

EVALUACIÓN BASADA EN DESEMPEÑO DE EDIFICIOS ESCOLARES CON MUROS DE MAMPOSTERÍA ENCADENADA

PERFORMANCE-BASED ASSESSMENT OF SCHOOL BUILDINGS WITH CONFINES MASONRY

Gustavo L. Palazzo^a, Gonzalo M. Pardal^a y Santiago P. Las Heras^a

^a*CeReDeTeC, Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza, Rodríguez 271,
M5502AJE Ciudad de Mendoza, Argentina, gpalazzo@frm.utn.edu.ar, <http://www.frm.utn.edu.ar>*

Palabras clave: edificios existentes, estructuras con mampostería, vulnerabilidad sísmica.

Resumen. Las construcciones existentes en zonas sísmicas pueden resultar vulnerables frente a sismos, por haber sido diseñadas y construidas con reglamentos antiguos o sin ellos. Especial consideración debe prestarse a las construcciones de importancia social como son los edificios escolares. El reglamento argentino no tiene prescripciones actualizadas para evaluar construcciones existentes; por ello, se propone en este trabajo una metodología de evaluación confiable de estructuras con mampostería. La propuesta toma de referencia una norma americana actual, planteando una metodología simple que pueda aplicarse en la práctica profesional. Previo a la explicación de la propuesta y su aplicación en una estructura particular, se describe en el trabajo el edificio escolar seleccionado para el análisis. Se resalta en las conclusiones las ventajas y limitaciones de la metodología propuesta.

Keywords: existing buildings, masonry structures, seismic vulnerability.

Abstract. Existing buildings in seismic zones can be vulnerable to earthquakes, because they have been designed and built with or without old standards. Special consideration should be given to constructions of social importance such as school buildings. The Argentine standard does not have updated prescriptions to evaluate existing constructions; for this reason, a methodology for the reliable evaluation of masonry structures is proposed in this work. The proposal refers to a current American standard, proposing a simple methodology that can be applied in professional practice. Prior to the explanation of the proposal and its application in a particular structure, the school building selected for analysis is described in the paper. The advantages and limitations of the proposed methodology are highlighted in the conclusions.

1 INTRODUCCIÓN

En zonas de alta peligrosidad sísmica existen estructuras antiguas, cuya evaluación es necesaria para determinar la necesidad de un refuerzo estructural. Entre esas construcciones se encuentran aquellas cuyo colapso tiene gran repercusión, como son los edificios escolares. En estas edificaciones, y especialmente en países latinoamericanos, es común el empleo de muros de mampostería encadenada o de pórticos rellenos de mampostería como parte de la estructura sismorresistente.

El reglamento argentino para construcciones sismorresistentes ([INPRES – CIRSOC 103 – Parte I y III, 2018](#)) establece prescripciones para el análisis y diseño de las tipologías estructurales mencionadas, en base a un nivel de desempeño de seguridad de vida. Pero está referido principalmente a construcciones nuevas. Tampoco contempla metodologías de evaluación de desempeño que se han incorporado en reglamentos internacionales como el [ASCE/SEI 41 \(2017\)](#), dirigido especialmente a edificaciones existentes.

Esta evaluación basada en desempeño busca determinar en forma confiable el nivel de daño que puede producirse en una construcción bajo distintos niveles de demanda sísmica. Metodología que se considera particularmente necesaria en construcciones de importancia como hospitales, escuelas, etc. (construcciones del grupo Ao y A según el reglamento argentino mencionado).

En consonancia con esta temática, el objetivo de este trabajo es proponer una metodología de evaluación basada en desempeño tomando como base el reglamento argentino, pero considerando criterios de la norma americana mencionada. Se busca una propuesta de evaluación confiable para edificios escolares con mampostería en su estructura sismorresistente, que pueda aplicarse en la práctica profesional.

El estudio toma como base elementos estructurales con mampostería de un edificio escolar de la provincia de Mendoza, ubicado en la zona de Argentina de mayor peligrosidad sísmica.

