

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE MUROS DE MAMPOSTERÍA REFORZADA CON ARMADURA DISTRIBUIDA BAJO ACCIÓN SÍSMICA

COMPUTATIONAL SIMULATION OF RETROFITTED MASONRY WITH DISTRIBUTED REINFORCEMENT UNDER SEISMIC ACTION

Gerardo Gonzalez^a, Gustavo Palazzo^a, Marcelo Guzmán^a y Víctor Roldan^a

^a*Ceredetec, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 272,
(M5502AJE) Mendoza, Argentina, gpalazzo@frm.utn.edu.ar*

Palabras clave: Muros de mampostería, simulación computacional, análisis no lineal.

Resumen. En zonas sísmicas, las construcciones existentes con muros de mampostería encadenada pueden requerir un refuerzo estructural. Una estrategia para ese refuerzo consiste en transformar esos muros en mampostería reforzada con armadura distribuida. Si bien ambas tipologías de muros son consideradas por el reglamento argentino para construcciones sismorresistentes, no se cuenta con especificaciones para la simulación computacional bajo análisis no lineal de estos muros. Por ello, es objeto de este trabajo contribuir a generar modelos computacionales de los muros en estudio, en base a resultados experimentales. Así, se describen primero las características de los muros según el reglamento argentino, así como los ensayos realizados para el muro con y sin refuerzo. Luego se describen las características de las simulaciones numéricas propuestas, para realizar posteriormente comparaciones entre la respuesta computacional y la obtenida en ensayos. En las conclusiones se destacan las posibilidades, fortalezas y deficiencias que presentan estas simulaciones, y se proponen investigaciones futuras.

Keywords: Masonry, computational simulation, nonlinear analysis.

Abstract. In seismic zones, existing buildings with confined masonry may require structural retrofit. One strategy for this retrofit is to add to these walls distributed reinforcement. Although both types of masonry are considered by the Argentine standard for earthquake resistant constructions, there are no specifications for the computational simulation under non-linear analysis of these walls. For this reason, the object of this work is to contribute to generating computational models of the walls under study, based on experimental results. Thus, the characteristics of the masonry according to the Argentine standard are first described, as well as the tests carried out for the wall with and without retrofit. Then the characteristics of the proposed numerical simulations are described, and comparisons between the computational response vs. tests response are performed. In the conclusions, the possibilities, strengths and weaknesses of these simulations are highlighted, and future research is proposed.

1 INTRODUCCIÓN

Muchas edificaciones existentes, en diferentes países, poseen muros de mampostería encadenada. Cuando estos muros se han ejecutado correctamente, han demostrado un buen desempeño frente a terremotos (<https://confinedmasonry.org/>).

Construcciones antiguas evaluadas con reglamentos actuales podrían presentar una seguridad (completa o parcial) baja, límite o insuficiente (según criterio de clasificación de construcciones existentes del INPRES – CIRSOC 103, Parte III, 2018). En ese caso se requerirá un refuerzo estructural. Una de las técnicas de refuerzo posible es el encamisado de estos muros, tal como propone Alcocer et al., 2021. Esta técnica consiste en el aumento de la sección transversal del muro, mediante la colocación de mallas de alambre soldadas, capas de fibras de carbono o armaduras cubiertas con varios centímetros de mortero de cemento o de concreto, colocados a mano o proyectado.

El reglamento argentino para estructuras sismorresistentes (INPRES – CIRSOC 103, Parte III, 2018) no contempla metodologías de refuerzo de muros, pero sí considera los muros de mampostería reforzada con armadura distribuida, que es una clase de encamisado de muros.

A efectos de avanzar en el conocimiento de la clase de refuerzo comentada, este trabajo tiene por objeto analizar la simulación numérica de un muro de mampostería encadenada (antes y después de aplicar el encamisado de muro), con análisis no lineal incremental, contrastando además los resultados de la simulación con valores experimentales.

