

## COMPORTAMIENTO DE AISLADORES ELASTOMÉRICOS DE BAJA CARGA AXIAL BAJO ACCIONES VERTICALES Y HORIZONTALES CÍCLICAS

**Gustavo Gioacchini, Miguel E. Tornello, Carlos D. Frau y Juan P. Cordone**

*Ceredetec, Universidad Tecnológica Nacional, Rodriguez 273, 5500 Mendoza, Argentina,  
ggioacchini@frm.utn.edu.ar, mtornell@frm.utn.edu.ar, cdfrau@frm.utn.edu.ar,  
juanpablo.cordone@frm.utn.edu.ar*

**Palabras Claves:** aislador 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 también económicas. En los últimos años la ingeniería estructural sismorresistente ha desarrollado nuevas estrategias para proteger las construcciones de los terremotos entre las cuales se destaca el aislamiento sísmico. Los antecedentes sobre el empleo de estructuras aisladas indican que la estrategia de protección ha sido orientado fundamentalmente a grandes emprendimientos, aspecto que se considera altamente positivo sin embargo, se han omitido muchas obras, ampliamente difundidas tales como viviendas de uno o dos niveles, edificios comerciales y edificios de departamentos de baja altura, estructuras y equipos industriales de bajo peso donde el uso de dispositivos de aislamiento tendría una incidencia importante en el costo final de la obra. El objeto del trabajo es el diseño y fabricación de dispositivos elastoméricos para baja carga axial junto a su caracterización elástica y mecánica. En el trabajo se discuten los resultados de los ensayos experimentales de los prototipos de aisladores diseñados y fabricados, los cuales fueron ensayados a cargas verticales de compresión y horizontales cíclicas con el objeto de obtener las relaciones fuerza – desplazamiento y su validación a través de un modelo numérico. Los resultados obtenidos indican un aceptable comportamiento de los distintos dispositivos ensayados en función de las mediciones de energía disipada durante los ciclos de carga y descarga y los valores de amortiguamiento encontrados para los dispositivos de aislamiento.

## 1 INTRODUCCIÓN

En muchas regiones del planeta se producen terremotos severos capaces de colapsar estructuras e interrumpir la actividad económica, las líneas de comunicación y los servicios públicos. Una de las principales causas de las grandes pérdidas es la falta de conocimiento sobre la respuesta de las construcciones frente a terremotos severos, sumado a la incertidumbre del comportamiento de los materiales, tipo de suelos, fundaciones, características de las fuentes generadoras de terremotos, etc., lo cual se traduce en diseños, en parte, no adecuados para afrontar la acción de terremotos destructivos.

Una de las estrategias no tradicionales para controlar el daño en las construcciones es el aislamiento sísmico. El objetivo fundamental de la estrategia es desacoplar la estructura del suelo de fundación con el objeto de que el movimiento del terreno, durante un sismo no sea transmitido a la superestructura y que ella permanezca esencialmente detenida en un marco de referencia inercial, Figura 1. Por cierto, un desacople perfecto entre suelo y estructura es impracticable actualmente, sin embargo, cualquier sistema de aislamiento busca concentrar en él la deformación impuesta por el suelo, filtrando el movimiento que se trasmite hacia la superestructura.

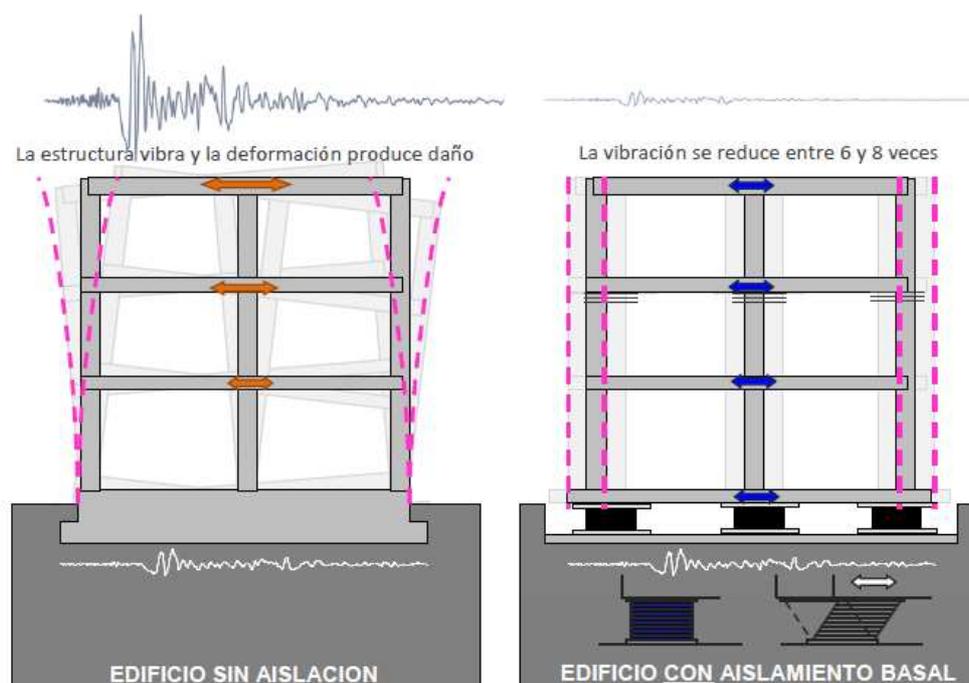


Figura 1: Respuesta de una estructura convencional y una aislada

La implementación de dispositivos de aislamiento sísmico permite reducir la demanda sísmica sobre las estructuras y asegurar su capacidad de resistencia frente a terremotos destructivos, por lo tanto dichas estructuras muestran un comportamiento elástico ante la ocurrencia de importantes terremotos, situación que garantiza la estabilidad de la estructura aislada, la supervivencia de sus ocupantes y contenidos.

El concepto de aislamiento sísmico es ampliamente aceptado en regiones sísmicas para proteger edificios importantes o que deban cumplir funciones esenciales después de ocurrido el terremoto, de hecho hay muchos ejemplos en Estados Unidos de Norteamérica, Japón, Italia y Nueva Zelanda. También existen proyectos de menor costo para viviendas económicas de los cuales hay casos realmente construidos en Chile, China, Armenia, Japón y USA.

