

VALIDACIÓN NUMÉRICA DE AISLADORES SÍSMICO ELASTOMÉRICOS DE 2º GENERACIÓN FABRICADOS CON TECNOLOGÍA LOCAL

NUMERICAL VALIDATION OF 2º GENERATION SEISMIC ELASTOMERIC ISOLATORS MANUFACTURED WITH LOCAL TECHNOLOGY

Gustavo Gioacchini^a, Miguel Tornello^a, Victor Lorizio^a

^aCeReDeTeC. Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica. Facultad Regional Mendoza. Universidad Tecnológica Nacional. Rodríguez 273, 5500, Mendoza, Argentina, ggioacchini@frm.utn.edu.ar, <http://www.frm.utn.edu.ar>

Palabras Claves: aislador sísmico, modelo numérico, respuesta estructural, protección sísmica.

Resumen: La ocurrencia de terremotos en zonas sísmicas densamente pobladas del mundo y en las del oeste argentino, han puesto en evidencia grandes pérdidas económicas y de vidas humanas. Con el objeto de controlar y minimizar el daño ocasionados por los terremotos se han desarrollado distintas técnicas de protección sísmica basadas en la disipación de energía y/o el aislamiento sísmico. La investigación se encuadra dentro de un proyecto más amplio que abarca el diseño, la fabricación y la caracterización mecánica y no lineal de aisladores sísmicos, todos ellos fabricados con tecnología local. El trabajo muestra los resultados de los ensayos de distintos prototipos de aisladores elastoméricos sujetos a cargas verticales de compresión y horizontales cíclicas. Los resultados obtenidos se contrastan con los obtenidos mediante análisis numéricos de elementos finitos. Los ensayos experimentales permitieron la validación del modelo numérico propuesto y también la caracterización de las leyes constitutivas de los dispositivos.

Keywords: seismic isolator, numerical model, structural response, seismic protection.

Abstract: The occurrence of earthquakes in densely populated seismic zones of the world and in western Argentina, have brought to light great economic and human life losses. In order to control and minimize the damage caused by earthquakes, different seismic protection techniques based on energy dissipation and/or seismic isolation have been developed. The research is part of a broader project that includes the design, manufacturing and mechanical and nonlinear characterization of seismic isolators, all of them manufactured with local technology. The work shows the results of the tests of different prototypes of elastomeric isolators subjected to vertical compression and horizontal cyclic loads. The results obtained are compared with those obtained through numerical analysis of finite elements. The experimental tests allowed the validation of the proposed numerical model and also the characterization of the constitutive laws of the devices.

1 INTRODUCCIÓN

La ingeniería sísmica ha focalizado su esfuerzo a lo largo de los años en el diseño de sistemas estructurales resistentes a terremotos. Las técnicas convencionales de protección sísmica en edificaciones apuntan a garantizar la seguridad de sus ocupantes, evitando la pérdida de vidas. Para ello, buscan impedir el colapso de una estructura durante un evento sísmico, permitiendo la disipación de energía mediante la aceptación de un nivel de daño controlado. Este grado de desempeño ocasiona grandes pérdidas económicas, asociadas a la operatividad del edificio y al daño de sus componentes no estructurales (Kircher CA. 2003).

El valor de los componentes no estructurales en un edificio comercial típico, representa entre el 80 y el 90% del costo total de un edificio, superando ampliamente el valor de los componentes estructurales. En virtud de lo anterior, se espera que la mayor parte de las pérdidas económicas resultantes de un sismo importante sean atribuibles al daño no estructural. Por ejemplo, el terremoto de Northridge en 1994 ocasionó pérdidas por más de 3400 millones de dólares en hospitales, y la mayor parte de esa cifra se debió al daño no estructural (Taghavi S. Miranda E. 2003).