Una descripción general de las prescripciones indicadas para esta clase de mampostería (y para la mampostería encadenada simple) se presenta en la sección 2 del presente trabajo. En la sección 3 y 4 se presenta, respectivamente, el modelo experimental y el modelo numérico. Luego en la sección 5 se contrastan los valores del modelo con los resultados de ensayo, y en las conclusiones (sección 6) se destacan los resultados obtenidos y se plantean nuevas investigaciones para avanzar en esta temática.

2 MUROS DE MAMPOSTERIA ENCADENADA Y REFORZADA CON ARMADURA DISTRIBUIDA

La parte III del reglamento argentino, mencionado en la sección anterior, establece los requerimientos mínimos para el diseño y la construcción de estructuras de mampostería en construcciones sismorresistentes emplazadas en las zonas sísmicas.

Para calcular las rigideces de los muros se admite comportamiento elástico lineal, pero deberán tenerse en cuenta los efectos del agrietamiento, considerando áreas y momentos de inercia efectivos (según las fórmulas especificadas en el reglamento). Y, alternativamente, se podrá utilizar el modelo de bielas para determinar la rigidez de estos muros.

Para evaluar la demanda en cada componente de los muros de mampostería encadenada simple (para fuerzas contenidas en su plano) se puede admitir también que los encadenados conforman un reticulado plano con nudos articulados. Este reticulado plano está compuesto por cordones verticales y horizontales constituidos por los encadenados, y por diagonales equivalentes de mampostería (con espesor y ancho especificado en el reglamento). Se calcula de esta manera el esfuerzo de corte requerido V_u para el muro y la viga de encadenado, y el esfuerzo axial requerido en las columnas de encadenado N_{uc} . Luego se verifica que: (i) la resistencia de diseño de corte del muro V_d sea $>$ o igual a V_u ; (ii) la resistencia de diseño axial de una viga de encadenado N_{dv} sea también mayor $>$ o igual a V_u ; y (iii) la resistencia de diseño axial de una columna de encadenado N_{dc} sea mayor o igual a N_{uc} .

En el caso de los muros de mampostería reforzada con armadura distribuida, mediante el análisis sísmico se determina la demanda (considerando en este caso solo demandas en su plano): esfuerzo de corte requerido V_u y el momento flector requerido M_u . Luego se verifica

que: (i) la resistencia de diseño de corte del muro V_d sea $>$ o igual a V_u ; y (ii) la resistencia de diseño a flexión del muro M_d sea $>$ o igual a M_u . Para calcular la resistencia V_d , se emplea la fórmula para la determinación de V_s en vigas de hormigón armado (resistencia nominal a la corte proporcionada por la armadura de corte), limitando su valor según la resistencia especificada al corte de la mampostería. Y para calcular la resistencia M_d , se procede de manera análoga al diseño a flexión de una viga de hormigón armado, calculando la fuerza de compresión según un rectángulo equivalente para la zona comprimida de mampostería, y la fuerza de tracción aportada por la armadura. Se observa que en el cálculo de ambas resistencias solo se considera a compresión la participación de la mampostería (sin intervención del hormigón proyectado).

3 ESTUDIO EXPERIMENTAL

Un muro de mampostería encadenada simple (MES), y luego transformado en un muro de mampostería reforzada con armadura distribuida fueron considerados en el estudio experimental (MRAD).

3.1 Muro de mampostería encadenada simple - MES

El primer muro mencionado se lo muestra en la Figura 1, donde también se tienen los parámetros geométricos.