Otros de los beneficios importantes de los sistemas de aislamiento es la protección de los contenidos de los edificios (por ejemplo en el caso de hospitales el equipamiento tiene un costo muchas veces mayores que el edificio mismo). Suministrar una mayor resistencia al edificio, en muchos casos, no garantiza valores aceptables de distorsiones de piso o de aceleraciones en altura. Cantidades elevadas de distorsiones de piso causan daños en los componentes no estructurales y en sus contenidos. Aumentar la rigidez del edificio permitiría disminuir la distorsión de piso, sin embargo ello no garantiza una reducción de las aceleraciones, por otro lado reducir la rigidez del mismo permitiría reducir las aceleraciones pero no las distorsiones de piso. Los sistemas de aislamiento sísmico permiten controlar simultáneamente los dos parámetros porque el mismo posee la flexibilidad necesaria como para concentrar toda la deformación a nivel de los dispositivos de aislamiento. (Tornello M., 2007)

Los sistemas de aislamiento sísmico no sólo se han utilizado en obras nuevas sino también en proyectos de edificios existentes. El problema que enfrentan las regiones de países desarrollados y no desarrollados emplazados en zonas de peligro sísmico, no es solamente la amenaza permanente de un terremoto destructivo sino, además, que muchos de sus construcciones (civiles, comerciales, industriales y de infraestructura) fueron construidas con códigos de edificación hoy obsoletos y en muchos otros casos con pocas prescripciones sísmicas. En alguna ocasión el edificio podrá ser demolido y reconstruido, en otros no, ya sea por razones económicas, sociales o históricas. Por lo tanto, hoy, los sistemas de aislamiento sísmico resultan ser técnicas no tradicionales para recuperar dichas construcciones con un grado de seguridad aceptable.

Los antecedentes indican que las técnicas de aislamiento han sido orientada fundamentalmente a grandes emprendimientos o bien a obras de infraestructura, aspecto que se considera altamente positivo, sin embargo, en países en vías de desarrollo se ha descuidado un gran número de obras, ampliamente difundidas y de construcción masiva (viviendas de uno o dos niveles, edificios comerciales, hoteles y edificios de departamentos de baja altura, estructuras y equipos industriales de bajo peso, equipos de estaciones transformadoras, etc.) que al igual que las grandes obras, sufren el impacto de un terremoto destructivo (pérdidas económicas y de vidas humanas, retraso socio económico de la región).

Si bien los dispositivos que hoy existen comercialmente pueden también utilizarse para el tipo de construcción mencionada en párrafo precedente, los mismos tienen, en general, para los países en vías de desarrollo, los siguientes inconvenientes: i) los dispositivos tienen sus propias patentes, ii) no se fabrican en el país y por lo tanto hay que importarlos con el consecuente incremento de los costos, iii) para amortizar su costo es necesario fabricar un número importante de dispositivos de tal manera que no tenga incidencia importante en el costo de la construcción; iv) no permite generar desarrollos con tecnología local.

Basado en tales necesidades, se ha diseñado y fabricado un dispositivo de aislamiento sísmico elastomérico para bajo nivel de carga axial, con el objeto de ser empleado en las construcciones previamente mencionadas. En el presente trabajo se presenta los resultados de los ensayos experimentales, de los distintos prototipos de aisladores fabricados, ensayados cargas verticales de compresión y horizontales cíclicas, con los cuales se obtienen las relaciones fuerza – desplazamiento y su validación a través de un modelo numérico

## 2 DISPOSITIVOS UTILIZADOS EN ESTRUCTURAS DE MEDIANA Y BAJA CARGA AXIAL

A nivel mundial existen escasos antecedentes sobre el uso de dispositivos de aislamiento para estructuras de bajo peso. Existen numerosas aplicaciones para aislar equipos industriales y máquinas en general de las vibraciones de otros equipos o para controlar los efectos de los terremotos.

De estos antecedentes podemos mencionar los dispositivos de aislamiento elastoméricos que utilizan placas de refuerzo de fibras en reemplazo de las placas de acero, con la intención de reducir los costos del aislador. Otro beneficio de usar refuerzo de fibra es que se pueden fabricar aisladores en tiras longitudinales, los cuales presentan una aplicación más sencilla en viviendas con estructuras de muros de hormigón o mampostería, que los aisladores cuadrados o circulares. En la Figura 2 se muestra el diseño de un sistema de aisladores elastoméricos en tiras longitudinales (Kelly J. M. and Marsico M. R. 2010).

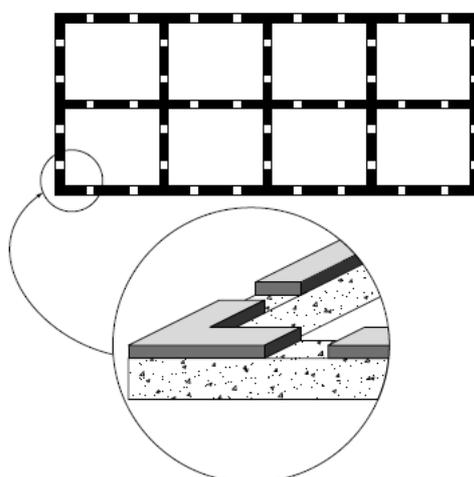


Figura 2: Sistema de aisladores elastoméricos en tiras longitudinales para muros.

Otro tipo de aisladores desarrollado como una alternativa para ser utilizado en construcciones de peso ligero y de bajo costo es el sistema de aislamiento conformado por bielas de hormigón armado (PPP) (Besa J. et al, 2010).

Este sistema se utilizó en la construcción de una vivienda en el vecino país de Chile, en el año 2009. La misma está edificada sobre una losa flotante, la cual se apoya sobre los aisladores tipo biela de hormigón armado y en dos aisladores elastoméricos, estos últimos tienen por función generar la fuerza restitutiva y favorecer que la vivienda recupere su posición original. En la Figura 3 se observan una fotografía de la losa por encima del sistema de aislación al momento de su construcción y una fotografía de la vivienda terminada. En la Figura 4 se muestran el sistema de aislamiento conformado por bielas de hormigón armado (PPP) y el aislador elastomérico (Revista BIT, 2010).

Esta alternativa propone el empleo de aisladores elastoméricos, para materializar la fuerza restitutiva, los cuales son de uso y fabricación normal. De este modo se genera una situación que no redunde en un beneficio económico para el tipo de construcción en la cual se lo utiliza y por otro lado genera dependencia tecnológica.



Figura 3: Vivienda con sistema de aislamiento sísmico construida en Chile en el año 2009.



Figura 4: Sistema de aislamiento conformado por bielas de hormigón armado (PPP) y aislador elastomérico.

En Ecuador se han construido y ensayados prototipos de aisladores elastómericos de bajo costo para ser utilizados en viviendas, los resultados obtenidos, si bien son positivos, indican un bajo factor amortiguamiento. Para la fabricación de los mismos se reciclaron neumáticos en desuso, generando un aporte al medio ambiente y abaratando costos, una fotografía de los prototipos se muestra en la Figura 5. (Aguiar R. et al, 2008; Auqui M., 2010).



Figura 5: Prototipos de aisladores elastoméricos fabricados en Ecuador.

