

VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMERICO PARA CARACTERIZAR UN DISPOSITIVO DE AISLAMIENTO SÍSMICO

VALIDATION AND CALIBRATION OF THE NUMERICAL MODEL TO CHARACTERIZE A SEISMIC INSULATION DEVICE

Miguel E. Tornello^a, Carlos D. Frau^a y Gustavo Gioacchini^a

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

Palabras Claves: protección sísmica, aislamiento sísmico, ensayos experimentales, modelo numérico.

Resumen: Los terremotos son uno de los fenómenos naturales que causan anualmente la mayor cantidad de pérdidas de vidas humanas y económicas. La ingeniería estructural sismorresistente ha desarrollado, en las últimas décadas, nuevas estrategias para proteger las construcciones de los terremotos entre ellas, el aislamiento sísmico. El trabajo muestra parte del diseño, la fabricación y la caracterización mecánica, elástica y pos-fluencia de aisladores sísmicos destinados a construcciones de bajo peso. El trabajo presenta los resultados de los ensayos experimentales de algunos de los prototipos, a cargas verticales y horizontales cíclicas. Se discute un modelo numérico y su respectiva validación la cual, se realiza mediante ensayos experimentales. Los resultados indican un aceptable comportamiento de los dispositivos cuantificado en función del amortiguamiento y de la energía disipada durante los ciclos histeréticos obtenidos con los ensayos experimentales y analíticos.

Keywords: seismic protection, seismic isolation, experimental tests, numerical model.

Abstract: Earthquakes are one of the natural phenomena that annually cause the greatest amount of loss lives and economic. Seismic-resistant structural engineering has developed, in recent decades, new strategies to protect earthquake constructions among them, seismic isolation. The work shows part of the design, manufacturing and mechanical, elastic and post-creep characterization of seismic insulators intended for low weight buildings. The work presents the results of the experimental tests of some of the prototypes, at vertical and horizontal cyclic loads. A numerical model and its respective validation are discussed, which is carried out by experimental tests. The results indicate an acceptable behavior of the devices quantified according to the damping and the energy dissipated during the hysteretic cycles obtained with the experimental and analytical tests.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de estructuras sismo resistentes debe cumplir con tres premisas básicas: Evitar las pérdidas de vidas humanas, disminuir las pérdidas económicas y controlar los retrasos socio-económico que ocasiona la ocurrencia de un terremoto destructivo. La estrategia del aislamiento sísmico se aplica en regiones sísmicas para proteger edificios importantes o bien para que cumplan funciones esenciales después de ocurrido el terremoto, de hecho, hay muchos ejemplos en Estados Unidos, Japón, Italia y Nueva Zelanda. También existen proyectos para viviendas económicas realmente construidos en Chile, Perú y Estados Unidos.

Las estrategias del aislamiento sísmico han sido orientadas principalmente a grandes obras e infraestructura sin embargo se ha descuidado otras obras de construcción masiva (viviendas de uno o dos niveles, edificios comerciales, hoteles y edificios de departamentos de baja altura, estructuras y equipos industriales, equipos de estaciones transformadoras, etc.) que como las grandes obras, también sufren el impacto de un terremoto destructivo. Los dispositivos que hoy existen comercialmente podrían utilizarse para otras construcciones, pero tienen los siguientes inconvenientes para países en vías de desarrollo: i) los dispositivos tienen sus propias patentes, ii) no se fabrican en el país, por lo tanto hay que importarlos lo que implica un incremento de los costos, iii) para amortizar su costo hay que fabricar un número importante de dispositivos; iv) no permite el desarrollo de tecnología local.

En función de esos inconvenientes el presente trabajo propone como objetivo el desarrollo de un dispositivo de aislamiento sísmico con bajo nivel de carga axial, para ser empleado en construcciones de menor envergadura muy difundidas en los países en vías de desarrollo. Se han diseñado y fabricado dispositivos de aislamiento sísmico de base elastomérica con características distintas a los que actualmente se comercializan. Existen antecedentes sobre dispositivos de aislamiento elastoméricos que utilizan placas de refuerzo de fibras de carbono en reemplazo de las placas de acero para reducir los costos del aislador. El uso de la fibra de carbono permite fabricar aisladores en tiras longitudinales muy convenientes para viviendas con muros de hormigón o mampostería (Kelly J. M. y Mársico M. R., 2010).