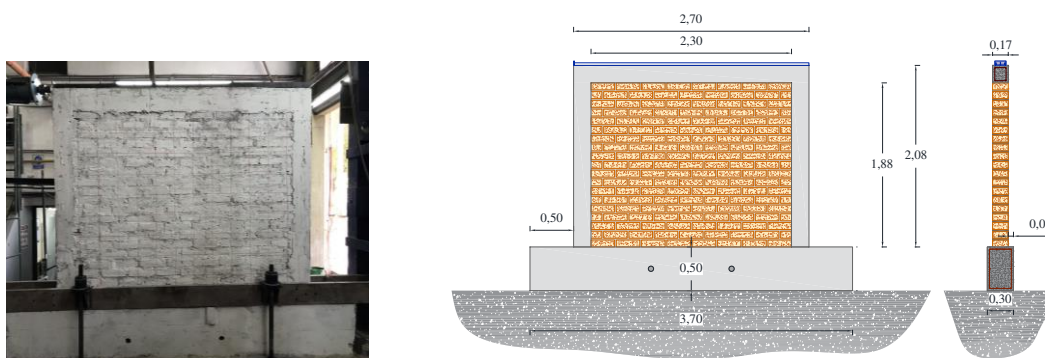


Figura 1: Muro MES (izq.: modelo experimental; der.: parámetros geométricos).

Los encadenados tenían 0,20 m de alto y 0,17 m de ancho, con un total de 4 db 8 mm, y estribos 1 dbe 6 mm c/0,15 m (con densificación en los extremos). Según ensayos de probetas, la resistencia especificada a la compresión del hormigón fue f'_c igual a 9,5 MPa, correspondiendo según CIRSOC 201 (2005): una resistencia a la tracción por flexión del hormigón f_r igual a 1,93 MPa, y un módulo de elasticidad longitudinal $E_h = 14.500$ MPa. Para la mampostería no se realizaron ensayos, por lo que se tomaron los parámetros mecánicos indicativos dados en el INPRES – CIRSOC 103, Parte III (2018): resistencia especificada a la compresión f'_m igual a 0,65 MPa (para ladrillo cerámico macizo y mortero de cemento de albañilería), resistencia especificada a la corte f'_v igual a 0,07 MPa, módulo de elasticidad longitudinal E_m igual a 780 MPa, y módulo de corte G_m igual a 156 MPa. Con estos parámetros se calculó la resistencia de diseño de corte del muro V_d igual a 25,70 kN (de acuerdo con el Cap. 7 del INPRES – CIRSOC 103, Parte III recién mencionado).

El ensayo de este muro se realizó en un pórtico de carga, aplicando la misma en la parte superior del muro, de manera creciente (en la Figura 1 se observa a la izquierda el actuador para aplicar esa carga). Esta acción se materializó con el actuador (gato hidráulico con carga máxima de 200 kN) que accionaba sobre un perfil metálico que poseía conectores insertos en

la viga de encadenado. Se midieron desplazamientos laterales con relojes comparadores, hasta que se presentaron fisuras importantes en el muro, llegando hasta una carga de 53 kN, para un desplazamiento de 9,75 mm (que implica una distorsión horizontal de piso de 0,50).

3.2 Muro de mampostería encadenada simple - MRAD

Luego del ensayo del muro de mampostería encadenada simple se procedió a su encamisado, transformando el muro original en un muro de mampostería reforzado con armadura distribuida.

Esta armadura (en ambas caras del muro) estuvo constituida por una malla Acindar Sima modelo Q188, con armadura db 6 mm, separada 0,15 m. Se eligió esta armadura de forma que se superara la cuantía de armadura mínima indicada en el INPRES – CIRSOC 103, Parte III (2018). Las mallas en cada cara del muro se vincularon a través de conectores que atravesaron éste (con 4 conectores por m^2 , de 400 mm de longitud cada uno). La vinculación de las mallas con los encadenados (columnas y viga superior) se logró mediante armadura en L, que se anclaron en ellos (barras de 400 mm de largo, ancladas 80 mm en los encadenados, con anclaje químico). No se realizó el anclaje de las mallas a la viga de fundación.