De la evaluación de los antecedentes se deducen escasos estudios y aplicaciones de la técnica de aislamiento sísmico en estructuras con bajo peso además, escasas aplicaciones donde se haya generado nueva tecnología que permita reducir la incidencia de los dispositivos de aislamiento en el costo final de la estructura aislada.

En conclusión, la importancia del estudio se apoya en los principios básicos de las técnicas de protección sísmica hoy ampliamente difundidas a nivel mundial a excepción de nuestro país, es decir, entre los más importantes, asegurar la operatividad de las construcciones y de sus contenidos ante la ocurrencia de terremotos importantes, evitando las pérdidas de vidas humanas y económicas junto al retraso socio-económico que produce la ocurrencia de un terremoto destructivo. Si se mantiene dicha filosofía de diseño y se acepta que la técnica de aislamiento debe ser también extendida a construcciones de bajo y mediano peso, el resultado que pretende desarrollar este trabajo resulta un aporte importante a la técnica de protección sísmica, basada en la filosofía del aislamiento.

### 3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL AISLADOR ELASTOMÉRICO

Las características geométricas de los aisladores fabricados en el marco de un proyecto de investigación y de una tesis doctoral se muestran en la Figura 6. El aislador está conformado por dos pletinas de acero de conexión, inferior y superior, y por un taco de goma de 200 mm de altura.

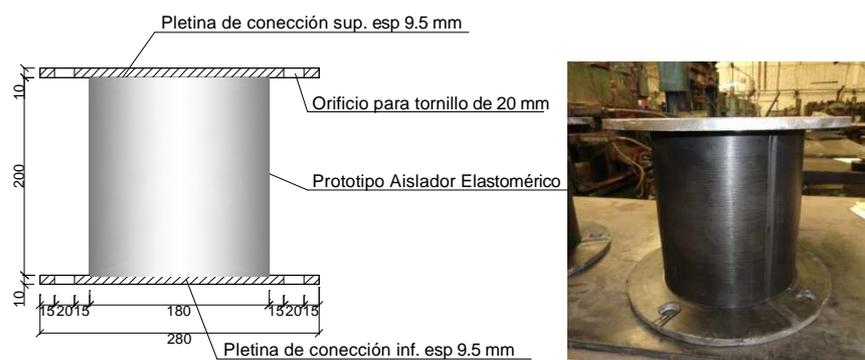


Figura 6: Características del aislador estudiado (Dimensiones en "mm")

Los dispositivos de aislamiento estudiados poseen dos diferencias características en relación a los que habitualmente se utilizan a nivel mundial. La primera es que no poseen las planchas de acero intermedias, vulcanizadas a las capas de goma situación que le confiere las siguientes características: i) se reducen notablemente los costos de fabricación, ii) se reduce su capacidad a carga axial y iii) se reduce la rigidez efectiva de los dispositivos.

La segunda característica está centrada en el núcleo del dispositivo de aislamiento. Mientras que los más frecuentemente utilizados a nivel mundial utilizan en algunos casos núcleos de plomo, los aisladores estudiados en el presente trabajo poseen un núcleo de elastómero confinado con un tubo de acero o bien con láminas de fibras (*tela cord*). Dicha característica también permite una reducción de los costos de fabricación y además plantea un desarrollo tecnológico diferente al conocido en la actualidad.

El diseño de los aisladores fue realizado en el ámbito del proyecto de investigación y la fabricación de los prototipos fue realizada en la empresa PRA BALDI HNOS S.A, al igual que los ensayos del elastómero base. Dicha empresa fabrica y comercializa productos moldeados, extruidos e inyectados en goma y PVC, fundada en Mendoza hace más de 60 años y cuenta con todos los elementos técnicos que hacen al desarrollo de piezas y el control de su producción pero no ha incursionado en el aislamiento sísmico como técnica de protección. Las actividades de investigación que se ejecutan en el ámbito del presente trabajo apuntan a desarrollar tecnología local a través de una transferencia de conocimiento a la empresa con el

objeto de contar con los instrumentos necesarios para realizar la fabricación de los dispositivos en la provincia de Mendoza.

En la fabricación de los dispositivos se tuvo en cuenta las especificaciones recomendadas para que un compuesto de elastómero base sea utilizado para tal fin. Los valores son: Dureza: 60 +/- 10 [shore]; Tensión máxima: > 17,0 [MPa]; Elongación máxima: > 400 %; Amortiguamiento: > 8 %; Módulo de corte:  $0,7 < G < 0,8$  [MPa]. (Araya Acle et al., 1994).

El compuesto de goma elegido para los prototipos que se diseñan y fabrican al objeto del presente trabajo es el típico de una goma utilizada para apoyos de puentes, los componentes y sus proporciones se resumen en la Tabla 1 (Gioacchini 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 FEF	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 antiozonantes		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 utilizado.

Se realizaron los siguientes ensayos al compuesto utilizado en la fabricación de los dispositivos: dureza, resistencia a la tracción máxima y elongación a la rotura y compresión residual. Para realizar dichos ensayos se confeccionaron dos probetas vulcanizadas bajo presión y temperatura durante 30 minutos.

Para los ensayos de tracción se utilizó la probeta tipo Dumbell las cuales se ensayaron con un dinamómetro. En la Figura 7 se muestran las probetas y el dinamómetro utilizado. La elongación última que se determinó en el ensayo corresponde a 417% y la tensión de tracción fue de 17,48 MPa. La dureza obtenida fue de 65 shore. Este método de ensayo se basa en la penetración de un indentador específico en el material. La compresión residual obtenida fue de 16.76%. Este ensayo tiene como objeto medir la capacidad del compuesto de goma a retener sus propiedades elásticas después de una prolongada compresión (Gioacchini et al., 2015).



Figura 7: Probetas y ensayos de dureza, tracción y compresión en el material base

En la figura 8 se observan los moldes de acero macizo que se construyeron especialmente para la fabricación de los prototipos. Los mismos deben resistir las presiones y temperatura a las que son sometidos en el momento de vulcanizar la pieza.



Figura 8: Moldes utilizados en la fabricación de los prototipos

La producción de las piezas fue principalmente manual, por lo que la participación de los operarios tuvo un efecto importante en el resultado final. El primer paso en la fabricación de los aisladores fue el de 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. El proceso de 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 de la pieza a confeccionar. Finalmente se realiza el desmolde de la probeta. En la Figura 9 se muestran los prototipos en el momento de su vulcanización y en la Figura 10 los prototipos ya desmoldados.



Figura 9: Proceso de vulcanizado de los prototipos



Figura 10: Desmolde de los prototipos

Si bien, tal cual se comentó previamente, el proceso de fabricación fue artesanal las fallas inherentes a dicha procedimiento fueron irrelevantes. En la Figura 10 puede observarse que la calidad, al menos aparente, de los dispositivos fue aceptable. Se fabricaron ocho prototipos de aisladores sísmicos, con cuatro tipos distintos de confinamiento de núcleo.