Otro tipo de aisladores desarrollado para construcciones livianas está conformado por bielas de hormigón armado (PPP) (Besa, J. et al., 2010). El sistema se utilizó en una vivienda en Chile. La vivienda está construida sobre una losa flotante que se apoya sobre los aisladores tipo biela de hormigón armado y en dos aisladores elastoméricos que tienen por función proveer la fuerza restitutiva (Revista BIT, 2010).

Otro antecedente es el sistema RBRL, propuesto por el Prof. A.G. Thomas y desarrollado en el Centro de Investigación Tun Abdul Razak (TARRC) para permitir el aislamiento de estructuras de baja masa, por ejemplo, menos de 10 t (Donà M. et al., 2017). El sistema RBRL comprende bolas (generalmente de acero) que ruedan sobre capas de caucho unidas a pistas de acero con muelles auxiliares de recentrado de caucho, estos se pueden combinar en paquetes individuales.

2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

2.1. Características del aislador y del compuesto de goma utilizado

Las características geométricas de los aisladores elastoméricos se muestran en la Figura 1. El dispositivo tiene dos pletinas de acero de conexión, inferior y superior, y un taco de goma

de 200 mm de altura y 180 mm de diámetro.

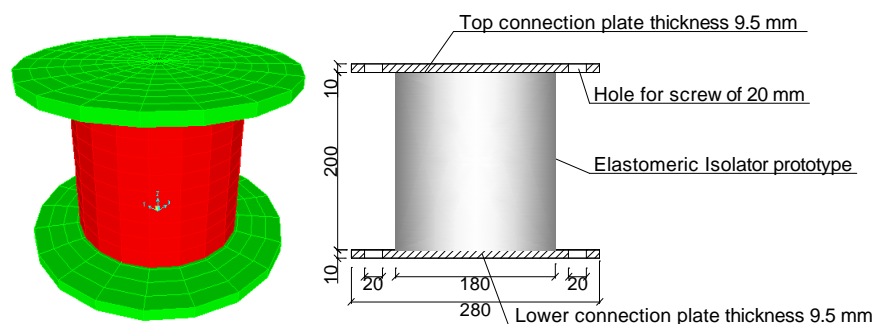


Figura 1: Características del aislador (Dimensiones en mm).

Los dispositivos de aislamiento poseen dos diferencias con los que habitualmente se utilizan a nivel mundial. La primera es que no poseen planchas de acero intermedias vulcanizadas a las capas de goma, por lo tanto i) se reducen los costos de fabricación, ii) se reduce la capacidad a carga axial y iii) se reduce la rigidez efectiva de los dispositivos. La segunda característica se refiere al núcleo del dispositivo. Los dispositivos que se comercializan a nivel mundial poseen, en algunos casos, núcleos de plomo mientras que los desarrollados en el presente trabajo poseen un núcleo de elastómero confinado con un tubo de acero o bien con láminas de fibras (tela cord). Esa característica permite una reducción de los costos de fabricación y admite un nuevo desarrollo tecnológico en la región.

El compuesto base para la fabricación de aisladores es el siguiente (Araya Aclé L. M. et al., 1994): Dureza: 60 +/- 10 shore; Tensión máxima > 17 MPa; Elongación máxima > 400 %; Amortiguamiento > 8 %; Módulo de corte: $0.70 < G < 0.8$ MPa. Los componentes y sus proporciones se resumen en la Tabla 1 (Gioacchini G. et al., 2015).