Luego se procedió al proyectado de mortero cementicio, que en cada cara alcanzó un espesor de 0,06 m. El procedimiento de colocación fue mediante vía húmeda, por lo tanto, se realizó el proceso de mezclado del cemento, agregados y agua y esta mezcla se llevó al receptáculo y boquilla de lanzamiento. Para lograr las propiedades necesarias, se elaboraron hormigones con alto contenido de material cementicio (500 kg/m^3) y una adecuada razón a/c (0,5; 250 kg de agua por m^3 de mortero). La cantidad de agregado fino se fijó en una relación 1 cemento – 3 agregado, limitando el tamaño del agregado a una dimensión máxima de 4,75 mm, debido al tamaño de la boquilla de la máquina proyectadora.

Pasado el tiempo de curado del mortero se repitió el ensayo de carga lateral creciente hasta que se produjo daño en la armadura de la columna traccionada (sin que se observaran fisuras en la superficie del muro con mortero proyectado). Se alcanzó en este ensayo una carga de 150 kN, para un desplazamiento de 12,68 mm (que corresponde a una distorsión horizontal de piso de 0,64). Un esquema del muro con las mallas de refuerzo se presenta en la Figura 2 (con vista general y detalles específicos), mostrando en Figura 3 el inicio del proyectado y el estado final del MRAD.

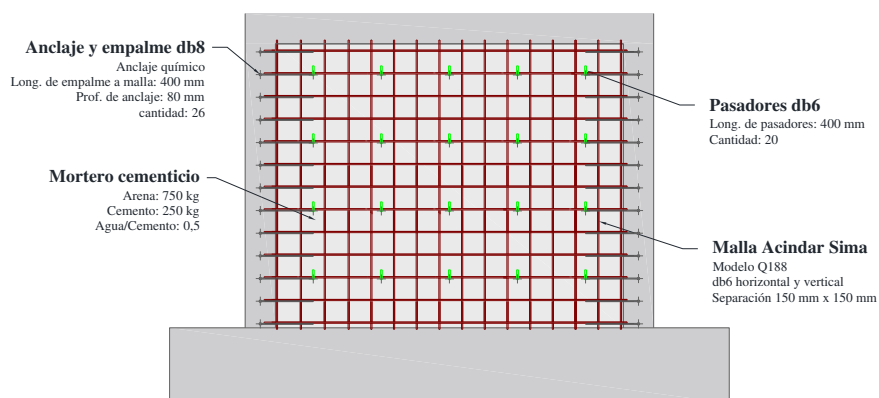


Figura 2 (a): Detalles de armado del MRAD (vista general).



Figura 2 (b): Detalles de armado del MRAD (izq.: anclajes a los encadenados; der.: vinculación entre mallas).



Figura 3: Muro de mampostería con mortero proyectado (en proceso a la izq., y finalizado a la der.).

3.3 Respuesta experimental MES vs. MRAD

La comparación de la respuesta experimental para la condición MES vs. MRAD se presenta en la Figura 4, donde se indican también los valores experimentales de rigidez elástica del muro bajo desplazamientos horizontales.

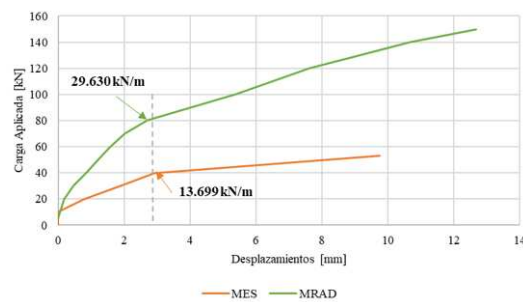


Figura 4: Respuesta experimental de los muros en su condición MES y MRAD.

4 ESTUDIO NUMÉRICO

Los muros considerados en el modelo experimental también se estudiaron en forma numérica, mediante un programa comercial de elementos finitos.