La primera serie de aisladores (dos prototipos) se fabricaron sin núcleo de confinamiento, a la cual se le ha dado el nombre de aislador sin núcleo confinado (ASNC).

La segunda serie corresponden a aisladores donde el núcleo del mismo ha sido confinado con un tubo de acero perforado de diámetro igual a 10 cm y un espesor de 6 mm, a la cual se le ha dado el nombre de aislador con núcleo de acero grueso (ANAG).

La tercera serie corresponden a aisladores donde el núcleo del mismo ha sido confinado con láminas de fibra (*tela cord*) formando un cilindro de diámetro igual a 10 cm, a la cual se le ha dado el nombre de aislador con núcleo de tela cord (ANTC).

La cuarta serie corresponden a aisladores donde el núcleo del mismo ha sido confinado con un tubo de acero de chapa perforada de diámetro igual a 10 cm y un espesor de 2 mm, a la cual se le ha dado el nombre de aislador con núcleo de acero fino (ANAF). Cabe aclarar que de esta última serie solo se ensayo uno de los prototipos, debido a que el segundo de ellos se sometió a ensayos previos hasta su colapso.

#### 4 ENSAYOS DE LOS PROTOTIPOS DE AISLADORES

Los ensayos a solicitaciones verticales y horizontales cíclicas de los prototipos del nuevo dispositivo de aislamiento sísmico se realizaron en el IMERIS (Instituto de Mecánica Estructural y Riesgo Sísmico) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo.

Para la ejecución de los ensayos fue requerido un pórtico de reacción, un actuador hidráulico de 12 toneladas para aplicar la solicitación horizontal cíclica, el cual es operado con un equipo de carga hidráulico y cuatro varillas roscadas fijadas a la losa reactiva para aplicar la solicitación vertical. El esquema del ensayo observa en la Figura 11.

El sistema de adquisición de datos estuvo compuesto por sensores, hardware de medidas y una PC con software programable en tiempo real. Los sensores utilizados fueron una celda de carga para medir las acciones verticales, una celda de carga para medir las acciones horizontales, un transformador diferencial de variación lineal (LVDT según sus siglas en inglés) para medir los desplazamientos horizontales y tres potenciómetros para medir los desplazamientos verticales.

Los aisladores fueron ensayados para dos desplazamientos verticales, 15mm y 30mm. Para cada desplazamiento vertical se realizaron 7 ciclos de desplazamientos horizontales de +/- 10 mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 60mm y 70mm. En la Figura 12 se muestran fotografías del ensayo de uno de los prototipos.

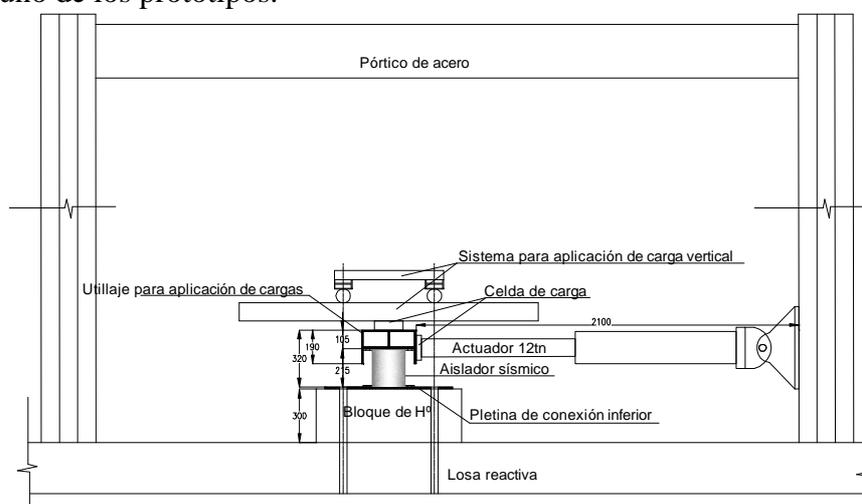


Figura 11: Esquema del ensayo de los prototipos



Figura12: Fotografías del ensayo de uno de los prototipos

A partir de los datos generados 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 histeréticos 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.

A continuación se muestra, de manera cualitativa, los gráficos de las relaciones fuerza – desplazamiento horizontal para el prototipo ASNC-1. En ellos se observa que la respuesta de los aisladores ensayados, indican una muy buena performance, situación que confirma los adecuados procedimientos implementados en la fabricación de los dispositivos.

En la Figura 13 se observa la relación fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómerico sin núcleo de confinamiento (ASNC-1). La relación se obtuvo para un desplazamiento vertical de 15mm y una carga vertical de 8.000 N.

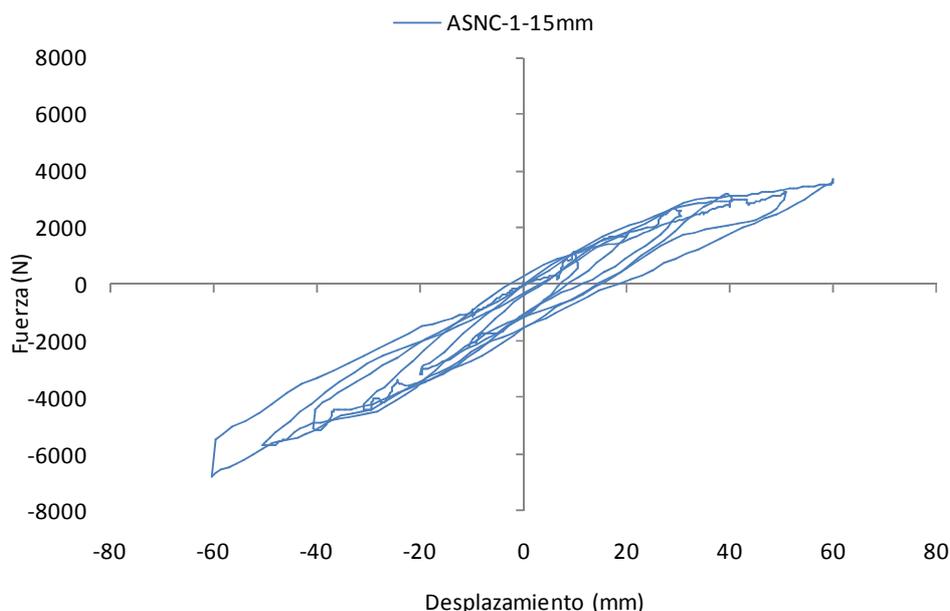


Figura.13: Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ASNC-1-15mm

En la Figura 14 se observa la relación fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómero sin núcleo de confinamiento (ASNC-1). La relación se obtuvo para un desplazamiento vertical de 30mm y una carga vertical de 17.000 N.