El aislamiento sísmico es una técnica de diseño para mitigar el daño de un terremoto. A diferencia del enfoque tradicional, cuyo objetivo es aumentar la capacidad de la estructura, el aislamiento sísmico busca reducir la demanda sísmica, protegiendo tanto el sistema estructural, componentes no estructurales y especialmente la de vidas humanas. Dicho objetivo se consigue desacoplando el edificio del movimiento del suelo, mediante la colocación de dispositivos con baja rigidez lateral, que además proveen amortiguamiento, entre la fundación y la superestructura (Jangid RS. y Kelly JM. 2001). De este modo, el período fundamental del sistema aumenta, y la deriva y las aceleraciones de piso disminuyen. Esto ha sido verificado en numerosos estudios, algunos de ellos en modelos a escala real (Guendelman T. y Sarrazin M. 2022).

Trabajos previos realizados en la línea de la presente investigación (Gioacchini G. et al. 2019) permitieron verificar la calidad de los materiales y la fabricación de los dispositivos a pesar de que el procedimiento fue realizado totalmente artesanal. Los ensayos realizados en los prototipos a cargas horizontales y verticales permitieron alcanzar los valores máximos de desplazamientos laterales sin ningún tipo de falla en los dispositivos. El amortiguamiento efectivo que se obtuvo fue aceptable, del orden del 10% al 20% similar a un dispositivo elastomérico comercializado con sus propias patentes.

Los dispositivos de aislamiento que hoy existen comercialmente presentan algunos inconvenientes para utilizarse en el medio local, situación que desalienta su uso especialmente porque deben importarse. Debido entonces a los antecedentes, el proyecto de investigación más integral propone como objetivo el diseño, fabricación y ensayos a cargas verticales de aisladores elastoméricos reforzados con placas de aceros y núcleos de plomo utilizando materiales y tecnología local.

El presente trabajo muestra el grado de avance del diseño de los dispositivos que en esta etapa incluye, diseño preliminar, fabricación, ensayos a cargas verticales y comparación de los resultados obtenidos experimentalmente con los de un modelo numérico. Trabajos posteriores están orientados a determinar las leyes constitutivas de los dispositivos para cargas horizontales y verticales mediante métodos numéricos.

2 METODOLOGÍA EMPLEADA

2.1 Diseño de los dispositivos

Con el objeto de obtener la caracterización geométrica y propiedades mecánicas del dispositivo de aislamiento se ha realizado un pre diseño del aislador elastomérico, utilizando la teoría clásica de estructuras aisladas (Kelly JM. 1996).

Las propiedades de la goma que se emplearon para la construcción del aislador, están en función de los compuestos utilizados para la fabricación de los mismos, de acuerdo a las cantidades de los componentes como son, el neopreno, el óxido de zinc, el ácido esteárico, el negro humo, el dutrex, el vulcanox, el antilux, el azufre y PVI, entre otros, es posible obtener diferentes propiedades mecánicas de la goma. Las especificaciones del compuesto de base para la fabricación de los dispositivos, pueden considerarse dentro de los siguientes parámetros: Dureza: [Shore] 60 +/- 10; Tensión Máxima: > 17 [MPa]; Elongación Máxima: > 400 %; Amortiguamiento > 8 %; Modulo de Corte: $0,7 \% < G < 0,8$ [MPa], (Gioacchini G. et al. 2019). Las propiedades geométricas de los dispositivos se presentan en las Figura 1 y 2.

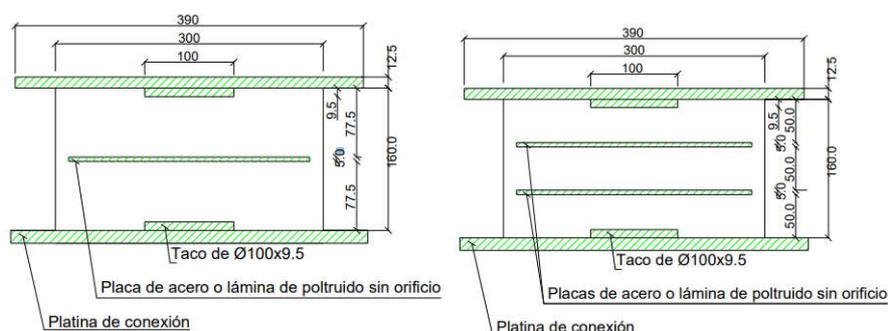


Figura 1. Características geométricas de los aisladores de la primera y segunda serie.