4.1 Muro de mampostería encadenada simple - MES

Un esquema del modelo para el muro MES se muestra en la Figura 8, donde se modelaron dos materiales continuos: uno correspondiente a los elementos de hormigón armado, y el otro para la mampostería. La interfaz entre estos materiales quedó definida por un contacto de tipo superficie a superficie con propiedades friccionales. Este contacto admite el desarrollo de

tensión normal a compresión ilimitada entre las superficies vinculadas, impidiendo la penetración entre los cuerpos en contacto. A su vez, admite la discontinuidad estructural en el caso de existir una acción tendiente a producir la separación entre las superficies. En cuanto al comportamiento tangencial, la interfaz considera un coeficiente de fricción de magnitud infinita lo que implica la imposibilidad de tener desplazamientos tangenciales relativos entre las superficies en contacto (Simulia, 2010). En efecto, en los puntos en que el hormigón armado ejerce presión sobre la mampostería, la presión normal, así como la tensión tangencial desarrolladas en la interfaz aumentan ilimitadamente, siendo las propiedades mecánicas de cada material las que controlen la falla.

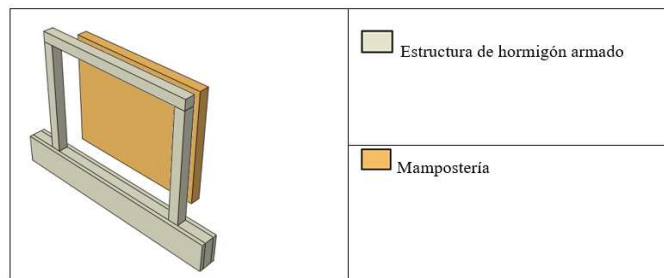


Figura 5: Esquema de la simulación computacional del modelo MES.

Considerando la respuesta experimental (con daño solo en la mampostería), y a efectos de reducir los tiempos computacionales, los elementos de encadenado y la viga de fundación se modelaron con comportamiento elástico lineal. A partir del método de la sección transformada se procedió a calcular un módulo de elasticidad equivalente considerando el aporte en términos de área de cada material sobre la sección total.

Para la mampostería se consideró el modelo elasto – plástico *Concrete Damaged Plasticity* (Simulia, 2010), que es un modelo constitutivo desarrollado para materiales cuasi-frágiles tales como el material en consideración. Este modelo considera que los mecanismos de falla son el agrietamiento por tensiones de tracción o el aplastamiento por compresión en el material. Permite establecer un umbral límite de comportamiento elástico diferenciado para las tensiones de tracción de aquellas correspondientes a los esfuerzos de compresión. Asimismo, el daño o plasticidad desarrollados debido a tensiones en una dirección son independientes de las que pueden generarse ante una inversión en el sentido de carga permitiendo captar el efecto del “cierre de las fisuras” propio de la mampostería. La curva tensión - deformación de la Figura 6 permite observar los puntos característicos de la ley constitutiva tanto para tensiones de tracción como aquellas de compresión.

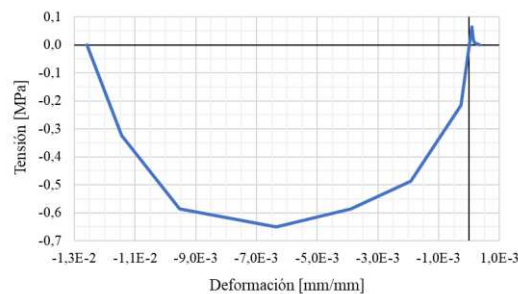


Figura 6: Ley constitutiva considerada para la mampostería.

Ambos materiales fueron modelados con 17.200 elementos octaédricos de 8 nodos con interpolación lineal (Simulia, 2010), con una longitud característica es de 44 mm.

Las condiciones de borde para el muro correspondieron a la restricción a los desplazamientos en la superficie inferior de la viga de fundación, y a un desplazamiento impuesto en la cara superior de la viga de encadenado.

Las propiedades mecánicas consideradas en el modelo se muestran en la Tabla 1. El valor de E para el hormigón y la mampostería, así como la tensión a rotura a compresión de este material fueron especificados en la sección 3.1.; mientras que la tensión de rotura a tracción fue asignada como el 10% de f'_m (Oller, 1988).

El tiempo de análisis que demandó este modelo fue de aproximadamente de una hora.

Material	Hormigón Armado
Densidad	2400 kg/m ³
Módulo de elasticidad	14,5 GPa
Coefficiente de Poisson	0,15
Material	Mampostería
Densidad	1700 kg/m ³
Módulo de elasticidad	0,78 GPa
Coefficiente de Poisson	0,15
Criterio de plasticidad	Concrete Damaged Plasticity
Tensión de rotura a compresión	0,65 MPa
Tensión de rotura a tracción	0,065 MPa

Tabla 1: Parámetros mecánicos para los materiales considerados en el modelo MAS.

4.2 Muro de mampostería encadenada simple - MRAD

La Figura 7 muestra el esquema del modelo de muro MRAD. Este modelo se realizó sobre la base del modelo MAS, agregando el encamisado de armadura y mortero (denominado “refuerzo”) en la figura mencionada (se agregaron en este modelo 5.220 elementos tipo cáscara de 4 nodos, con curvatura doble, con longitud característica de 44 mm).

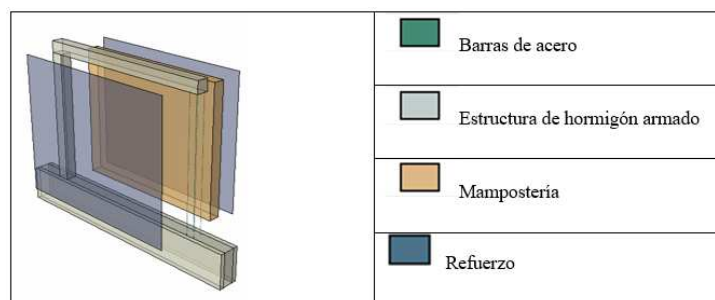


Figura 7: Esquema de la simulación computacional del modelo MRAD.

Las propiedades para este refuerzo fueron las mismas que las adoptadas para el hormigón armado en el modelo MAS, ya que no se observó daño en estas placas durante el ensayo. Estas placas, de 0,06 m de espesor cada una, se simularon con elementos tipo cáscara de 4 nodos, con curvatura doble (Simulia, 2010).

La columna traccionada del modelo MAS, se simuló en este modelo solo con las armaduras longitudinales, con un modelo elásto-plástico perfecto, cuyas propiedades se presentan en la Tabla 2. Se adoptó este criterio de simulación computacional luego de observar que en el ensayo solo se dañó la armadura de la columna traccionada (sin participación del hormigón, dada la demanda a tracción).

El tiempo de análisis que demandó este modelo fue de aproximadamente de dos horas.

Material	Acero
Densidad	2400 kg/m ³
Módulo de elasticidad	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0,30
Criterio de plasticidad	Elasto-plástico perfecto
Tensión de fluencia	420 MPa

Tabla 2: Parámetros mecánicos para la armadura en columna traccionada en el modelo MRAD.

5 CONTRASTACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS VS. EXPERIMENTALES

5.1 Muro de mampostería encadenada simple - MES

Como antes se indicara, en el muro MES se aplicó la carga lateral hasta un nivel de daño apreciable, el cual se observa en la Figura 8. Ese daño consistió en fisuras ubicadas principalmente sobre la diagonal del mismo.

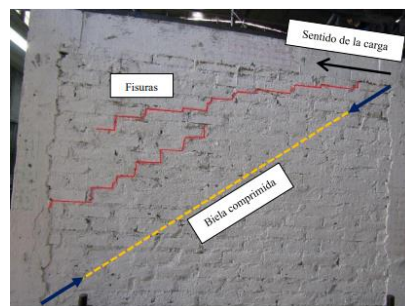


Figura 8: Estado del muro MES al final del ensayo.

En el caso del modelo computacional, el desplazamiento creciente en la viga de encadenado se aplicó hasta que falló la convergencia, por la plastificación generalizada en la mampostería por grandes deformaciones de tracción (lo cual se relaciona con el comportamiento experimental).

Las tensiones principales máximas de tracción en la mampostería del modelo MES se pueden apreciar en la Figura 9. Estas tensiones llegan a valores de 0,050 MPa en el sector superior derecho del continuo, que es el sector donde se presentaron fisuras en el ensayo (recordando que, según Tabla 1, la tensión de rotura a tracción de la mampostería fue estimada en 0,065 MPa). También se consideraron las deformaciones principales máximas de tracción en campo plástico, que muestran también una concentración en el sector donde se tienen las máximas tensiones de tracción (sin deformaciones plásticas en compresión). Por otra parte, se analizaron las tensiones principales mínimas de compresión, llegando a valores máximo de 0,20 MPa (también se especificó en Tabla 1 un valor de tensión de rotura a compresión de 0,65 MPa). En los encadenados se registraron tensiones máximas de compresión de 6,0 MPa, y de tracción de 4,5 MPa.

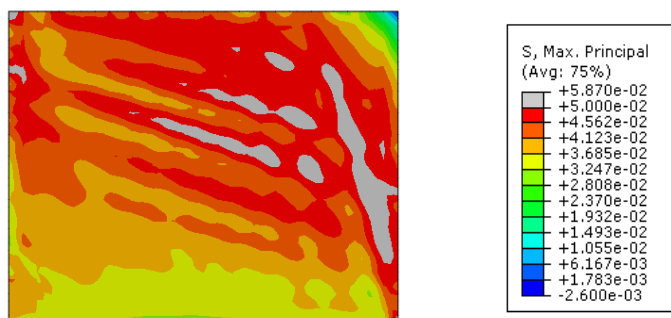


Figura 9: Distribución de tensiones principales máximas en la mampostería del modelo MES (carga desde la izquierda).

5.2 Muro de mampostería encadenada simple – MRAD

Repetido el ensayo en el muro MRAD, se aplicó la carga lateral hasta la falla por tracción en la armadura de la columna traccionada, sin daño visible en el encamisado.

Producida la falla de convergencia del modelo:

- . Las tensiones principales máximas de tracción en la mampostería alcanzaron valores de 0,030 MPa; mientras que las máximas de compresión llegan a 0,14 MPa; destacando que no se registraron deformaciones plásticas en la mampostería;

- . Las tensiones principales máximas de tracción en las placas de encamisado no superaron los 0,50 MPa, y las de compresión no alcanzaron los 4,0 MPa. Se observa entonces que estas placas no superaron los valores límites del campo elástico; y

- . Las armaduras de la columna traccionada alcanzan la plastificación, y en los otros elementos de encadenado las tensiones de tracción llegan a 3 MPa (con tensiones máximas de compresión de 10 MPa).

5.3 Respuesta numérica vs. experimental

Para las dos clases de modelos considerados en este trabajo se realizó la comparación de la respuesta numérica y experimental, tal como se aprecia en la Figura 10, referida a la acción aplicada a lo largo de la viga de encadenado y al desplazamiento horizontal en ese nivel.