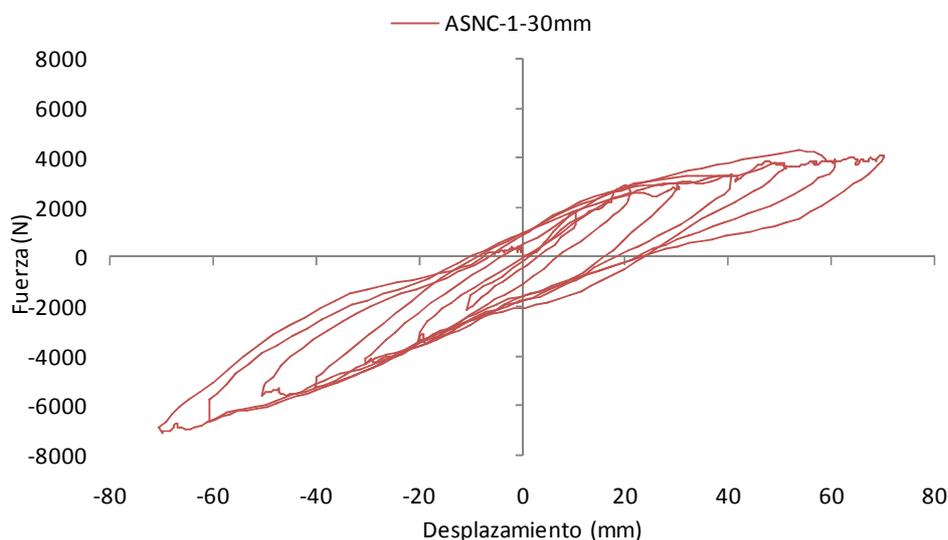


Figura 14: Relación fuerza–desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ASNC-1-30mm

En la Figura 15 se muestran las relaciones fuerza – desplazamiento horizontal del prototipo de aislador elastómero sin núcleo de confinamiento (ASNC-1), para ambos desplazamientos verticales estudiados (15mm y 30mm).

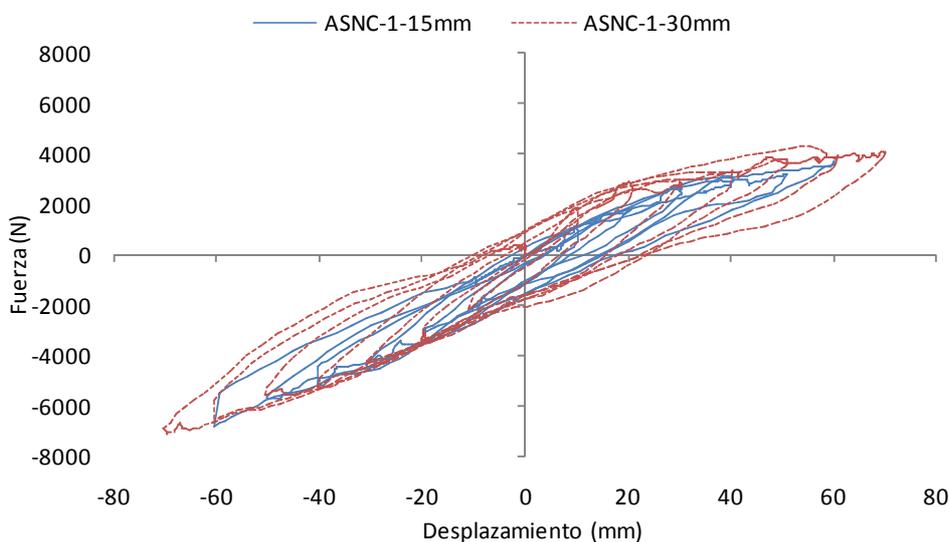


Figura 15. Relación fuerza – desplazamiento para acciones horizontales del prototipo ASNC-1, para desplazamientos verticales de 15mm y 30mm

En la Tabla 2 se muestra los resultados obtenidos para todos los prototipos del cálculo de la rigidez y el amortiguamiento efectivo realizado a partir de los ensayos experimentales. Donde  $W_o$  es el área del ciclo histerético;  $F^+$  y  $F^-$  son las fuerzas máximas y mínimas obtenidas del ciclo histerético;  $\Delta^+$  y  $\Delta^-$  son los desplazamientos máximos y mínimos obtenidos del ciclo histerético;  $k_{eff}$  es la rigidez efectiva;  $W_e$  es energía elástica.

		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	
$\Delta^+$	mm	60,00	70,00	71,00	70,00	70,00	71,00	71,00	70,00	70,00	71,00	70,00	
$\Delta^-$	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/m												
	m	87,64	77,06	90,19	88,39	85,01	82,07	89,28	84,07	79,70	84,87	111,65	
$W_e$	Nmm	157755	188789	227328	216563	208285	206860	225022	205974	195265	213921	273543	
$\xi_{eff}$	%	<b>0,111</b>	<b>0,169</b>	<b>0,110</b>	<b>0,162</b>	<b>0,155</b>	<b>0,139</b>	<b>0,208</b>	<b>0,101</b>	<b>0,161</b>	<b>0,122</b>	<b>0,126</b>	

Tabla 2: Rigidez y amortiguamiento efectivo de los dispositivos, obtenidos a partir de los ensayos experimentales

De los resultados obtenidos se deduce que el amortiguamiento efectivo encontrado, a partir de los datos de los ensayos experimentales, alcanzan valores más que aceptables (10% al 20%) y similares a otros aisladores elastoméricos convencionales que se comercializan en el mercado.

## 5 VALIDACIÓN Y CALIBRACION DEL MODELO NUMÉRICO

Para validar el modelo del dispositivo de aislamiento sísmico diseñado y fabricado en el ámbito del proyecto de investigación, se estudia numéricamente la respuesta mecánica, considerando el comportamiento no lineal de los materiales componentes y la interacción entre ellos a partir de una combinación de cargas ficticias. Para ello se emplea el modelo histerético de Wen con el cual se representa la ley constitutiva de los aisladores y se la compara con la obtenida de los ensayos experimentales. Para su análisis se utiliza la plataforma comercial Matlab (Matlab, 2000).

El modelo histerético de Wen (Bozzo, 1996; Ordoñez, 1996; Wen, 1976) se utiliza para una representación más precisa de un aislador de comportamiento no lineal en el cual se descompone la reacción elastoplástica en una componente directamente proporcional al desplazamiento y otra dependiente de la variable  $Z$ , donde la fuerza de restauración  $f$ :

$$f = \alpha k_i q_b + (1 - \alpha) k_i Z \quad (1)$$

Donde  $\alpha = k_j / k_i$  es un parámetro que indica el grado de no linealidad del sistema (por ejemplo  $\alpha = 1$  representa un sistema lineal) y  $Z$  es un parámetro histerético que satisface a la ecuación diferencial no lineal de primer orden (Bozzo, 1996; Ordoñez, 1996; Wen, 1976):

$$Z = A q_b - \left( \beta q_b |z|^n + \gamma q_b |z|^{n-1} z \right) \quad (2)$$

Los parámetros  $A$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $n$  que muestra la ecuación (2) son números adimensionales que regulan cada una de las características del comportamiento del modelo y que en definitiva representan los diferentes tipos de reacciones no lineales (Bozzo, 1996; Ordoñez, 1996; Wen, 1976):

A: Factor de escala general.