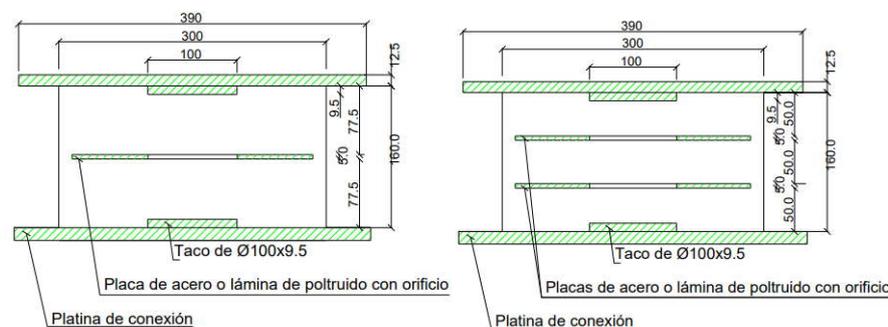


Figura 2. Características geométricas de los aisladores de la tercera y cuarta serie.

Los prototipos están conformados por dos placas de conexión de 390 mm de diámetro y 12,5 mm de espesor, superior e inferior el cual posee un crecimiento de 9,50 mm de espesor y 100 mm de diámetro con el objeto de aumentar el área de contacto de la vulcanización con la goma. En una primera instancia se han fabricado ocho prototipos los cuales se dividen en cuatro series de dos prototipos cada una. La primera serie cuenta con una placa de acero intermedia de refuerzo, de 270 mm de diámetro y 5 mm de espesor (Figura 1-a). La segunda serie está conformada con dos placas de acero intermedias de refuerzo de las mismas

dimensiones que la placa de la serie anterior (Figura 1-b). La tercera serie cuenta con una placa de acero intermedia de acero, pero a diferencia de la placa de la primera serie. Posee una perforación de 100 mm de diámetro para alojar el núcleo de plomo de 100 mm de diámetro y 142 mm de altura (Figura 2-a). Finalmente, la cuarta serie cuenta con dos placas de acero perforadas, los orificios de las placas tienen las mismas dimensiones que la placa de la tercera serie (Figura 2-b).

Con el objeto de definir una determinada rigidez lateral del sistema de aislamiento se ha supuesto que el mismo está conformado por un conjunto de nueve aisladores con un peso total de la construcción de $W_e = 1800$ KN lo que implica que cada dispositivo toma aproximadamente una carga axial de 200 KN. El peso de la construcción ha sido asumido al de una vivienda con estructura de hormigón armado, con losa de entrepiso y de cubierta diseñada para un periodo el modo fundamental de 2 s.

Por lo tanto la rigidez requerida, mínima para cada aislador resulta $K_i = 201.22$ N/mm

$$= 2 \frac{\text{---}}{*} \Rightarrow = \text{---} * \text{---} = 1811 \text{ ---} \quad (1)$$

Para definir la sección transversal del aislador se utiliza la capacidad axial de los materiales componentes del dispositivo.

$$= \text{---} \Rightarrow = \frac{\text{---}}{*} = 327 \quad (2)$$

Para evaluar la rigidez lateral se trabaja con un dispositivo de 300 mm de diámetro y una altura total de la goma de 160 mm.

$$h = \text{---} = 0.50 \quad \text{---} = 220.90 \text{ ---} \quad (3)$$

Las variables consideradas en las ecuaciones (2) y (3) corresponden a una carga axial $N = 200$ KN, módulo de corte elástico $G = 0.50$ Mpa; área de la sección transversal del dispositivo, $A_i = 70686$ mm²; altura total de la goma $H_t = 160$ mm; tensión de compresión de la goma $\sigma_c = 2.38$ MPa y diámetro del dispositivo $D = 300$ mm. En consecuencia la rigidez total del sistema de aislamiento resulta $K_h = 220.90 \text{ ---} * 9 = 1988.10$ N/mm. Considerando a la estructura aislada como un sistema de un grado de libertad traslacional, el periodo fundamental de vibración de la estructura aislada aproximado viene dado por la ecuación (4).

$$= 2 \frac{\text{---}}{h *} = 1.91 \cong 2 \text{ .} \quad (4)$$

La rigidez vertical del dispositivo viene dado por la ecuación (5); donde el módulo de compresión confinado resulta $E_c = (f_1 + f_2)E$; donde $E = 5.90$ Mpa [14], mientras que los valores de f_1 y f_2 se determinan con las expresiones (6); [15].

$$K = \frac{\text{---}}{*} \quad (5)$$

$$f_1 = 1.00 ; f_2 = 2 \text{ --- } = 2s \quad (6)$$

Dónde (s) es el factor de forma definida como la razón entre el área de la cara cargada y el área libre de pandeo determinado con la ecuación (7).

$$s = \frac{\text{---}}{\text{---}} = \frac{\text{---}}{\text{---}} = 0.97 \quad (7)$$

Por lo tanto $E_c = 16.95 \text{ MPay}K_v = 154.60 \text{ KN/cm}$.

2.2. Fabricación de los dispositivos de aislamiento

Para la fabricación de los dispositivos se utilizaron moldes de acero macizo de espesores necesarios para controlar las deformaciones durante el proceso de vulcanizado de la goma, el cual conlleva a altas presiones y temperaturas. Los moldes están conformados por dos medias lunas interiores, con un espesor de pared de 50 mm y una altura de 160 mm, que luego de unir las forman un tubo de 300 mm de diámetro interior y un diámetro exterior de 400,8 mm. El cilindro hueco exterior, tiene un espesor de 30 mm, un diámetro interior de 408 mm, un diámetro exterior de 460,8 mm y un alto de 200 mm. Este cilindro está reforzado por cinco anillos de 30 mm de espesor, separados de forma equidistante. La finalidad que tiene dicho cilindro es mantener unidas las medias lunas que forman el cilindro interior. En la Figura 3 se muestra la conformación de los dos cilindros.



Figura 3. (a) Cilindro interior y exterior del molde; (b) cilindros del molde acoplados.

Las placas de conexión superior e inferior son de acero macizo de 12,5 mm de espesor y de 390 mm de diámetro, además tiene un sobre espesor de 9,5 mm en la parte central, diámetro de 100 mm, para permitir una mayor adherencia entre las placas de conexión y la goma. Las placas que confina al dispositivo poseen cuatro orificios equidistantes, para pernos de 20 mm que sirven de conexión con la estructura de fundación y la superestructura según sea el caso de las placas.

La fabricación de los dispositivos se realiza de manera artesanal, por lo que la participación de los operarios tiene un efecto importante en el resultado final (Figura 4). El primer paso de la fabricación de los aisladores es combinar los componentes en una mezcladora mecánica. Una vez que el material toma la consistencia deseada es colado en el molde y llevado a la prensa para su vulcanización. Previo a ello, en el interior del molde se aplica un aditivo antiadherente que permite un fácil desmoldado. Para lograr una mejor adherencia entre las

pletinas de conexión y el elastómero, se pintan las primeras con un adhesivo especial. El proceso de vulcanización consiste en someter al compuesto de goma a una presión de $2,5 \text{ KN/m}^2$ a una temperatura de 150°C por un lapso de tiempo de ocho horas. La presión, temperatura y tiempo dependen de las dimensiones de la pieza que se pretende fabricar. Una vez retirados de la prensa se dejan enfriar y se realiza el desmolde de la probeta. En la Figura 4 se muestran los prototipos posteriormente a ser desmoldados.



Figura 4. Moldeo manual del dispositivo y dispositivos desmoldados.

2.3 Ensayos del dispositivo a cargas verticales

En una primera etapa, se ha trabajado en ocho prototipos divididos en cuatro series de dos prototipos cada serie. Los ensayos a cargas verticales de las cuatro series de los prototipos se realizaron con una prensa hidráulica de velocidad y desplazamiento controlado de capacidad máxima de 1000 KN. La primera serie (APA-1) está conformada por dos aisladores con refuerzo de una placa de acero de espesor 5 mm. La segunda serie (APA-2) también la conforman dos aisladores, pero con dos placas de acero de 5 mm de espesor, la tercera serie (APAN-1) la conforman dos aisladores con refuerzo de una placa de acero de 5 mm de espesor perforada y un núcleo de plomo de 100 mm de diámetro y 142 mm de alto y la cuarta serie (APAN-2) esta conforma por dos aisladores con dos placas de acero de 5 mm de espesor y el núcleo de plomo de la mismas dimensiones que los de la serie anterior.

A cada prototipo se le realizaron dos ensayos de los cuales se obtuvo el promedio de los desplazamientos verticales. A los prototipos de las dos primeras series (sin núcleo de plomo) se les aplicó una carga vertical creciente dentro del entorno de 0.00-300 KN. A los dispositivos de las series tres y cuatro se les aplicó una carga vertical creciente dentro del entorno de 0.00-350 KN.

2.3 Ensayos del dispositivo a cargas verticales y horizontales cíclicas

Los ensayos a carga horizontal cíclica de los dispositivos de aislación sísmica se realizaron en laboratorio de Estructura del CEREDETEC de la UTN-FRM. Estos ensayos permitieron obtener las leyes constitutivas, desplazamientos versus cargas verticales y horizontales cíclicas, de los distintos prototipos.

Para la ejecución de los ensayos fue necesario el diseño y especial fabricación de un aparejo de carga, con una celda de carga de tracción y compresión de 500 KN, central de adquisición de datos y tres actuadores para aplicación de las cargas horizontales y verticales. Figura 5 y 6.



Figura 5. Fotografías del aparejo de carga para ensayo de aisladores sísmicos de 2ª generación.

Los prototipos se sometieron a una acción vertical de 300 KN, y bajo esa condición se aplicaron 8 ciclos de carga y descarga horizontal de +/-25mm, +/-50mm, +/-75mm y +/-100mm.



Figura 6. Fotografías los ensayos a cargas horizontales de los aisladores sísmicos de 2ª generación.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1. Resultados experimentales de acciones verticales

La Figura 7 muestra la relación de carga axial vs. desplazamiento vertical para la serie APA 2-2, con una placa de refuerzo.

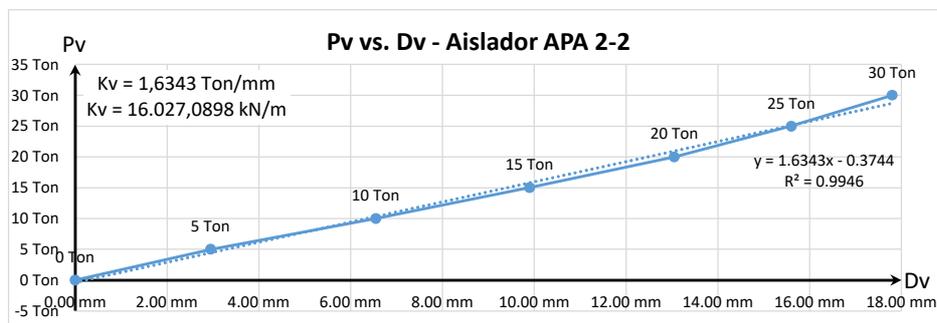


Figura 7. Cargas axiales vs. Desplazamientos verticales para la serie APA 2-2.

3.2. Resultados experimentales de acciones verticales y acciones cíclicas horizontales

De los ensayos experimentales a cargas axiales y horizontales cíclicas efectuados a los prototipos de aisladores sísmicos se determinaron:

- La relación fuerza – desplazamiento mediante la gráfica de la curva de histéresis.
- Los bucles histéreticos o comportamiento no lineal obtenidos de la gráfica fuerza – desplazamiento, con ella se determinan el área promedio y la energía disipada por el aislador.
- Las fuerzas y desplazamientos máximos, los cuales permitirán obtener la rigidez efectiva.

En la Figura 8 se muestra la relación de carga vs. desplazamiento para el aislador APA1-2.