Compuesto de goma 8654			
Componentes (base 1kg)		Características – Propiedades	Cantidad [kg]
Elastómero	Neopreno W	Elastómero base	0,293
	Caucho Natural		0,245
Cargas	Negro de Humo	Carga negra altamente reforzante de las propiedades físicas	0,234
	Silice Precipitada		0,088
Auxiliares de Proceso		Cumplen la función de ayudar en el proceso de la elaboración de la mezcla	0,033
Activadores		Activantes del sistema de vulcanización	0,065
Antioxidantes y antiozonates		Se utilizan como protectores de la degradación por oxidación y calor	0,027
Catalizadores y Reticulantes		Ejerce propiedades retardantes durante la vulcanización	0,015

Tabla 1: Componentes del compuesto de goma

2.2. Fabricación de los dispositivos de aislamiento sísmico

Los moldes utilizados en la fabricación son de acero macizo y fueron construidos especialmente. Están formados por un tubo interior de espesor de pared de 54 mm, seccionado a la mitad para permitir el desmolde y un tubo exterior de 30 mm de espesor que cumple la

función de mantener unidas las piezas interiores durante la fabricación de los dispositivos (Figura 2).



Figura 2: Fotografía de moldes utilizados en la fabricación de los dispositivos.

Se fabricaron ocho dispositivos con cuatro tipos de confinamiento de núcleo. La primera serie de aisladores (dos prototipos) se fabricaron sin núcleo de confinamiento (ASNC). La segunda serie (dos prototipos) poseen núcleos confinados con un tubo de acero ranurado de 100 mm de diámetro y 6 mm de espesor (ANAG). La tercera serie (dos prototipos) poseen núcleo confinado con láminas de fibra (tela cord) de 100 mm de diámetro (ANTC). La cuarta serie (dos prototipos) poseen núcleo confinado con un tubo de acero de chapa perforada de 100 mm de diámetro y 2 mm de espesor (ANAF). En la Figura 3 se muestran los núcleos colocados en las series segundas y terceras.



Figura 3: Núcleos de los prototipos ANAG y ANAF.

La colocación del material base fue manual y la mezcla de los componentes se realizó en forma mecánica. Al interior del molde se aplicó un aditivo antiadherente para facilitar el desmolde. Las pletinas de conexión se pintan con un adhesivo especial para mejorar la adherencia con el elastómero. La vulcanización consiste en someter al compuesto de goma a una presión de 120 toneladas y una temperatura de 150°C por un lapso de tiempo de dos horas, la presión, temperatura y tiempo dependen de las dimensiones del dispositivo. Cuando se retiran de la prensa se dejan enfriar y se realiza el desmolde de la probeta. La Figura 4-a muestra los dispositivos en el momento de su vulcanización y la Figura 4-b los dispositivos desmoldados.



Figura 4: a) Vulcanización de los dispositivos; b) Desmolde de los dispositivos.

3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

3.1. Ensayos de los dispositivos a cargas verticales constantes y horizontales cíclicas

Los ensayos se realizaron con un pórtico de reacción, un actuador hidráulico de 12 toneladas para aplicar la carga horizontal cíclica y cuatro varillas roscadas fijadas a la losa reactiva para aplicar la carga vertical. El esquema del ensayo se muestra en la Figura 5. Los dispositivos se ensayaron para dos desplazamientos verticales, 15mm y 30mm. Para cada desplazamiento vertical se realizaron 7 ciclos de desplazamientos horizontales de +/- 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm y 70 mm.



Figura 5: Ensayos experimentales de los prototipos.

3.2. Resultados

De los resultados de los ensayos experimentales se determinaron: La relación fuerza – desplazamiento. Curva de histéresis. Bucles histeréticos, área promedio y la energía disipada por el dispositivo. Las fuerzas y desplazamientos máximos para determinar la rigidez efectiva. La Figura 6 muestra la relación fuerza – desplazamiento horizontal para dos de los dispositivos ensayados. La gráfica de la izquierda se obtuvo para desplazamiento vertical de 15mm y carga vertical de 8.000 N. La gráfica de la derecha se obtuvo para desplazamiento vertical de 30mm y carga vertical de 17.000 N.

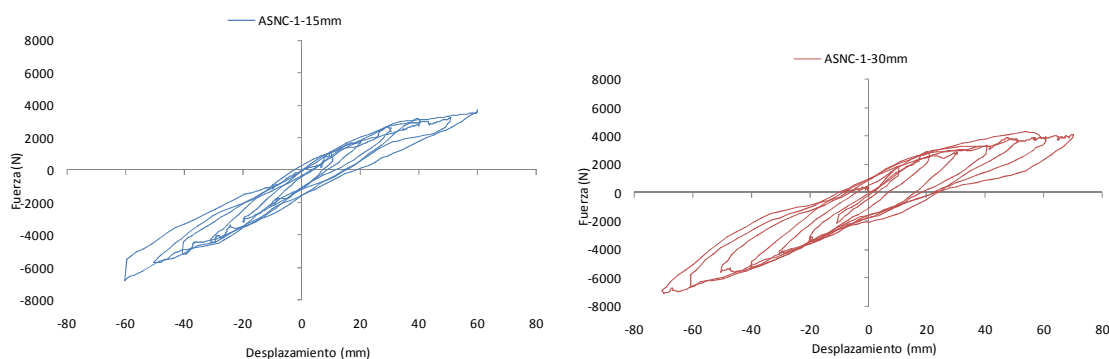


Figura 6: Relación fuerza–desplazamiento para dos de los dispositivos

La rigidez horizontal efectiva de los dispositivos no muestra una degradación importante cuando se incrementa la carga vertical y la fuerza horizontal. La misma se mantiene casi constante lo largo de todo el ensayo y para los escalones de cargas impuestas. La respuesta de

los dispositivos muestra una marcada no linealidad en los ciclos de carga y descarga. En Tabla 2 se resumen los parámetros característicos de los dispositivos obtenidos de los ensayos, donde F_y es la fuerza de fluencia, D_y es el desplazamiento de fluencia y K_u es la rigidez inicial.

		Prototipos de aisladores											
		ASNC-1		ASNC-2		ANAG-1		ANAG-2		ANTC-1		ANTC-2	ANAF-1
		15 mm	30mm	15 mm	30mm	15 mm	3mm	15 mm	15 mm	30mm	15 mm	15 mm	
F_y	N	1654	1640	1545	1614	1577	1415	1580	1420	1480	1550	1685	
D_y	mm	10,33	9,80	9,36	9,80	10,35	9,90	8,50	10,10	10,30	10,75	11,90	
K_u	N/mm	160,05	167,35	165,06	164,69	152,37	142,93	185,88	140,59	143,69	144,19	141,60	

Tabla 2: Parámetros característicos de los dispositivos obtenidos de los ensayos experimentales.

3.3. Rigidez y amortiguamiento efectivo

Se determina la rigidez y el amortiguamiento efectivo de los dispositivos a partir de los resultados de los ensayos experimentales (Kelly, J. M., 1996). Se realiza el procedimiento para uno de los dispositivos ensayados y los resultados del resto de los aisladores se resumen en la Tabla 3. Se aplica la linealización armónica para determinar la energía disipada por un sistema lineal y otros parámetros que caracterizan a cada tipo de dispositivos (Kelly, J. M., 1996).

Rigidez efectiva:

$$K_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} = 87,64 \text{ N/mm} \quad (1)$$

$F^+ = 3.709\text{N}$; $\Delta^+ = 60\text{mm}$; $F^- = -6.808\text{N}$; $\Delta^- = -60\text{mm}$; $W_o = \text{Área ciclo histerético} = 220.21\text{Nmm}$

Energía elástica:

$$W_e = \frac{1}{2} K_{eff} \delta^2 = 157.755 \text{ Nmm} \quad (2)$$

Amortiguamiento efectivo:

$$\xi_{eff} = \frac{W_o}{4\pi W_e} = 0,111 = 11,1\% \quad (3)$$

La Tabla 3 resume los resultados de rigidez y el amortiguamiento efectivo de todos los dispositivos, donde W_o es el área del ciclo histerético; F^+ y F^- son las fuerzas máximas y mínimas obtenidas del ciclo histerético; Δ^+ y Δ^- son los desplazamientos máximos y mínimos obtenidos del ciclo histerético; k_{eff} es la rigidez efectiva; W_e es energía elástica. Los resultados indican que el amortiguamiento efectivo tiene valores aceptables (10% al 20%) y similares a aisladores elastoméricos convencionales que se comercializan en el mercado. Para todos los dispositivos se observa que a mayor desplazamiento vertical (mayor carga axial), el amortiguamiento efectivo es mayor y también lo es la disipación de energía.

		Prototipos de aisladores										
		ASNC-1		ASNC-2		ANAG-1		ANAG-2	ANTC-1		ANTC-2	ANAF-1
		15 mm	30mm	15 mm	30mm	15 mm	3mm	15 mm	15 mm	30mm	15 mm	15 mm
W_o	Nmm	220210	400130	315590	442020	406180	361330	588490	261480	395290	327500	434650
F^+	N	3709	4000	5481	4759	4554	4736	5923	4926	4365	4863	5901
F^-	N	6808	6865	7236	7616	7348	6836	6665	6928	6793	7104	9730
Δ^+	mm	60,00	70,00	71,00	70,00	70,00	71,00	71,00	70,00	70,00	71,00	70,00
Δ^-	mm	60,00	71,00	70,00	70,00	70,00	70,00	70,00	71,00	70,00	70,00	70,00
k_{eff}	N/mm	87,64	77,06	90,19	88,39	85,01	82,07	89,28	84,07	79,70	84,87	111,65
W_c	Nmm	157755	188789	227328	216563	208285	206860	225022	205974	195265	213921	273543
ξ_{eff}	%	11,11	16,87	11,05	16,24	15,52	13,90	20,81	10,10	16,11	12,18	12,64

Tabla 3: Rigidez y amortiguamiento efectivo de los dispositivos

4. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

4.1. Introducción

Para la modelación numérica del dispositivo se utilizó el código comercial Abaqus (Abaqus, 2003). Debido al tiempo computacional se analizó solamente uno de los prototipos, sin embargo, el estudio permitió definir una metodología de trabajo válida para los otros dispositivos. El modelo representa el ensayo experimental para un desplazamiento vertical de 30 mm y 7 ciclos de desplazamientos horizontales de +/- 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm y 70 mm. En el modelo de elementos finitos (MEF) se restringieron los desplazamientos globales en tres direcciones, parte inferior del aislador, en coincidencia con la pletina de conexión inferior, teóricamente en contacto con la estructura de fundación.

4.2. Parámetros del modelo de Ogden

Los materiales utilizados para la modelación fueron goma y acero. Para el acero se utilizó un modelo elástico isotrópico con un módulo de elasticidad $E = 210000$ MPa. Para el elastómero se utilizó el modelo hiperelástico de Ogden (Ogden R., 1984) Los parámetros correspondientes al modelo se obtuvieron experimentalmente y en forma simultánea mediante ensayos de tracción, compresión y corte, los cuales se resumen en la Tabla 4 (Weinberg K., 2010). Se utilizó para el módulo volumétrico un valor de $k = 10000$ MPa.

Constantes (MPa)						
Compuesto	μ_1	μ_2	μ_3	α_1	α_2	α_3
Goma	10	0,012	-0,1	1,3	5	-2

Tabla 4: Parámetros correspondientes al modelo de Ogden.

4.3. Modelo hiperelástico del elastómero.

El modelo constitutivo utilizado para simular el comportamiento del elastómero está basado en la función de energía propuesta por Ogden (Ogden R., 1984; Núñez C. A. y Celentano D. J., 2005; Bellomo F. et al., 2008).

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (4)$$

donde N es un número entero positivo y μ_i , α_i son parámetros del material que se determinan en base a ensayos experimentales (Weinberg K., 2010). Las deformaciones están parametrizadas por los estiramientos principales λ_A dados por la siguiente expresión:

$$\lambda_A = (\text{eig}_A(C))^{1/2} = (\text{eig}_A(B))^{1/2} \quad (5)$$

Dónde los autovalores se obtienen a partir del tensor derecho de Cauchy-Green C ó del tensor izquierdo de Cauchy-Green B . Debido a la cuasi-incompresibilidad que presentan los elastómeros se realiza una descomposición multiplicativa del tensor gradiente de deformación en sus partes volumétrica (F_{vol}) y desviadora (\bar{F}).

4.4. Resultados del modelo hiperelástico

Se determinó la relación fuerza-desplazamiento. La Figura 7 muestra superpuestas las relaciones fuerza-desplazamiento del MEF y la obtenida del ensayo experimental. Se observa que ambos ciclos histeréticos presentan una buena aproximación cualitativa. Las fuerzas y desplazamientos máximos y mínimos del MEF son similares a los obtenidos en los ensayos experimentales. Los ciclos histeréticos de los ensayos no presentan simetrías, mientras que el logrado a partir del modelo numérico es simétrico en su desarrollo histerético.

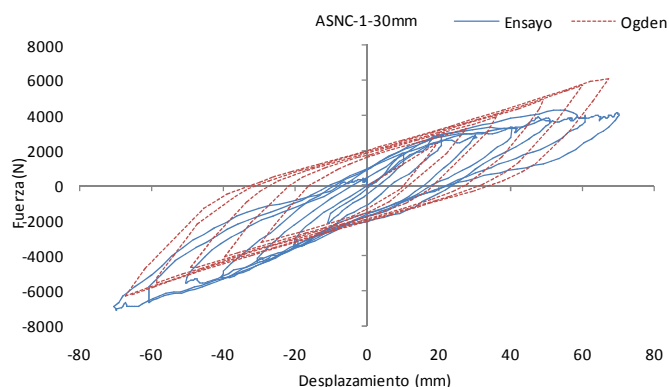


Figura 7: Comparación de los ciclos histeréticos del ensayo experimental con el modelo de Ogden para 1-30mm.

El procedimiento utilizado consiste en cuantificar la energía disipada por el aislador y el amortiguamiento efectivo debido a que los dos parámetros resultan de interés para evaluar las respuestas de las estructuras con aislamiento sísmico (Tornello M., 2007).

Para ello se obtienen con las ecuaciones (1), (2) y (3), al igual que para el análisis experimental, la rigidez efectiva (k_{eff}), energía elástica (W_e) y el amortiguamiento efectivo (ξ_{eff}). En la Tabla 5 se resume los parámetros obtenidos del análisis experimental y los obtenidos con el modelo numérico de Ogden.

Parámetro	Unidades	PROTOTIPO DE AISLADOR	
		Ensayo Experimental	Hiperelástico de Ogden
W_o	Nmm	400130	452780
F^+	N	4000	6067
F^-	N	6865	6308
Δ^+	Mm	70,00	67,04
Δ^-	Mm	71,00	67,04
k_{eff}	N/mm	77,06	92,29
W_e	Nmm	188789	207396
ξ_{eff}	%	16,9	17,4

Tabla 5: Comparación del amortiguamiento efectivo obtenido a partir del ensayo y del modelo.

La Figura 8 muestra la distribución de tensiones axiales y de corte S11 y S12, para el modelo hiperelástico de Ogden y para las acciones externas máximas que se reproducen del ensayo experimental. Para realizar un análisis comparativo cuantitativo se determina la rigidez y amortiguamiento efectivos del modelo numérico de Ogden y los ensayos experimentales.

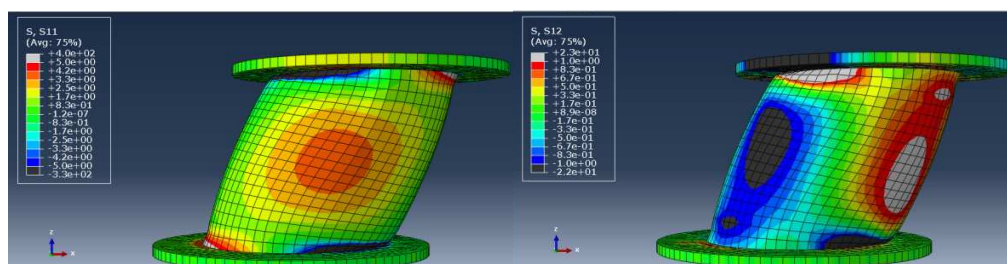


Figura 8: Estado de tensión axial S11 para el eje x - Estado de tensión de corte S12 para los ejes x-y.