$\alpha$  : Razón de proporción entre la fuerza lineal y la fuerza no lineal.

$\beta, \gamma$  : Determinan la forma de la curva.

n : Regula la suavidad de la transición entre la región lineal y la no lineal.

La influencia que tienen los parámetros  $\beta$  y  $\gamma$  en la variable Z se puede visualizar al trazar la gráfica de dicha variable versus el desplazamiento, con una sollicitación externa de tipo periódica (sinusoidal a través del tiempo) que afecta a un oscilador de un grado de libertad, en el cual se incluye la fuerza restauradora representada por el modelo de Wen. (Ordoñez, 1996)

A modo de ejemplo en la Figura 16 se puede visualizar el comportamiento histerético que representan los parámetros  $\beta = 0.5$  y  $\gamma = 0.5$ .

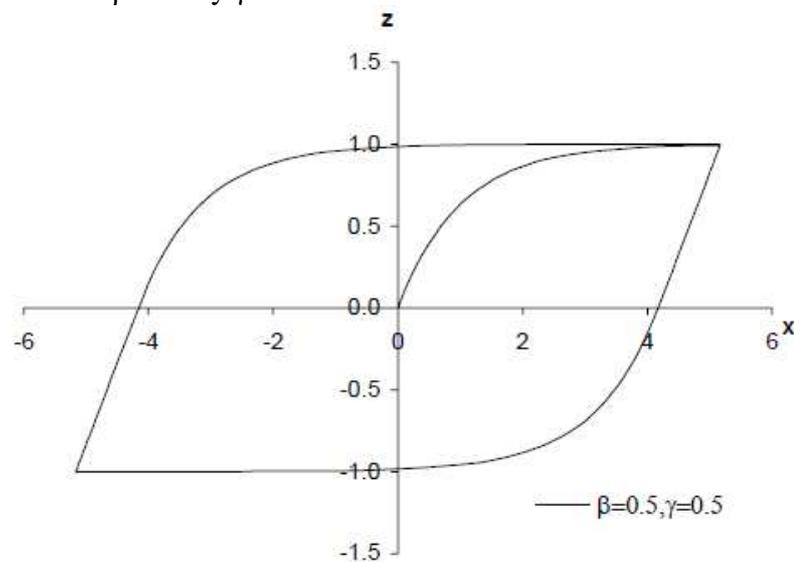


Figura 16: Curva histerética de Z versus x con  $\beta = 0.5$  y  $\gamma = 0.5$

Si se tiene un diagrama de fuerza - deformación como el que indica la Figura 17, se pueden definir dos parámetros adimensionales (3) y (4).

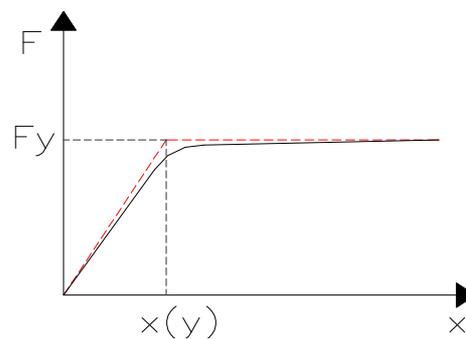


Figura 17: Constitutiva fuerza-deformación elasto-plástica a dimensional

$$Z = \frac{F}{F_y} \Rightarrow F = Z F_y \tag{3}$$

$$U = \frac{x}{x_{(y)}} \Rightarrow x = U x_{(y)} \tag{4}$$

Con estos dos parámetros la constitutiva dada por la Figura 17 se transforma en adimensional tomando la forma de la Figura 18. Y. Wen, define la siguiente relación:

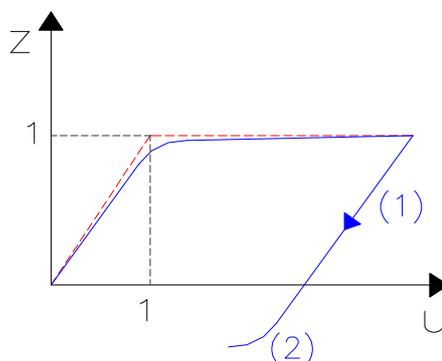


Figura 18 Constitutiva fuerza deformación elastoplástica

$$\frac{dz}{du} = 1 - |Z|^n \quad (5)$$

Cuando:  $n \Rightarrow \infty \Rightarrow$  la constitutiva es bilineal

El valor más comúnmente utilizado es  $n = 2$ , entonces:

$$\begin{aligned} \frac{dz}{du} = 1 - Z^2 &\Rightarrow \int \frac{dz}{1 - Z^2} = \int du \\ \operatorname{arctgh}(z) = u &; z = \operatorname{tgh}(u) \end{aligned} \quad (6)$$

La expresión (6) da solución al hecho de que cuando crece "Z", el valor tiende a uno (1), este efecto es como degradar la rigidez, porque aumenta "Z". Para producir la descarga de la rama (1) la multiplicamos por el signo de la velocidad "  $\operatorname{sign} \dot{U}$  "

$$\frac{dz}{du} = 1 - Z^2 \operatorname{sign}(\dot{U})$$

Luego para volver a degradar la rigidez y pasar a la rama (2), la expresión es la siguiente:

$$\frac{dz}{du} = 1 - Z^2 \operatorname{sign}(\dot{U} \cdot Z)$$

Para regular la pendiente y que no decaiga con  $\frac{dz}{du} = 2 \left( \underbrace{\frac{dz}{du} = 1 - Z^2 \operatorname{sign}(\dot{U})}_{=1} \right)$  hacemos:

$$\frac{dz}{du} = 1 - Z^2 \left[ \beta \operatorname{sign}(\dot{U} \cdot Z) + \gamma \right]$$

Dónde:  $\beta; \gamma$ , son factores que pueden tomar valores aproximados a 0.50.

Por ejemplo:  $\beta + \gamma = 0.50 + 0.50 = 1.00$

$\beta + \gamma = 0.70 + 0.30 = 1.00$

Al cambiar los valores de los parámetros cambian las pendientes de la constitutiva.

