masonry walls. *ACI Structural Journal* Preprint at (2006).
 7. Bonett, R.L.; Urrego, H. G. Post-tensioned concrete brick masonry without mortar joint. Preprint at (2008).
 8. Bonett, R.L.; Urrego, H. G. Capacity of the Dry Post-tensioned Masonry. Preprint at (2010).
 9. Lourenço, P. B., Rots, J. G. & Blaauwendraad, J. Continuum Model for Masonry: Parameter Estimation and Validation. *Journal of Structural Engineering* (1998) doi:10.1061/(asce)0733-9445(1998)124:6(642).
 10. López, F.; Oller, S.; Oñate, E. *Cálculo Del Comportamiento de La Mampostería Mediante Elementos Finitos*. (1998).
 11. Caporale, A., Parisi, F., Asprone, D., Luciano, R. & Prota, A. Comparative micromechanical assessment of adobe and clay brick masonry assemblages based on experimental data sets. *Compos Struct* (2015) doi:10.1016/j.compstruct.2014.09.046.
 12. Chisari, C., Macorini, L., Amadio, C. & Izzuddin, B. A. An inverse analysis procedure for material parameter identification of mortar joints in unreinforced masonry. *Comput Struct* (2015) doi:10.1016/j.compstruc.2015.02.008.
 13. Nazir, S. & Dhanasekar, M. A non-linear interface element model for thin layer high adhesive mortared masonry. *Comput Struct* (2014) doi:10.1016/j.compstruc.2014.07.023.
 14. Ewing, B. Performance of Post-Tensioned Clay Brick Masonry Walls with Openings. (Faculty of North Carolina, 2008).
 15. Farshchi, D. M., Motavalli, M., Schumacher, A. & Marefat, M. S. Numerical modelling of in-plane behaviour of URM walls and an investigation into the aspect ratio, vertical and horizontal post-tensioning and head joint as a parametric study. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* (2009) doi:10.1016/s1644-9665(12)60037-5.
 16. Bean Popehn, J. R. & Schultz, A. E. Finite-Element Models for Slender, Posttensioned Masonry Walls Loaded Out-of-Plane. *Journal of Structural Engineering* (2011) doi:10.1061/(asce)st.1943-541x.0000411.
 17. Stará, M., Čajka, R., Matečková, P. & Buchta, V. Laboratory Measurement of

Organiza:

- Deformations of Bidirectionally / Prestressed Masonry Laboratorní Měření Deformací Obousměrně Předpjatého Zdiva. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series* (2014) doi:10.2478/v10160-012-0032-4.
18. Ryu, D., Wijeyewickrema, A. C., ElGawady, M. A. & Madurapperuma, M. A. K. M. Effects of Tendon Spacing on In-Plane Behavior of Posttensioned Masonry Walls. *Journal of Structural Engineering* (2014) doi:10.1061/(asce)st.1943-541x.0000849.
 19. Barbu, L. G., Cornejo, A., Martínez, X., Oller, S. & Barbat, A. H. Methodology for the analysis of post-tensioned structures using a constitutive serial-parallel rule of mixtures: Large scale non-linear analysis. *Compos Struct* (2019) doi:10.1016/j.compstruct.2019.02.092.
 20. Oller, S. *et al.* Breve Manual del PLCd v 16.02. Preprint at (2018).
 21. Oller, S. Un modelo de daño continuo para materiales friccionales. (UPC, 1988).
 22. Kachanov, L. M. Time of rupture process under creep conditions. *Isv. Akad. Nauk. SSR. Otd Tekh. Nauk.* (1958).
 23. Oller, S. *Dinámica No Lineal*. (2001).
 24. Bonett, R. L., Urrego, H. & Carrillo, J. Behavior of ungrouted and unbonded post-tensioned masonry beams and slabs. *Eng Struct* (2017) doi:10.1016/j.engstruct.2017.03.035.
 25. García, J. M. Comportamiento a flexión de elementos de albañilería postensada sin relleno de grouting. 221 Preprint at (2019).
 26. Oller, S. *Dinámica No Lineal de Estructuras*. (CIMNE-Springer, Barcelona, España, 2014).
 27. Ruiz, A. I., Giraldo, J. M. G., Nallim, L. G., Diaz, R. L. B. & Oller, S. H. Numerical modeling parameters by the finite elements method for a hollow concrete block under uniaxial compression load. in *Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI* (2020). doi:10.23919/CISTI49556.2020.9141097.

Organiza: