

Artículo original

ELABORACIÓN DE CURVAS DE FRAGILIDAD DE MUROS DE DUCTILIDAD LIMITADA DE 10 CM. DE ESPESOR, BASADOS EN ENSAYOS EXPERIMENTALES; PERIODO 2011 – 2015.

Elaboration of fragility curves of walls of limited ductility of 10 cm of thickness, based on experimental tests. Period 2011-2015.

Dina Marlene Cotrado Flores¹

RESUMEN

La presente investigación tuvo por finalidad contribuir en el estudio de vulnerabilidad sísmica en edificios de muros de ductilidad limitada. Para ello, se ha elaboró curvas de fragilidad en muros de ductilidad limitada de 10 cm de espesor según PACT del FEMA P-58. Se recopiló información de 20 ensayos experimentales realizados en el laboratorio de estructuras del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres de la Universidad Nacional de Ingeniería. Las curvas de fragilidad expresan la probabilidad de que un muro de ductilidad limitada alcance o exceda un estado de daño seleccionado para un nivel de deriva o desplazamiento dado. De las curvas de fragilidad se puede observar que la probabilidad de exceder el 50% del estado de daño 2 (máxima resistencia del muro) es: 13mm para el MDL-CCA1, 16mm para el MDL-CCA2, 20mm para el MDL-CCA3, 2mm para el MDL-CCA4, 4mm para el MDL-CCA5, 4mm para el MDL-CCA6, 5mm para el MDL-CCA7, 4mm para el MDL-CCA8, y 4mm para el MDL-CCA9. Se concluye que las curvas de fragilidad desarrollada en este proyecto son una herramienta muy útil para posteriores estudios de evaluación de la vulnerabilidad sísmica en edificios de muros de ductilidad limitada de 10 cm de espesor.

Palabras claves: Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL), curvas de fragilidad, vulnerabilidad.

ABSTRACT

The present research aimed to contribute to seismic vulnerability in buildings of limited ductility walls. For this, fragility curves have been developed in walls of limited ductility of 10 cm of thickness according to the PACT of the P-58 FEMA. Data were collected from 20 experimental tests carried out in the structure laboratory of the Peruvian Center for Seismic Investigation and Disaster Mitigation of the National University of Engineering. Fragility curves express the probability that a limited ductility wall will reach or exceed a selected damage state for a given drift or displacement level. From the fragility curves it is possible to observe that the probability of exceeding 50% of damaging state 2 (maximum wall strength) is: 13mm for MDL-CCA1, 16mm for MDL-CCA2, 20mm for MDL- 2mm for MDL-CCA9, 4mm for MDL-CCA5, 4mm for MDL-CCA6, 5mm for MDL-CCA7, 4mm for

MDL-CCA8, and 4mm for MDL-CCA9. It is concluded that the fragility curves developed in this project are a very useful tool for further studies of seismic vulnerability evaluation in buildings of walls of limited ductility of 10 cm thickness.

Keywords: Limited Ductility Walls (EMDL), fragility curves, vulnerability.

INTRODUCCIÓN

Un gran número de viviendas tienen un sistema estructural conformado por muros de concreto de 10 cm de espesor, de baja resistencia (100Kg/cm²) y acero de refuerzo mínimo. Este nuevo sistema estructural se utilizaba en las construcciones de viviendas populares de 1 y 2 pisos. Así también se observan edificios de 5, 6 o 7 pisos conformados por un sistema estructural de muros de concreto de 10 a 12 cm de espesor con una sola malla de cuantía mínima y una resistencia del concreto de 175Kg/cm², sin vigas ni columnas. A este tipo de sistema estructural se le denominó Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL). En el 2003 las empresas constructoras proponen el uso de losas de transferencia con pisos que varían de 8 a 10. Hasta esa fecha no existía códigos de diseño para este sistema estructural. Considerando que en el Laboratorio de Estructuras del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres de la Universidad Nacional de Ingeniería (CISMID-UNI) se han realizado varios ensayos en muros de ductilidad limitada, se propone el presente estudio, en el cual se han desarrollado curvas de fragilidad de muros de ductilidad limitada de 10 cm de espesor en base a los resultados experimentales realizados en el CISMID-UNI. Las curvas de fragilidad permiten estimar la probabilidad de exceder un estado límite de daño y se pueden desarrollar para componentes estructurales y no estructurales o edificios. En este trabajo, las curvas de fragilidad se han obtenido siguiendo los lineamientos del FEMA P-58. En los años 2011-2015 el CISMID-UNI desarrolla el proyecto de fortalecimiento de tecnologías para la mitigación de desastres por sismos y tsunamis en el Perú, patrocinado por la Agencia de Ciencias y Tecnologías del Japón (JST) y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) bajo el marco de la "Asociación para la Investigación