El trabajo se desarrolla en otras cuatro secciones. En la siguiente (sección 2) se presentan las características generales del edificio escolar considerado, y de los planos estructurales seleccionados para este trabajo. Luego en la sección 3 se caracterizan los modelos computacionales para esos planos estructurales, realizado mediante un análisis estático no lineal. En la sección 4 se describe la metodología basada en desempeño propuesta en este trabajo, con datos obtenidos del análisis dinámico no lineal; y se muestra su implementación en un pórtico relleno de mampostería. Finalmente, en las conclusiones (sección 5) se resaltan las partes principales del trabajo y los resultados obtenidos

2 EDIFICIO ESCOLAR EN ESTUDIO

Los muros de mampostería considerados en este trabajo son parte de la estructura de un edificio escolar que se muestra en la [Figura 1](#). Esta construcción tiene dos niveles (de 3,50 m de alto cada uno), con planta rectangular de 36,20 m largo y 19,70 m de ancho. La estructura sismorresistente está conformada por pórticos de hormigón armado (con y sin relleno de mampostería), muros de mampostería encadenada simple, y losas de hormigón armado.



Figura 1: Edificio escolar en estudio.

En particular se estudiaron los planos estructurales indicados en [Figura 2](#), ubicados en la dirección transversal de 19,70 m de ancho, que corresponden a pórticos de hormigón armado rellenos de mampostería (caso 1 y 2). La luz de cada vano con mampostería fue de 7,15 m, con un pasillo de 5,40 m de ancho. Estos planos se diferencian en las características de las vigas de planta baja (PB) y planta alta (PA); en el caso 2, solo se tienen vigas de vinculación. Los parámetros geométricos generales de los elementos de hormigón armado se detallan en la [Tabla 1](#) (se indican las dimensiones de las secciones transversales en m, y los diámetros - db - de la armadura - A° - longitudinal en mm). Todos los elementos estructurales tenían estribos 1 db 6 c/20 cm. La resistencia característica del hormigón fue de 22 MPa en el caso de columnas y de 28 MPa en el caso de las vigas. Los parámetros mencionados se obtuvieron de la documentación disponible para el edificio escolar.

El peso sísmico total W del edificio fue de 13.482,67 kN (9,45 kN/m²); correspondiendo a los muros una carga vertical de 1493,51 kN en PB y de 1203,02 kN en PA (estas acciones se consideraron en la simulación computacional como cargas concentradas en las columnas de cada nivel).



a. Caso 1

b. Caso 2

Figura 2: Planos estructurales estudiados.

	Columnas	Vigas (caso 1)	Vigas (caso 2)
PB	Sec. 0,50 * 0,27 A° sup.: 2 db 16 A° inter.: 2 db 16 A° inf.: 2 db 16	Sec. 0,87 * 0,27 A° sup.: 5 db 12 A° inter.: 2 db 10 A° inf.: 5 db 12	Sec. 0,18 * 0,18 A° sup.: 2 db 8 A° inf.: 2 db 8
PA	Sec. 0,50 * 0,27 A° sup.: 2 db 14 A° inter. 1: 2 db 14 A° inter.2: 2 db 14 A° inf.: 2 db 14	Sec. 0,87 * 0,27 A° sup.: 4 db 12 A° inter.: 2 db 10 A° inf.: 4 db 12	Sec. 0,18 * 0,18 A° sup.: 2 db 8 A° inf.: 2 db 8

Tabla 1: Parámetros generales de las vigas y columnas.

Para la mampostería se consideró ladrillo cerámico macizo, con mortero de resistencia normal, con peso específico de 17 kN/m^3 . Su resistencia especificada a la compresión y su resistencia especificada al corte fueron definidas según los valores indicativos de Tabla 2.4 y 2.5 del [INPRES – CIRSOC 103 – Parte III \(2018\)](#). El módulo de elasticidad longitudinal de la mampostería se estimó según la ec. [2-9] del reglamento mencionado.

3 CARACTERIZACIÓN DE LOS PLANOS ESTRUCTURALES EN ESTUDIO

En esta sección se caracterizan los planos estructurales en estudio en base al análisis estático no lineal. En la primera parte se describen los modelos computacionales considerados para este análisis. Luego se realizan cálculos aproximados según un análisis seccional. Finalmente, como resultados de este análisis se muestran mecanismos de colapso y curvas de corte basal vs. desplazamiento en el techo.