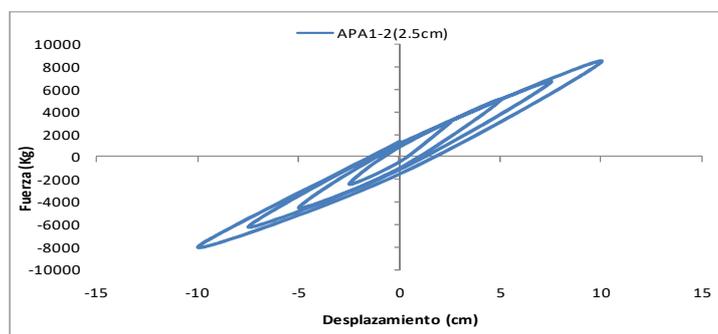


Figura 8. Cargas horizontales vs. Desplazamientos para el prototipo APA1-2.

La rigidez horizontal efectiva de los prototipos ensayados no presenta significativa degradación cuando se incrementa la carga vertical y la fuerza horizontal.

En la Figura 9 se muestra la relación de carga-desplazamiento para el aislador APPN 4-2.

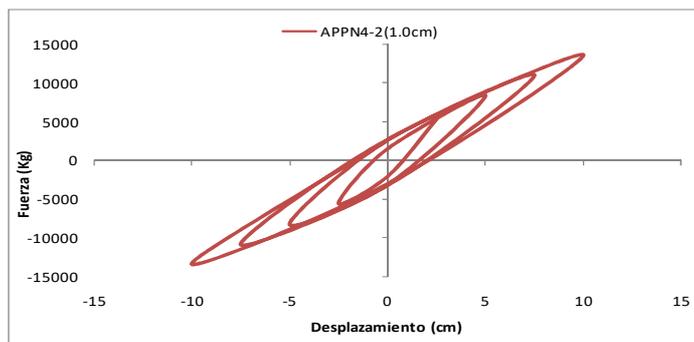


Figura 9. Cargas horizontales vs. Desplazamientos para el prototipo APPN 4-2.

La rigidez horizontal efectiva de los prototipos ensayados no presenta significativa degradación cuando se incrementa la carga vertical y la fuerza horizontal.

Para mayores desplazamientos verticales, como consecuencia de una mayor carga axial de compresión, las curvas fuerzas-desplazamientos encierran áreas mayores, por lo tanto, existe una mayor disipación de energía.

4. ANÁLISIS NUMÉRICO DE LOS PROTOTIPOS

Para la modelación numérica del aislador se ha utilizado el código comercial Abaqus (Abaqus, 2003). En el presente trabajo, y atendiendo a cuestiones de extensión, se muestra solamente los resultados del prototipo APA-1. En el modelo se ha representado el ensayo experimental, en el cual se somete a una acción vertical de 300 kN, y bajo esa condición se aplican 8 ciclos de carga y descarga horizontal de ± 25 mm, ± 50 mm, ± 75 mm y ± 100 mm.

El modelo de elementos finitos fue restringido a los desplazamientos en tres direcciones. La restricción se impuso en la parte inferior del aislador, en coincidencia con la pletina de conexión inferior, la cual en la práctica estará en contacto con la estructura de fundación.

Para generar el modelo se emplean elementos sólidos deformables en tres dimensiones. En la Figura 10 se observa el modelo de elementos finitos generado para el aislador estudiado.

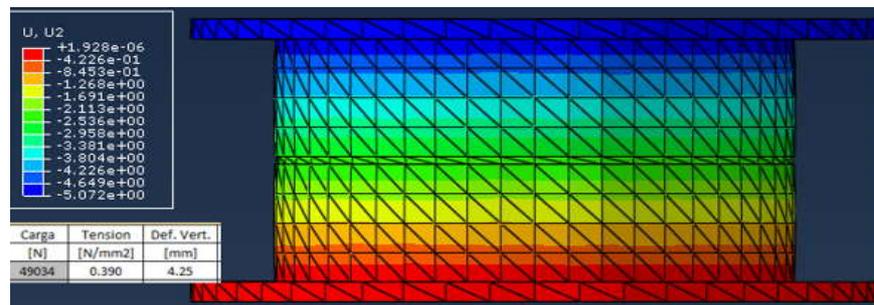


Figura 10. Modelo de elementos finitos utilizado en la plataforma ABAQUS.