¹ Magíster en Ingeniería Civil con mención en estructuras.
Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil - UPT

Científica y Tecnológica para un Desarrollo Sostenible (SATREPS). Se creó una base de datos de ensayos de laboratorio realizados en elementos estructurales como son muros de albañilería y los muros de ductilidad limitada y fue publicada en la página oficial del CISMID (<http://www.cismid-uni.org/wallx/>). Estos ensayos contribuyen con información para estudios de vulnerabilidad sísmica en edificios de muros de ductilidad limitada (EDML) de 10 cm de espesor. A nivel mundial, el Perú es uno de los países de mayor potencial sísmico debido a que forma parte del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico (Tavera, H. y Bernal, I., 2002). Tradicionalmente las viviendas se hacían con muros de albañilería confinada. A partir del 2001 se comienza a usar el sistema de muros portantes, con muros de concreto armado de ductilidad limitada (Blanco, A., 2002). En el 2003, este nuevo sistema condujo en algunos casos a soluciones estructurales. Se hicieron algunos edificios de mediana altura (8, 10 pisos) con muros delgados y edificios con losas de transferencia (Delgado, R y Peña, C., 2006). Es sabido que el 70% de las viviendas son construidas informalmente. La informalidad genera grandes riesgos para la vida y la propiedad. Se estima que un tercio del PBI de la construcción en el Perú es informal (CAPECO, 2015).

La capacidad de un elemento o un conjunto de elementos estructurales de resistir desplazamientos cuando está sujeto a acciones. Este parámetro es expresado como la relación de fuerza y desplazamiento. La rigidez gráficamente es la pendiente tangente a un punto cualquiera en la curva o lo que es lo mismo la derivada de esa función en un punto dado. Resistencia o capacidad estructural es la capacidad un elemento o un sistema estructural de resistir cargas y que depende del uso de la estructura. La resistencia es usualmente definida como función del tipo de acción. Las resistencias a carga axial, momento y cortante son empleadas para cuantificar la capacidad de una estructura y sus elementos en ingeniería sísmica. Ductilidad es la habilidad de un elemento o sistema estructural de deformarse más allá del límite elástico con aceptable reducción de la rigidez y resistencia (Marte, C., 2014). Las Edificaciones de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL) se caracterizan por tener un sistema estructural donde la resistencia sísmica y de cargas de gravedad está dada por muros de concreto armado de espesores reducidos. Se entiende por fragilidad a la probabilidad de que se produzca algún suceso indeseable en función de alguna medida de excitación ambiental. La vulnerabilidad mide la probabilidad de pérdida y las funciones de esta también son conocidas como funciones de daño, funciones de pérdida, curvas de vulnerabilidad, entre otros (Porter, K., 2016).

Según Zavala, las curvas de histéresis poseen degradación de rigidez significativa con capacidad de disipación de energía moderada. Este hecho es reflejado también por el efecto de estrangulamiento de los lazos de histéresis (Zavala, C. y Gálvez, V., 1998). San Bartolomé y Muñoz refieren que la falla por deslizamiento debe evitarse al ser muy peligrosa sobre todo en muros con una sola línea de refuerzo. Esta falla debe considerar una deriva máxima de 0.005 junto con un factor de reducción sísmica $R=3$ (San Bartolomé A., 2006). Medina afirma que a pesar de existir estudios previos, esta información es muy reducida. Faltan estudios teóricos que complementen los ensayos (Medina, G., 2005).

Almeida encontró en su trabajo que el comportamiento y falla de los muros fue controlado por corte (Almeida, F., 2015). Las curvas de fragilidad estiman la probabilidad de exceder un determinado estado de daño y las curvas de consecuencias proporcionan los costos y tiempos de reparación para cada estado de daño (Acero, J., 2016).

En el año 2003, se forma una comisión en el Colegio de Ingenieros del Perú y en el mes de diciembre de 2004, el Ministerio de Vivienda, Construcción y saneamiento publica en el diario El Peruano, la resolución respectiva dando valor oficial a estas nuevas normas.

La recopilación de la información que a continuación se muestra, se encuentra especificada en las Normas Técnicas de Edificaciones E.030 y E.060, del Reglamento Nacional de Edificaciones.

OBJETIVOS

- Caracterizar el comportamiento sísmico de los muros de ductilidad limitada de los ensayos cíclicos realizados en el CISMID-UNI.
- Identificar en las curvas de capacidad los umbrales de desplazamiento para tres estados de daños DS1 (Inicio del agrietamiento), DS2 (resistencia pico) y DS3 (deriva que implica una resistencia posterior a la resistencia pico).
- Establecer valores de distorsiones permisibles para diferentes estados de daños mediante la elaboración de curvas de fragilidad según la librería del PACT del FEMA P 58.

METODOLOGÍA

Investigación pura. Diseño de investigación explicativo. Se ha adaptado a conveniencia la data experimental existente del CISMID. En base a los resultados de los ensayos experimentales se realizó un análisis del comportamiento sísmico y posterior elaboración de las curvas de fragilidad según el FEMA P-58, para tres estados de daños: **DS1**, donde se

inicia el agrietamiento, **DS2** en la resistencia pico y **DS3** en la resistencia última. La unidad de análisis fueron los muros de ductilidad limitada de 10 cm de espesor, para una resistencia $f'c=175$ kg/cm². Para la medición del estado de daño, se utilizó una medida de deriva en radianes y desplazamientos en mm. Para la carga máxima, se utilizó una medida cuantitativa en Tn (Tonelada). Para el Desplazamiento, se utilizó una medida cuantitativa en mm (milímetro). La población de estudio fueron 20 muros de ductilidad limitada de 10 cm de espesor. Se elaboraron curvas de fragilidad de muros de ductilidad limitada tomando como referencia los ensayos realizados en 20 muros de ductilidad limitada en el Laboratorio de Estructuras del CISMID-UNI. Ingresado los datos y con ayuda de hojas de cálculo de MS Excel, se han desarrollado curvas de fragilidad basadas en deriva y desplazamiento para los tres estados de daños o estados límites. Para la elaboración de la curva se ha empleado una distribución paramétrica lognormal. En lo que respecta a interpretación de las curvas, nos enfocamos en dos aspectos. En primer lugar, a la lectura de la deriva de 5/1000, y a la probabilidad de exceder el 50% de daños para el estado límite 2. Las principales técnicas que se utilizaron para la recolección de datos fueron: Investigación bibliográfica, recolección de datos de la fase experimental y observación experimental en muros de ductilidad limitada mediante visitas realizadas al CISMID-UNI, y Entrevistas a especialistas del CISMID-UNI y PUCP (Pontificia Universidad Católica del Perú).

RESULTADOS

En la figura 1 observamos que para una deriva de 5/1000, la probabilidad de que se inicie el estado de daño 1 es del 100%. Existe un 50% de probabilidad de que existan grietas diagonales en forma de "X" en la superficie del muro (estado de daño 2 o estado límite 2) para un nivel de deriva de 6/1000 o un desplazamiento de 13mm como se muestra en el caso de la figura 2. En las curvas de fragilidad MDL – CCA2 (figura 3), la probabilidad de que se inicie el estado de daño 1 es del 100% y para que se inicie el estado de daño 2 es del 50% o un desplazamiento de 16 mm (figura 4). En las curvas de fragilidad MDL – CCA3 (figura 5) muestra la probabilidad de que se inicie el estado de daño 1 es del 100% y para que se inicie el estado de daño 2 es del 2%. Existe un 50% de probabilidad de que existan grietas diagonales en forma de "X" en la superficie del muro (estado de daño 2 o estado límite 2) para un nivel de deriva de 8.3/1000 o un desplazamiento de 20mm para el caso de la figura 6. En las curvas de fragilidad MDL – CCA4 (figura 7), existe una probabilidad de que el 100% de los muros hayan superado el estado de daño 1, 2, y 3. Se puede observar que existe un 50% de probabilidad de que existan grietas diagonales en forma de "X" en

la superficie del muro (estado de daño 2 o estado límite 2) para un nivel de deriva de 1/1000 o un desplazamiento de 2mm para el caso de la figura 8. En las **curvas de fragilidad MDL – CCA5**, para los tres estados de daños o estados límites de los muros MDL-11 (figura 9) se observa una probabilidad de que el 100% de los muros hayan superado el estado de daño 1 y 2, y el 99% de los muros se encuentren en el nivel de daño 3. Asimismo, en la figura 9 también se puede observar que existe un 50% de probabilidad de que existan grietas diagonales en forma de "X" en la superficie del muro (estado de daño 2 o estado límite 2) para un nivel de deriva de 1.8/1000 o un desplazamiento de 4mm para el caso de la figura 10. En las **curvas de fragilidad MDL – CCA6** de los muros MDL-12, 22, 23, y 24. (figura 11), se observa una probabilidad de que el 100% de los muros hayan superado el estado de daño 1 y 2, y el 83% de los muros se encuentren en el nivel de daño 3. En la figura 11 se puede observar que existe un 50% de probabilidad de que existan grietas diagonales en forma de "X" en la superficie del muro (estado de daño 2 o estado límite 2) para un nivel de deriva de 1.9/1000 o un desplazamiento de 4 mm para el caso de la figura 12. En las curvas de fragilidad MDL – CCA8 de los muros MDL-17, 18, y 19., Seguidamente se tiene las curvas de fragilidad para los tres estados de daños o estados límites del muro MDL-15. En la figura 13, se observa una probabilidad de que el 100% de los muros hayan superado el estado de daño 1 y 2, y el 75% de los muros se encuentren en el nivel de daño 3. Para estos muros, en la figura 13 se puede observar que existe un 50% de probabilidad de que existan grietas diagonales en forma de "X" en la superficie del muro (estado de daño 2 o estado límite 2) para un nivel de deriva de 2.2/1000 o un desplazamiento de 5mm para el caso de la figura 14. En las curvas de fragilidad MDL – CCA7 (figura 15), se observa una probabilidad de que el 100% de los muros hayan superado el estado de daño 1 y 2, y el 65% de los muros se encuentren en el nivel de daño 3. En la figura 15 se puede observar que existe un 50% de probabilidad de que existan grietas diagonales en forma de "X" en la superficie del muro (estado de daño 2 o estado límite 2) para un nivel de deriva de 2/1000 o un desplazamiento de 4 mm para el caso de la figura 16. En las curvas de fragilidad MDL – CCA9 se tiene las curvas de fragilidad para los muros MDL-20 y 21 (figura 17). Se observa una probabilidad de que el 100% de los muros hayan superado el estado de daño 1 y 2, y el 95% de los muros se encuentren en el nivel de daño 3. En la figura 17 se puede observar que existe un 50% de probabilidad de que existan grietas diagonales en forma de "X" en la superficie del muro (estado de daño 2 o estado límite 2) para un nivel de deriva de 2/1000 o un desplazamiento de 4mm para el caso de la figura 18.

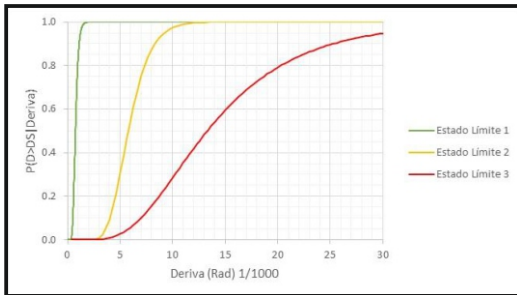


Fig. 1: Curva de fragilidad de MDL-CCA1 (Deriva)



Fig. 5: Curva de fragilidad de MDL-CCA3 (Deriva)

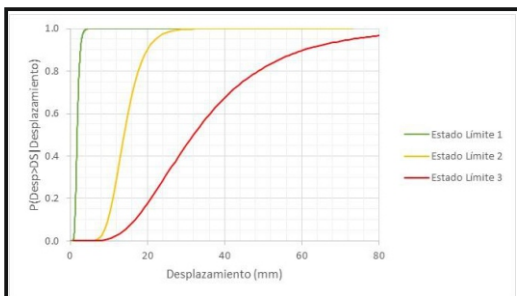


Fig. 2: Curva de fragilidad de MDL-CCA1 (Desplazamiento)



Fig. 6: Curva de fragilidad de MDL-CCA3 (Desplazamiento)

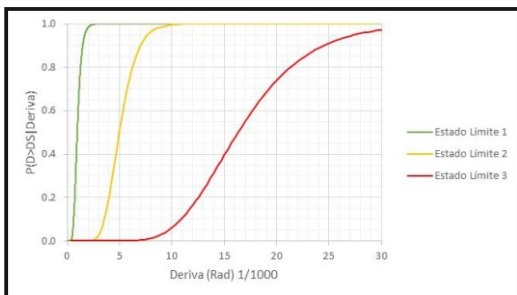


Fig. 3: Curva de fragilidad de MDL-CCA2 (Deriva)

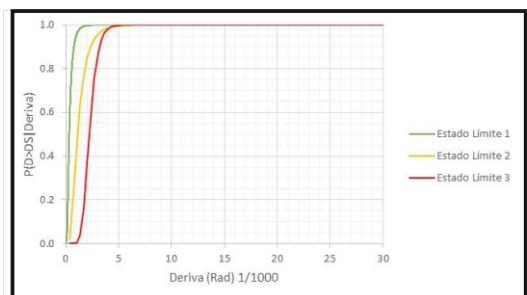


Fig. 7: Curva de fragilidad de MDL-CCA4 (Deriva)



Fig. 4: Curva de fragilidad de MDL-CCA2 (Desplazamiento)

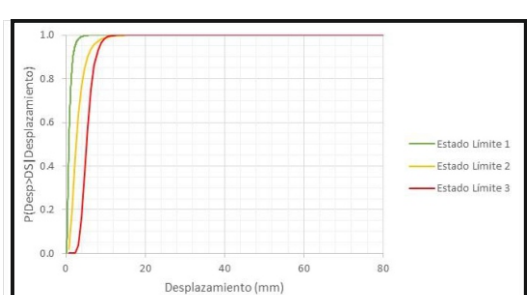


Fig. 8: Curva de fragilidad de MDL-CCA4 (Desplazamiento)

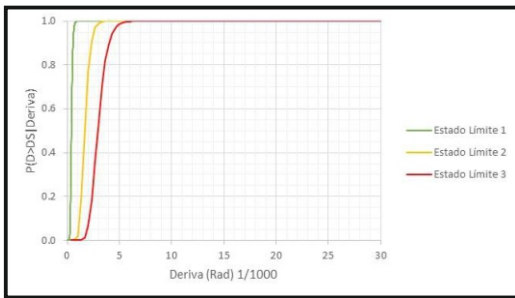


Fig. 9: Curva de fragilidad de MDL-CCA5 (Deriva)

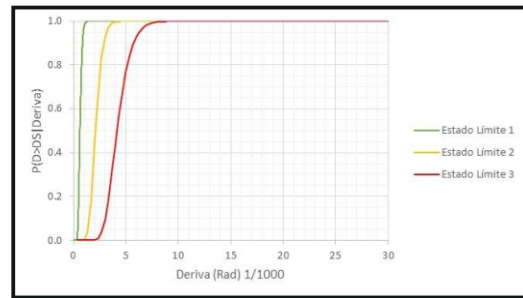


Fig. 13 Curva de fragilidad de MDL-CCA7 (Deriva)

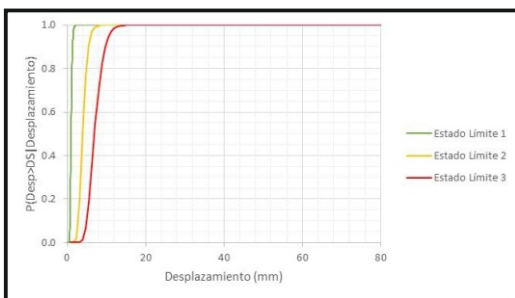


Fig. 10: Curva de fragilidad de MDL-CCA5 (Desplazamiento)



Fig. 14 Curva de fragilidad de MDL-CCA7 (Desplazamiento)

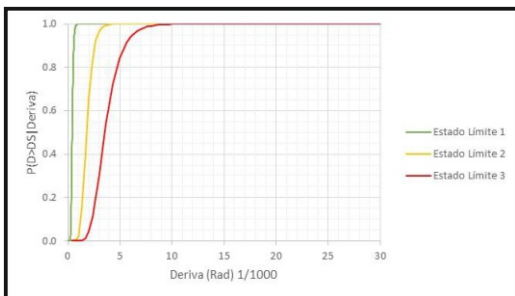


Fig. 11: Curva de fragilidad de MDL-CCA6 (Deriva)