3.1 Simulación computacional

En la [Figura 3](#) se presentan los modelos computacionales para los pórticos rellenos de mampostería antes identificados como casos 1 y 2, desarrollados en el programa SeismoStruct ([Seismosoft, 2021a](#)). También se analizaron esas estructuras sin la mampostería, considerando el requerimiento del [INPRES – CIRSOC 103 – Parte I \(2018\)](#), en lo referente a pórticos con rellenos con interferencias.

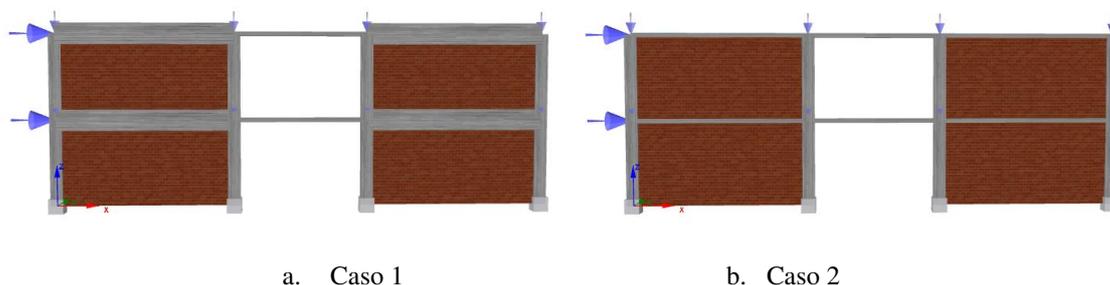


Figura 3: Planos estructurales estudiados.

Los modelos de los planos estructurales con mampostería se basaron en simulaciones similares que se describen en el documento de verificaciones de SeismoStruct ([Seismosoft, 2021b](#)): *one storey, single bay infilled frame*; *one storey, single bay infilled frame*; *multi-storey 3D frame, multi-storey; 2D infilled frame*; y *half scale, three-storey, three-dimensional infilled RC frame*.

Para la armadura de los elementos de hormigón armado se consideró el modelo de Menegotto-Pinto para acero (identificado como `stl_bl` en el software), con un módulo de elasticidad de 200.000 MPa , límite de fluencia de 420 MPa , y peso específico de 78 kN/m^3 (asignando a los otros 5 parámetros de este modelo según los valores que por defecto se indican en el programa). Mientras que el hormigón fue simulado con el modelo no lineal de Mander (con `ma` en el programa), con resistencia a la compresión según las magnitudes indicadas en la sección 2, módulo de elasticidad obtenido como 4.700 por la raíz cuadrada del valor anterior, y peso específico de 24 kN/m^3 . Como en el caso de la armadura, los otros dos parámetros de este modelo se fijaron según los valores por defecto asignados en el programa.

Todos los elementos de hormigón armado se simularon con elementos inelásticos de pórtico con rótula plástica (denominados `infrmFBPH`). Este elemento presenta una inelasticidad distribuida, pero concentra dentro de una región determinada del elemento. Se

consideraron 100 fibras en la sección transversal, con una longitud de rótula plástica del 16,67%.

La mampostería se simuló con el elemento inelástico *infill panel* (denominado infill en el programa). Se trata de un elemento de mampostería definido por cuatro nodos, para el modelado de la respuesta no lineal de los paneles divisorios o de cerramiento en estructuras tipo pórtico. Cada panel es representado por seis bielas; cada dirección diagonal está caracterizada por dos bielas paralelas que transmiten la carga a través de dos esquinas opuestas en diagonal, y por una tercera que transmite el corte desde la parte superior hacia la parte inferior del panel. Las bielas con carga axial utilizan un modelo histerético para bielas de mampostería, mientras que la biela de corte utiliza un modelo histerético bi-lineal. Para las bielas bajo carga axial se necesitan definir 17 parámetros, y 4 para las de corte. Otros 9 parámetros deben también especificarse para este elemento. Para la presente simulación se consideraron los datos indicados en la sección 2: módulo de elasticidad, resistencia a la compresión, resistencia a corte, espesor del muro, área de la biela equivalente y peso específico); manteniendo, como en los modelos anteriores, los demás parámetros según valores por defecto indicados en el programa.