Para disponer de en un formato que sea sencillo trabajar con la constitutiva de Wen, se

utiliza la expresión siguiente:

$$dz = \left\{ 1 - Z^2 \left[ \beta \operatorname{sign}(\dot{U} \cdot Z) + \gamma \right] \right\} du$$

Dividimos por “dt”:

$$\frac{dz}{dt} = \left\{ 1 - Z^2 \left[ \beta \operatorname{sign}(\dot{U} \cdot Z) + \gamma \right] \right\} \frac{du}{dt}$$

$$\dot{Z} = \left\{ 1 - Z^2 \left[ \beta \operatorname{sign}(\dot{U} \cdot Z) + \gamma \right] \right\} \dot{U} \quad (7)$$

Nótese que la expresión (7) tiene la forma de  $y = f(y)$

Se realiza una formulación en Espacio Estado:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + \alpha Kx + (1 - \alpha)F_y Z = -m r \ddot{y}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \ddot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{\alpha K}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \ddot{y} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{(1 + \alpha)F_y Z}{m} \end{bmatrix}$$

↓  
Inicialmente este valor es cero, porque  $Z = 0$

Para programar la constitutiva en una rutina de Matlab:

$$\begin{aligned} & \dot{X}_{(1)} \quad \dot{X}_{(2)} \\ & \dot{X}_m = \frac{\dot{X}_{(K)} + \dot{X}_{(K+1)}}{2} \\ & \dot{U} = \frac{\dot{X}_m}{x(y)} \Rightarrow \text{ode } Z_{(K+1)} \end{aligned}$$

El “ode” de Matlab entrega la respuesta de la Constitutiva de WEN.

Lo desarrollado precedentemente corresponde a un análisis unidireccional. Para un planteo bidireccional el sistema de ecuaciones es:

*for i = 1:n % n = número de aisladores*

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_x \\ \dot{Z}_y \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_x^2 \left[ \beta \operatorname{sign}(\dot{U}_x Z_x) + \gamma \right] & Z_y Z_x \left[ \beta \operatorname{sign}(\dot{U}_x Z_x) + \gamma \right] \\ Z_y Z_x \left[ \beta \operatorname{sign}(\dot{U}_x Z_x) + \gamma \right] & Z_y^2 \left[ \beta \operatorname{sign}(\dot{U}_x Z_x) + \gamma \right] \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \dot{U}_x \\ \dot{U}_y \end{bmatrix}$$

Para calibrar los parámetros del modelo numérico de Wen se empleó una rutina de trabajo, los parámetros a ingresar en dicha rutina se obtienen de los ensayos a sollicitaciones verticales y horizontales cíclicas realizados a los prototipos aisladores sísmicos.

Los ciclos histeréticos obtenidos con el modelo numérico de Wen se comparan con los generados a partir de los ensayos experimentales, para cada uno de los prototipos. Hay que remarcar que los ciclos histeréticos de los ensayos no presentan simetrías, mientras que los logrados a partir del modelo son simétricos y de curvas más suaves. Igualmente la aproximación cualitativa de ambos ciclos es satisfactoria para todos los casos. En las figuras siguientes se muestran superpuestos los ciclos histeréticos del ensayo y del modelo de Wen para el prototipo ASNC-1.

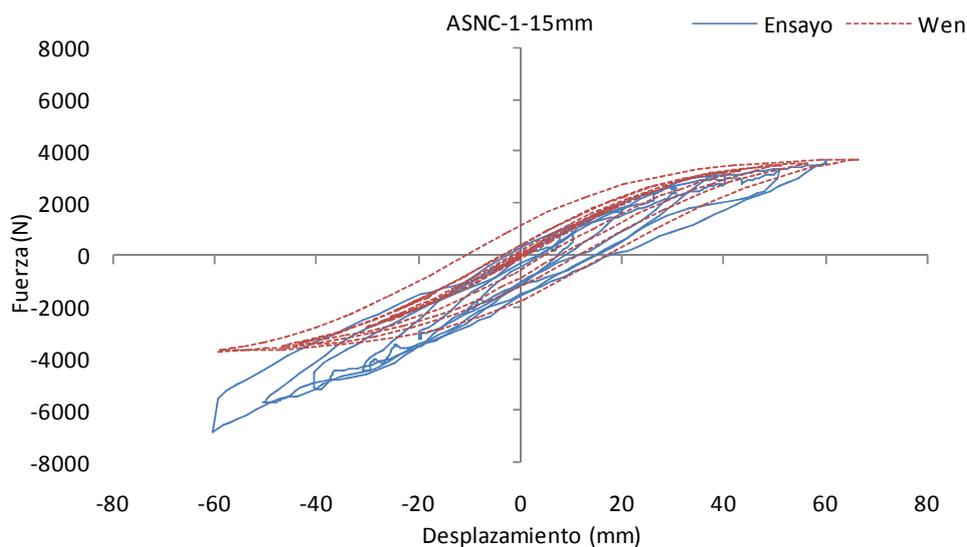


Figura 20: Comparación de los ciclos histeréticos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ASNC-1-15mm

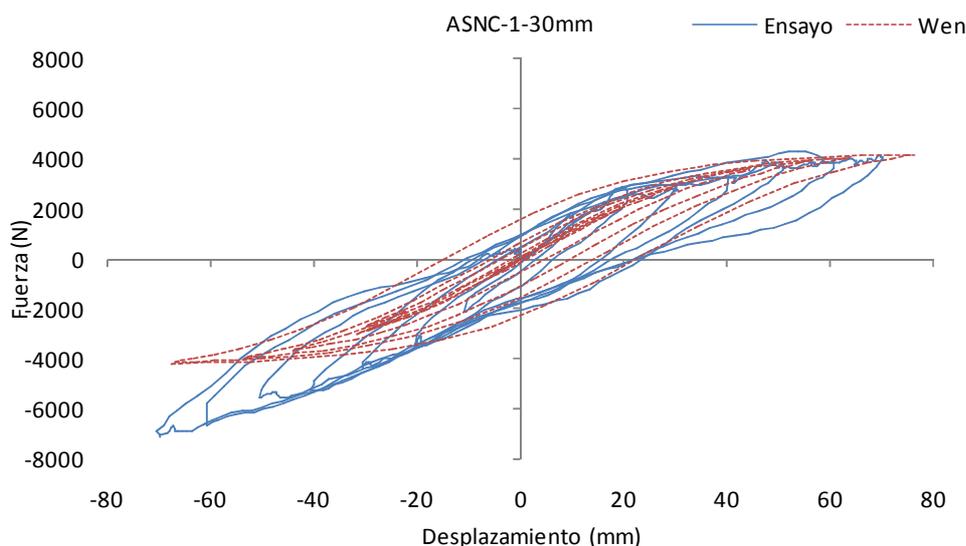


Figura 21: Comparación de los ciclos histeréticos obtenidos a partir del ensayo experimental y del modelo numérico para el aislador ASNC-1-30mm

Para realizar un análisis comparativo cuantitativo se obtuvo de los ciclos histeréticos, generados a partir del modelo numérico de Wen, la rigidez y amortiguamiento efectivos teóricos.