5. CONCLUSIONES

Para los ensayos a cargas verticales y horizontales cíclicas, los desplazamientos horizontales máximos se alcanzaron sin falla en los dispositivos. Cuando el desplazamiento vertical aumenta, como consecuencia de una mayor carga de compresión, las curvas fuerzas-desplazamientos horizontales, encierran áreas mayores y por lo tanto hay una mayor disipación de energía.

La rigidez horizontal efectiva de los dispositivos no presenta significativa degradación cuando se incrementa la carga vertical y la fuerza horizontal. La rigidez efectiva del aislador, se mantiene casi constante lo largo de todo el ensayo y para los niveles de cargas impuestas.

El amortiguamiento efectivo determinado con los ensayos experimentales alcanzan valores aceptables (10% al 20%) y similares a otros aisladores elastoméricos que se comercializan en el mercado.

La valoración del modelo de Ogden se realizó comparando la energía disipada por el aislador y su amortiguamiento efectivo, debido a que esos parámetros resultan de interés para evaluar respuestas de estructuras aisladas. Los resultados indican que el modelo numérico de Ogden es adecuado para representar los ensayos experimentales de los dispositivos ASNC.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido desarrollado dentro del Proyecto de Investigación ECUTIME0004335TC de la UTN, agradeciendo los autores a las autoridades del CeReDeTeC y de la Facultad Regional Mendoza de la Universidad Tecnológica Nacional, por el apoyo brindado en el desarrollo del trabajo.

REFERENCIAS

- Abaqus 6.4-1. Theory Manual. Pawtucket, U.S.A., 2003.
- Araya Acle L. M., Moroni O. M., Sarrazin A. M. y Jorquera P. Desarrollo y fabricación de aisladores sísmicos para edificio habitacional. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Memoria para optar el título de Ingeniero Civil. Santiago Chile, 1994.
- Bellomo F., Nallim G. y Oller S. Modelo para el análisis del comportamiento mecánico de materiales compuestos de matriz elastomérica reforzada. *Mecánica Computacional*, 27, 593-613. Alberto Cardona, Mario Storti, Carlos Zuppa. (Eds.) San Luis, Argentina, 2008.
- Besa, J., de la Llera J. C. y Jünemann R. Experimental behavior and design of a new kinematic isolator. *Engineering Structures*, 32, 508-522, 2010.
- Donà M., Muhr A. H., Tecchio G. y Porto F. Experimental characterization, design and modelling of the RBRL seismic-isolation system for lightweight structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(5), 831-853, 2017
- Gioacchini G., Tornello M. y Frau C. Cuantificación de los parámetros elásticos y mecánicos de un nuevo dispositivo de aislamiento sísmico. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*. Editores: Alex H. Barbat, Roberto Aguiar. ISSN 1390-1117, 20(2), 199 – 212, 2015.
- Kelly, J. M. Earthquake-Resistant Design with Rubber. *Springer – Verlag*, London, 1993, 1996 2nd ed.
- Kelly J. M. y Marsico M. R. Stability and post-buckling behavior in nonbolted elastomeric isolators. *Mathematical sciences publishers*, 1(1), 2010.
- Núñez C. A. y Celentano D. J. Caracterización experimental y numérica de compuestos elastoméricos utilizados en disipadores de energía. *Mecánica Computacional*, 24, Buenos Aires, Argentina, 2005.
- Ogden R. Non-linear elastic deformations, *Dover Publications*, New York. 1984.
- Revista BIT, Especial terremoto Chile 2010. Aislación y disipación de energía. Mayo 2010. (Disponible online www.fiic.la/lxv_consejo_directivo_panama/delallera_2.pdf), 2010.
- Tornello M. Aislamiento sísmico de base en construcciones civiles, emplazadas en zonas de alto riesgo sísmico. Director: Dr. Sarrazin A. M. Tesis Doctoral. Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza, 2007.
- Weinberg K. Lecture Notes for Zur Methode der finiten Elemente in der Mechanik II: Nichtlineare Probleme, TU Berlin [in English]. <http://mechanik.tu-berlin.de/weinberg/Lehre/fem2/Chapter4.pdf>, 2010.