3.2 Análisis previo

Realizando un análisis seccional para el pórtico sin mampostería, se llegó a que la resistencia de diseño de las columnas de PB fue de 169,0 kNm, mientras que para las vigas de ese nivel la resistencia fue de 292,43 kNm (ambas resistencias determinadas con la planilla de cálculo [CIRSOC – FLEX, 2021](#)). Estos valores indican que el mecanismo de colapso probable para el pórtico sin el relleno de mampostería sería el de rótulas en base y capitel de las 4 columnas de PB. Para este estado último, la capacidad de corte basal aproximado del pórtico sin el relleno de mampostería es de 386,29 kN.

Al considerar la mampostería, y en la suposición de muro de encadenado simple con parámetros según la sección 2, su resistencia de diseño a corte fue de 418,61 kN (para los dos muros de PB, sin considerar la tensión media de compresión que actúa sobre el muro, y de acuerdo con la ec. [4.4] del [INPRES – CIRSOC 103 – Parte III, 2018](#)).

Podría estimarse entonces una resistencia de diseño del pórtico con relleno de mampostería de 804,90 kN.

3.3 Análisis estático no lineal

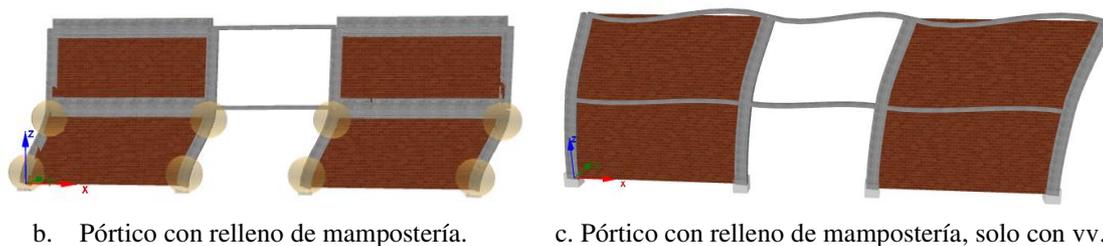
Como resultado del análisis estático no lineal se presenta en la [Figura 4](#) el mecanismo de colapso de las distintas configuraciones del plano estructural.



a. Pórtico sin mampostería.

b. Pórtico sin mampostería, solo con vigas de vinculación.

Figura 4: Mecanismos de colapso según el análisis estático no lineal.



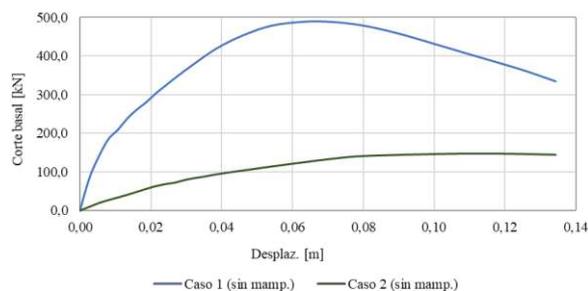
b. Pórtico con relleno de mampostería.

c. Pórtico con relleno de mampostería, solo con vv.

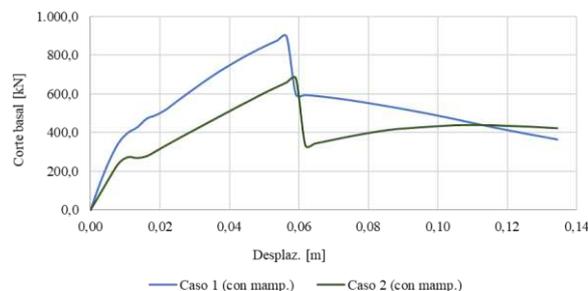
Figura 4 (cont.): Mecanismos de colapso según el análisis estático no lineal.

El pórtico con o sin relleno de mampostería presenta un mecanismo de colapso de piso flexible, tal como se sugirió en la sección anterior. Cuando en el pórtico se tienen solo vigas de vinculación, y sin considerar el relleno de mampostería, las columnas responden aproximadamente como un sistema de columna empotrada – libre. Al incorporar en este modelo la mampostería, no se observaron rótulas en las columnas para el esquema de carga lateral aplicada.

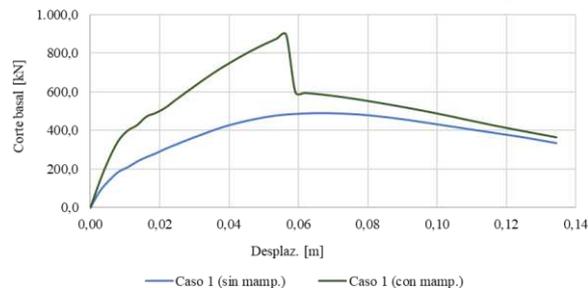
En la Figura 5 se comparan las respuestas corte basal – desplazamiento en el techo, para las distintas configuraciones analizadas.



a. Caso 1 vs. caso 2 (sin relleno de mampostería)



b. Caso 1 vs. caso 2 (con relleno de mampostería).



c. Caso 1 con/sin mampostería

Figura 5: Curva corte basal – desplazamiento en el techo.

De la [Figura 5 – a](#) se observa que el corte basal máximo del pórtico sin relleno de mampostería es de 491,01 kN, valor que se reduce a 148,04 (reducción del 70%) cuando ese pórtico tiene solo vigas de vinculación.

Al comparar en la [Figura 5 – b](#) el pórtico sin y con relleno de mampostería, se destaca que el corte basal máximo pasa de 491,01 kN a 898,49 kN (aumento del 83%); es decir con valores similares a los estimados con el análisis seccional de la sección anterior.

Se destaca además en la [Figura 5 - b](#) que el pórtico con mampostería presenta una reducción importante de su capacidad cuando la distorsión horizontal de PB es aprox. del 1,0 %.

En los pórticos rellenos de mampostería de los casos 1 y 2 ([Figura 5 – c](#)), el corte basal pasa de 898,49 kN a 680,20 kN (reducción del 24%).

4 EVALUACIÓN BASADA EN DESEMPEÑO

La metodología propuesta para realizar una evaluación basada en desempeño de muros de mampostería encadenada, o de pórticos rellenos de mampostería, se describe a continuación. También se detallan las principales características del análisis dinámico no lineal necesario para esta evaluación. Y en la última parte se muestra la aplicación del método propuesto a uno de los planos estructurales considerados en el trabajo.

4.1 Procedimiento propuesto y niveles de desempeño buscados

Se propone evaluar los pórticos rellenos de mampostería, o los muros de mampostería encadenada, según dos niveles de demanda sísmica: el sismo de diseño, y el terremoto máximo considerado, tomando de referencia la demanda sísmica del reglamento argentino.

La respuesta para ambos niveles de demanda se obtiene de un análisis dinámico no lineal del modelo estructural. En el caso del sismo de diseño, se controlará en cada nivel de la estructura que la distorsión horizontal de piso sea inferior al 0,5%. Este valor máximo es el considerado en las [Normas Técnicas mexicanas de Mampostería \(2020\)](#), y se corresponde con la reducción de la capacidad del pórtico relleno con mampostería destacada en la [Figura 5 – b](#).

Para el sismo máximo considerado se comparará en PB: (i) la demanda promedio del análisis dinámico no lineal; con (ii) la capacidad a corte según la curva corte basal vs. desplazamiento en el techo, para el desplazamiento máximo promedio obtenido en el análisis mencionado.

Para muros de mampostería encadenada se deberán verificar también los encadenados según las prescripciones del [INPRES – CIRSOC 103 – Parte III \(2018\)](#).

En el caso de pórticos rellenos de mampostería deben también considerarse los otros modos de falla que se indican en los comentarios del [INPRES – CIRSOC 103 – Parte I \(2018\)](#): falla por corte de las piezas del pórtico en las zonas próximas a los nudos, falla por corte de las columnas debido a la disminución de la altura libre causada por fallas por corte en juntas intermedias del panel de mampostería, y falla por compresión de las columnas debido al momento global (“momento de vuelco”) incrementado a consecuencia del aumento de rigidez del pórtico rigidizado. Ecuaciones de cálculo de estas esta clase de falla se pueden encontrar en el capítulo 4 de las [Normas Técnicas mexicanas de Mampostería \(2020\)](#).

4.2 Análisis dinámico no lineal aplicado a la estructura en estudio

El procedimiento de evaluación basada en desempeño propuesto se aplica ahora al pórtico relleno con mampostería mostrado en la [Figura 3 - a](#). La simulación computacional de este plano estructural para el análisis dinámico no lineal es la misma que para el análisis estático no lineal presentado en la sección 3.1. Varía en este caso la demanda sobre la estructura. Así,

en el análisis dinámico se consideró una demanda sísmica debida a siete registros sísmicos de falla lejana. Estos registros fueron seleccionados considerando las prescripciones del ASCE/SEI 41 (2017) y la base de datos propuesta en el anexo A del FEMA P695 (2009). Estos registros fueron escalados considerando también los criterios de la norma americana. En el escalamiento se tomó como referencia el espectro de diseño del INPRES – CIRSOC 103 – Parte I (2018). Como en el reglamento argentino no está definido el terremoto máximo considerado (MCER), se obtuvo el espectro para este nivel de demanda multiplicando el espectro de diseño por 1,5 (de acuerdo con el criterio del ASCE/SEI 7, 2016).

En la [Tabla 2](#) se indican los principales parámetros de los registros seleccionados, cuyos espectros de respuesta escalados según el sismo de diseño del reglamento argentino son mostrados en la [Figura 6](#).

ID No.	M	Year	Name	Station	Site Data	Fault type	PGA _{máx} g	PGA _{máx} scaled [g]
1	6,7	1.994	Northridge	Beverly Hills - Mulhol	D	Thrust	0,52	0,41
2	6,7	1.994	Northridge	Canyon Country WLC	D	Thrust	0,48	0,46
18	7,0	1.992	Cape Mendocino	Rio Dell Overoass	D	Thrust	0,55	0,62
19	7,6	1.999	Chi-Chi Taiwan	CHY 101	D	Thrust	0,44	0,68
20	7,6	1.999	Chi-Chi Taiwan	TCU 045	C	Thrust	0,51	0,65
21	6,6	1.971	San Fernando	LA-Hollywood Stor	D	Thrust	0,21	0,48
22	6,5	1.976	Friuli, Italy	Tolmezzo	C	Thrust	0,35	0,72

Tabla 2: Parámetros de los acelerogramas seleccionados.

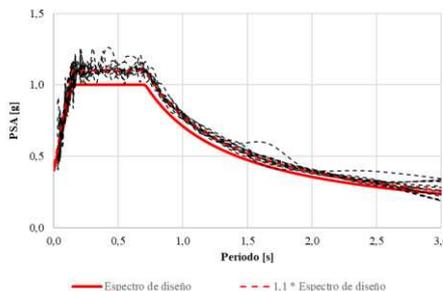


Figura 6: Espectros de acelerogramas escalados al espectro de diseño.

4.3 Evaluación basada en desempeño en el caso de estudio

Realizado el análisis dinámico no lineal para los siete registros escalados según el espectro de diseño del reglamento argentino, se determinó para PB y PA la distorsión horizontal de piso. Los valores obtenidos se muestran en la [Figura 7](#).

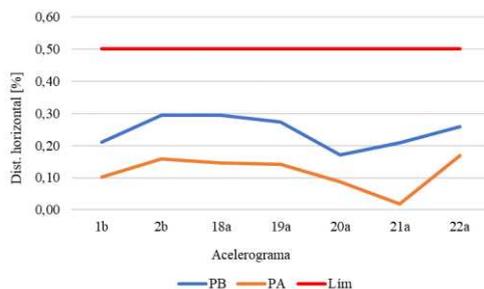


Figura 7: Distorsión horizontal de piso para acelerogramas escalados según el espectro de diseño.