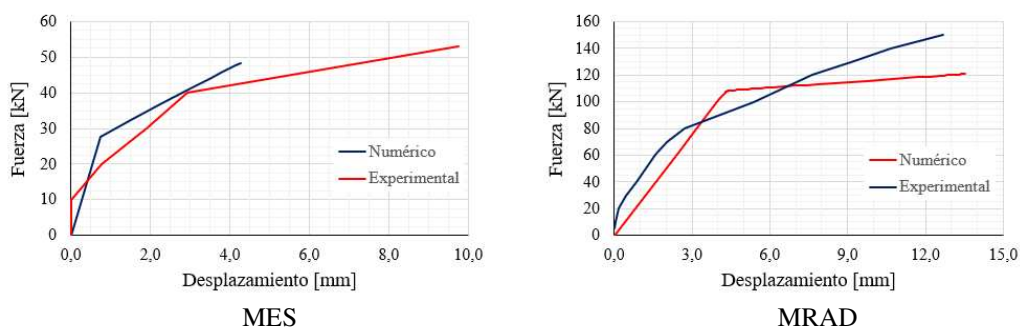


Figura 10: Respuesta carga – desplazamiento experimental vs. numérica.

6 CONCLUSIONES

Se han considerado en este trabajo los muros de mampostería para construcciones sometidas a acciones sísmicas, que integran la estructura de muchos edificios. En particular se analizaron los muros de mampostería encadenada simple, que podrían ser parte de las edificaciones diseñadas con reglamentos antiguos, y que podrían tener una capacidad menor a la requerida en los nuevos reglamentos. Se ha sumado también a este estudio la estrategia de refuerzo de muros mediante la incorporación de armadura distribuida y mortero proyectado.

Para los parámetros del muro encadenado simple considerado en este trabajo, el estado último se produjo por falla en la mampostería. Pero si ese mismo muro (sin sellado de fisuras) es encamisado con malla de acero y mortero proyectado, presenta una resistencia y rigidez mucho mayor, ya que el refuerzo funciona (por lo menos en el caso estudiado) como placa rígida del sistema. Para este segundo modelo estudiado el colapso se produjo por falla a tracción de la armadura de la columna traccionada, sin daño visible en el mortero proyectado.

Para determinar la resistencia que se logra con el refuerzo analizado, pueden aplicarse las expresiones de cálculo dadas en el reglamento argentino para construcciones sismorresistentes relativo a mampostería. Aunque nuevos estudios deberían confirmar la validez de estas fórmulas, así como la determinación de la rigidez de estos muros, y sus mecanismos de colapso.

Se destaca, además, que para analizar el desempeño sísmico de construcciones reforzadas es conveniente realizar al menos un análisis estático no lineal. Sin embargo, en el reglamento argentino y en la bibliografía consultada no se encontraron recomendaciones para simular la clase de muros seleccionada en este trabajo. Por eso, se buscó con la presente investigación avanzar en consideraciones sobre la simulación computacional de estas estructuras para análisis no lineal. Se destaca la complejidad de estas, ya que incluye elementos de hormigón armado, mampostería vinculada a esos elementos (mampuesto y morteros), con el agregado de encamisados con armadura distribuida y mortero.

Con la simulación propuesta se llegaron a valores de tensiones que se correspondieron con las observaciones experimentales, y a curvas fuerza – desplazamiento numéricas cercanas a las curvas obtenidas en ensayos.

Con estas simulaciones computacionales se podrían estudiar variaciones en el diseño de los muros tales como: distintas relaciones alto / largo del muro, existencia de ventanas, vinculación de la armadura de refuerzo también con la viga de fundación, etc. Y, principalmente, se podrían establecer leyes constitutivas macro, que permitan de forma simplificada representar el comportamiento de muros junto con el resto de la estructura de toda una construcción.

REFERENCIAS

- Alcocer, S., Muriá Vila, D., et al., Rehabilitación sísmica de la infraestructura física educativa de México. *INIFED – BANBRAS*, 2021.
- INPRES – CIRSOC 103 – Parte I y III, Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes. *INPRES - CIRSOC*, 2018.
- Oller S, Un modelo de daño continuo para materiales friccionales (tesis de doctorado), *Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona Tech*, 1988.
- Simulia, D. S. (2010). *Pawtucket, USA: Dassault Systemes*, 2010.