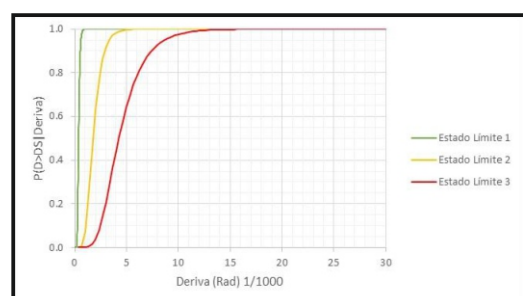


Fig. 15: Curva de fragilidad de MDL-CCA8 (Deriva)



Fig. 12: Curva de fragilidad de MDL-CCA6 (Desplazamiento)

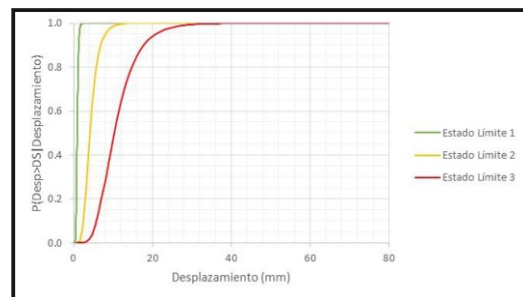


Fig. 16: Curva de fragilidad de MDL-CCA8 (Desplazamiento)

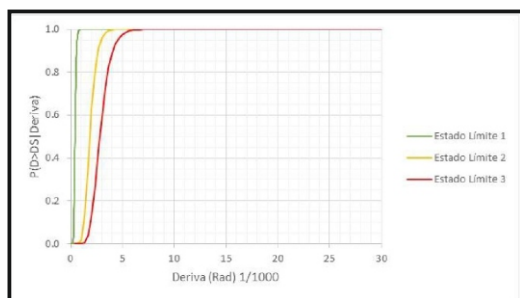


Fig. 17: Curva de fragilidad de MDL-CCA9 (Deriva)

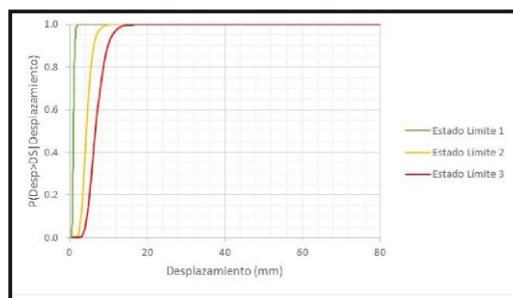


Fig. 18: Curva de fragilidad de MDL-CCA9 (Desplazamiento)

DISCUSIÓN

Se concluye que los edificios con muros delgados de hormigón armado proyectados con la versión anterior del código sísmico peruano [E.030, 2003], podrían presentar un comportamiento inadecuado; pero según la última versión del código [E.030, 2006], podría ser insuficiente.

Actualmente, la norma técnica E.030 "Diseño Sismorresistente" del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), indica que el límite para la distorsión de un edificio de concreto armado con muros de ductilidad limitada es 0.005 y con este sistema se puede construir como máximo 8 pisos; sin embargo, estos edificios tienen características muy especiales, por lo que existe discrepancia entre los especialistas en relación a su diseño y construcción. En uno de los últimos ensayos realizados por el CISMID en el mes de febrero del 2017, se pudo observar que la falla en la base se presenta para una distorsión de 5/1000 o 0.005, así como la rotura de la malla. Hoy en día existen grandes avances en la predicción del comportamiento sísmico de diferentes elementos estructurales; sin embargo, existen muchos tipos de construcciones por estudiar, en los que los modelos numéricos no proporcionan datos cercanos a la realidad debido a la falta de modelos calibrados con ensayos experimentales. Uno de los ensayos que se realiza con el propósito de conocer el comportamiento de un muro frente a cargas cíclicas que simula la acción de un sismo es el ensayo estático cíclico.

El Perú es un país sísmico, y las construcciones existentes son muy vulnerables, no sólo por la variedad de materiales que utilizamos durante la construcción de los edificios; sino también, por la informalidad durante el proceso constructivo. En ese sentido, para llevar a cabo diferentes estudios de vulnerabilidad y estimar las posibles pérdidas económicas en muros de ductilidad limitada y cualquier otro sistema estructural, es necesario primero estimar el daño que pudiera experimentar el

elemento estructural ante un posible evento sísmico. Es por ello que las funciones de fragilidad o curvas de fragilidad son una herramienta muy útil para estimar la vulnerabilidad sísmica de un edificio.