Del análisis dinámico no lineal, para los siete registros escalados según el espectro MCER, se determinó el corte basal, según se aprecia en la Figura 8. El valor límite se estableció según el máximo corte obtenido en el análisis estático no lineal, afectado por el factor de reducción de resistencia de 0,8 indicado en el reglamento argentino.

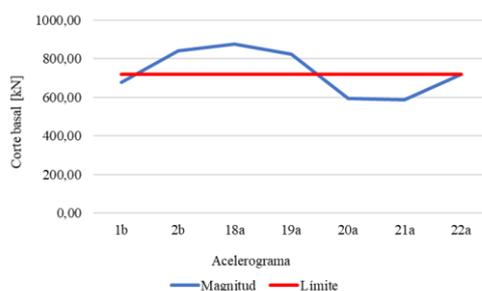


Figura 8: Corte basal para acelerogramas escalados según el espectro MCER.

De acuerdo con esta evaluación de desempeño se concluye:

- . Para el sismo de diseño, el plano estructural considerado presenta distorsiones horizontales de piso inferiores al valor límite; y

- . Para el sismo MCER, el plano estructural considerado tiene demandas de corte basal en algunos casos superiores al valor límite. Es necesario entonces un refuerzo estructural para lograr que la estructura cumpla con los niveles de desempeño establecidos.

5 CONCLUSIONES

El reglamento argentino considera modelos simples para el análisis y diseño de estructuras de mampostería o de pórticos rellenos de mampostería. Para el caso de construcciones existentes es necesario contar con metodologías de evaluación confiables, que indiquen si es necesario o no realizar un refuerzo estructural.

La evaluación basada en desempeño logra responder de manera confiable a esta problemática, ya que considera parámetros de respuestas relacionados con el daño estructural para distintos niveles de demanda sísmica. Una metodología de esta clase se presenta en forma general para distintas configuraciones de materiales y de estructuras en el ASCE/SEI 41 (2017). Aunque estas estrategias no son de fácil aplicación para la práctica profesional, y no consideran en particular los muros de mampostería encadenada de uso habitual en construcciones latinoamericanas.

Por ello en este trabajo se propuso una metodología de evaluación basada en desempeño para construcciones con mampostería en obras de importancia (como los edificios escolares), tomando como referencia el reglamento argentino. Se hace el control de distorsiones horizontales de piso y de demandas vs. resistencias prescritos en el reglamento, pero en base a dos niveles de demanda sísmica, y considerando parámetros de respuestas obtenidos de un análisis estático y dinámico no lineal.

Se cuenta así con un procedimiento que se estima posible de aplicación en la práctica profesional, que permite de manera confiable evaluar ante demandas sísmicas el desempeño de construcciones con mampostería.

Como trabajo a futuro, y a los efectos de lograr mayor confiabilidad en las simulaciones computacionales que permiten estimar el desempeño de estructuras con mampostería, es necesario contar con nuevas contrastaciones experimentales. Es necesario obtener información de ensayos de las tipologías estructurales con mampostería empleadas en países latinoamericanos, y de los parámetros fundamentales que es necesario obtener en esas

construcciones existentes para incorporar en los modelos.

REFERENCIAS

- ASCE/SEI 7, Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. *American Society of Civil Engineers*, 2016.
- ASCE/SEI 41, Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. *American Society of Civil Engineers*, 2017.
- CIRSOC-FLEX, CIRSOC-FLEX_Design and Verification - Estructuras de Hormigón Armado. *INTI-CIRSOC*, 2021.
- FEMA P695, Quantification of building seismic performance factors. *Federal Emergency Management Agency*, 2009
- INPRES – CIRSOC 103 – Parte I, Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes, Parte I: Construcciones en general. *INTI-CIRSOC*, 2018.
- INPRES – CIRSOC 103 – Parte III, Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes, Parte III: Construcciones de mampostería. *INTI-CIRSOC*, 2018.
- Normas Técnicas mexicanas de Mampostería, Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería con comentarios. *Gobierno de la Ciudad de México*, 2020.
- Seismosoft, SeismoStruct 2021 – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures, available from <http://www.seismosoft.com>, 2021a.
- Seismosoft, SeismoStruct, Verification Report. For version 2021. *Seismosoft Ltd*, 2021b.