Actualmente se está trabajando en la modelación numérica de los distintos prototipos. Estos modelos quedarán validados con los resultados obtenidos de los ensayos experimentales realizados. (Figura 11).

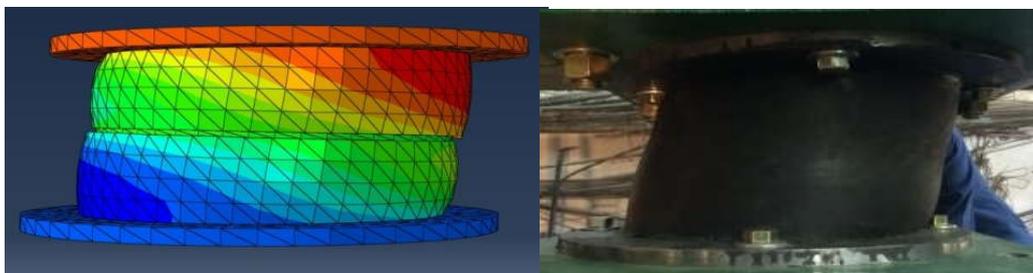


Figura 11. Comparación de las respuestas obtenidas de los ensayos y del modelo numérico.

4. CONCLUSIONES

Un análisis cualitativo del desempeño y de las respuestas de los prototipos ensayados, indican una buena performance de los dispositivos, situación que confirma los adecuados procedimientos implementados en los procesos de fabricación.

El parámetro relacionado con el espesor de la lámina de goma de la ecuación de la rigidez vertical, t_r , expresión (5), tiene una incidencia importante en el valor final de la rigidez vertical y podría no ser efectivo extrapolarlo al diseño de los dispositivos que se han estudiado.

en el presente trabajo. Para este caso debería utilizarse un coeficiente de corrección para darle mayor certeza a la expresión teórica en relación a los resultados experimentales encontrados.

La respuesta de los aisladores sujetos a cargas verticales y horizontales muestra una marcada no linealidad en los ciclos de carga y descarga. Los trabajos futuros se encuentran orientados a determinar el punto de fluencia de los aisladores y la capacidad máxima de los mismos en términos de desplazamiento horizontal último y fuerza horizontal última.

Actualmente se está trabajando en el análisis cuantitativo de los amortiguamientos efectivos (η) y la energía disipada por el aislador, obtenidos de los ensayos, para compararlas con las que se generaran con los modelos numéricos.

Próximamente se estudiará las respuestas de distintos tipos de construcciones, de mediana envergadura, con el objeto de cuantificar la respuesta de los dispositivos de aislamiento para acciones sísmicas de normativa o bien de input de terremotos.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto de investigación PID-10148TC. Se agradece a la UTN por el apoyo económico otorgado para el desarrollo del mismo.

REFERENCIAS

Boroschek RL. (2004). Geological Society of America, Special Papers 375. Seismic vulnerability of the healthcare system in El Salvador and recovery after the 2001 earthquakes.

Gioacchini G., Tornello M. Frau C. (2019). Quest Journal. Journal of Architecture and Civil Engineering. Design, manufacture and simulation of seismic isolation device for a low-level axial load. Vol. 4. Issue 1. Pp: 50-75.

Guendelman T. y Sarrazin M. (2022). Revista Chilena de Ingeniería sísmica y sismológica. Analisis Sísmico de Edificios. Vol 1. N° 2. Diciembre 2022.

Kelly, JM. (1996). 2nd ed. Springer – Verlag. London. Earthquake-Resistant Design with Rubber.

Kircher CA.(2003). ATC 29-2 Seminar on Seismic Design, Performance and Retrofit of Nonstructural Components in Critical Facilities. It makes dollars and sense to improve non-structural system performance. Applied Technology Council, Newport Beach, CA, Proc.

Jangid RS. y Kelly JM. (2001). Base Isolation for near-fault motions. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30:691-707.

Taghavi S. Miranda E. (2003). Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Response assessment of non-structural building elements. Report No. PEER-2003/05.