La evaluación del riesgo sísmico podría realizarse utilizando funciones de fragilidad. La fragilidad de las viviendas está relacionada con la vulnerabilidad sísmica y puede ser cuantificada por las curvas de fragilidad. Estas herramientas son importantes ya que los resultados obtenidos se utilizan para tomar decisiones con el fin de mitigar los daños generados por los terremotos (Suarez, M., 2015). Las curvas de fragilidad se elaboran para edificios o componentes estructurales y no estructurales de un edificio. En el Fema P-58, las curvas de fragilidad se denominan funciones de fragilidad para el caso de un componente estructural y no estructural, mientras que cuando se analiza un edificio generalmente lo denominan curvas de vulnerabilidad. Es necesario aclarar que en este estudio se ha elaborado curvas de fragilidad para Muros de Ductilidad Limitada (MDL), no para un Edificio de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL), sin embargo, estas curvas son una herramienta para calibrar valores de distorsión permisible en EMDL y pueden emplearse en la estimación de pérdidas económicas. Podemos concluir que el muro de ductilidad limitada MDL - 05 tuvo una mayor resistencia que el resto de los demás muros. Su curva promedio llega a una resistencia de 41tn y un desplazamiento máximo de 50 mm. El muro de ductilidad limitada MDL-17 tuvo una menor resistencia llegando a una resistencia máxima de 10tn y un desplazamiento máximo de 7 mm.

De las curvas de fragilidad se puede observar que la probabilidad de exceder el 50% del estado de daño 2 (límite permisible por la norma) es: 13mm para el MDL-CCA1, 16mm para el MDL-CCA2, 20mm para el MDL-CCA3, 2mm para el MDL-CCA4, 4mm para el MDL-CCA5, 4mm para el MDL-CCA6, 5mm para el MDL-CCA7, 4mm para el MDL-CCA8, y 4mm para el MDL-CCA9.

El estudio presentado contribuye con información para posteriores estudios de vulnerabilidad sísmica en edificaciones de muros de ductilidad limitada. Se recomienda a los encargados de elaborar nuevas normatividades revisar los límites permisibles de distorsión, ya que para un estado de daño 2 muchos de los muros ensayados sobrepasan los límites de reparabilidad indicado en la NTE E.030. Es recomendable establecer límites de distorsión o desplazamiento lateral asociados a varios estados de daño, para posteriores estudios de desempeño sísmico.

BIBLIOGRAFÍA

Acero, J. (2016). "Servicios de ensayos estructurales para determinar el comportamiento sísmico de muros de ductilidad limitada". Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

Almeida, F. (2015). "Análisis experimental de muros delgados de hormigón armado para viviendas de baja altura". Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile.

Blanco, A. (2002). "Los edificios de muros muy delgados de concreto y las nuevas normas para su diseño".

CAPECO. (2015). El mercado de edificaciones urbanas en Lima Metropolitana y el Callao". Lima, Perú.

Delgado, R y Peña, C. (2006). Edificios peruanos con muros de concreto de ductilidad limitada". Tesis para

optar el título profesional de ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

Marte, C. (2014). Calibración de umbrales de daño sísmico para el análisis de fragilidad sísmica de estructuras de hormigón armado mediante análisis estático no lineal (Push-Over)". Tesis final de master de ingeniería estructural y de la construcción. Universidad Politécnica de Catalunya. España.

Medina, G. (2005). "Estudio del comportamiento experimental a escala natural de muros y módulo de concreto reforzados con malla electrosoldada". Bach. tesis, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Porter, K. (2016). "A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk". University of Colorado Boulder and SPA Risk LLC. Denver CO, USA.

San Bartolomé A. (2006). "Comportamiento a Carga Lateral de Muros Delgado de Concreto reforzados con Mallas Electrosoldadas y Acero Dúctil". Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

Suarez, M. (2015). "Fragility functions for non-engineered masonry dwelling in Perú". Building Research Institute. Tsukuba, Japan.

Tavera, H. y Bernal, I. (2002). "Geodinámica, Sismicidad y Energía sísmica en el Perú". Monografía, Instituto Geofísico del Perú. Lima, Perú.

Zavala, C. y Gálvez, V. (1998). "Estudio del comportamiento frente a cargas laterales de muros AGV". Reporte de investigación CISMID/FIC/UNI, Lima, Perú.

Recibidos: 03 / 05 / 17 Aceptado para publicación: 09 / 06 / 17
--