En la Tabla 3 se visualiza los amortiguamientos efectivos obtenidos a partir de los ensayos ( $\xi_{eff}$ ) y los generados con el modelo numérico de Wen ( $\xi_{eff}$ ). A partir de los resultados mostrados, se puede concluir que el modelo numérico seleccionado y calibrado, es adecuado para representar y validar todos los ensayos.

		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
$\Delta^+$	mm	60,00	70,00	71,00	70,00	70,00	71,00	71,00	70,00	70,00	71,00	70,00
$\Delta^-$	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
$W_e$	Nmm	157755	188789	227328	216563	208285	206860	225022	205974	195265	213921	273543
$\xi_{eff}$	%	<b>0,111</b>	<b>0,169</b>	<b>0,110</b>	<b>0,162</b>	<b>0,155</b>	<b>0,139</b>	<b>0,208</b>	<b>0,101</b>	<b>0,161</b>	<b>0,122</b>	<b>0,126</b>
$W_{ot}$	Nmm	190500	357300	220860	333500	331440	268320	444890	193960	317140	214960	309190
$F_t^+$	N	3714	4183	4219	4050	4186	3899	4158	4001	4119	4001	4633
$F_t^-$	N	3714	4183	4181	4059	4183	3910	4171	3958	4072	3956	4586
$\Delta_t^+$	mm	66,00	76,00	70,00	76,00	76,00	73,00	79,00	69,00	73,00	69,00	83,00
$\Delta_t^-$	mm	59,00	67,00	64,00	71,00	67,00	69,00	77,00	62,00	64,00	62,00	73,00
$k_{eff t}$	N/mm	59,42	58,50	62,69	55,16	58,52	54,99	53,39	60,76	59,79	60,74	59,10
$W_{et}$	Nmm	129425	168958	153582	159312	169019	146529	166607	144629	159306	144593	203557
$\xi_{eff t}$	%	<b>0,117</b>	<b>0,168</b>	<b>0,114</b>	<b>0,167</b>	<b>0,156</b>	<b>0,146</b>	<b>0,212</b>	<b>0,107</b>	<b>0,158</b>	<b>0,118</b>	<b>0,121</b>

Tabla 3: Comparación del amortiguamiento efectivo obtenido a partir de los ensayos ( $\xi_{eff}$ ) y del obtenido del modelo numérico de Wen ( $\xi_{eff}$ ).

Donde  $W_o$  es el área del ciclo histerético;  $F^+$  y  $F^-$  son las fuerzas máximas y mínimas obtenidas del ciclo histerético;  $\Delta^+$  y  $\Delta^-$  son los desplazamientos máximos y mínimos obtenidos del ciclo histerético;  $k_{eff}$  es la rigidez efectiva;  $W_e$  es energía elástica. Estos parámetros corresponden a los obtenidos a partir de los ensayos, los mismos pero con subíndice "t" al final, se han generado a partir del modelo numérico.

## 6 CONCLUSIONES

En los ensayos experimentales los máximos desplazamientos de los dispositivos de aislamiento se consiguieron sin falla en los aisladores situación que denota la adecuada fabricación de los mismos a pesar de haber tenido una fuerte componente artesanal en su elaboración. Además, en todos los casos, el aislador recupero su posición final por lo que es posible garantizar la fuerza restitutiva de los dispositivos que se estudiaron en el presente trabajo.

Los ciclos de histéresis obtenidos experimentalmente resultan estables y no se observan pérdidas de rigidez lateral de los dispositivos de aislamiento estudiados en el presente trabajo.

Se verifica que la rigidez efectiva de los dispositivos de aislamiento está en función de las características geométricas y mecánicas de los aisladores con valores finales que varían entre 79 y 112 N/mm.

El amortiguamiento efectivo determinado a partir de los ensayos experimentales, alcanza valores entre el 10% y el 20%, que resultan muy similares a otros aisladores elastoméricos convencionales que se comercializan en el mercado.

Los ciclos histéricos experimentales no presentan simetría, en términos de desplazamiento: Es probable que dicha disimetría se deba a consecuencia del sistema de aplicación de cargas.

Se realizó una modelación numérica a partir de un modelo conocido (Wen) y de los resultados de los ensayos.

Los resultados obtenidos en términos de amortiguamiento efectivo son aceptables y presentan escasos márgenes de error. Así, el modelo de Wen resulta adecuado para caracterizar numéricamente este tipo de aisladores cuando es alimentado por datos experimentales.

## REFERENCIAS

- Aguiar R., Almazán J. L., Dechent P., Suárez V. "Aisladores de base Elastoméricos y FPS", Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 292 p., Quito, Ecuador. (2008.)
- Auqui M. V., Aguiar R., Gómez P. Análisis de aisladores sísmicos elastoméricos construidos en el Ecuador. Proyecto previo a la obtención de título de ingeniero civil. (2010)
- Besa, J., de la Llera J. C., Jünemann R., Experimental behavior and design of a new kinematic isolator. *Engineering Structures*, Vol.32, 508-522, (2010).
- Bozzo, L. M. Análisis de edificios con sistemas de aislamiento de base. En: Barbat, A.; L. Aguiar, eds. Ingeniería de estructuras. Escuela superior politécnica del ejército. Quito, Ecuador. 1(1): 17-38. (1996)
- Gioacchini G., Tornello M., Frau C. Modelación numerica y resultados experimentales de un dispositivo de aislamiento sísmico. Edición: Instituto de Filosofía, Universidad de Valparaíso. ISBN 978-956-358-724-1. Vol.I, 55-72. (2015)
- Jangid R. S., Kelly J. M. Base Isolation for near-fault motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30:691-707. 16. (2001)
- Kelly J. M. and Marsico M. R. Stability and post-buckling behavior in nonbolted elastomeric isolators. Mathematical sciences publishers. Vol 1- n°1. (2010)
- Kelly J. M., Calabrese A. y Serino G., Design criteria for Fiber Reinforced Rubber Bearings. *15WCEE*, Lisboa. (2012)
- Naeim F., Kelly J. Design of seismic isolated structures. Editorial Wiley and Sons INE. (1999)
- Ordoñez, D. Estudio comparativo de la respuesta estructural inelástica de edificios sismorresistente con aislamiento de base. Tesis Mag. Ing. Sísmico y Dinámica Estructural. Universidad Politécnica de Cataluña. 58p. (1996)
- Revista BIT, Especial terremoto Chile 2010. Aislación y disipación de energía. Mayo2010.(Disponible online [www.fiic.la/.../DELALLERA%202.pdf](http://www.fiic.la/.../DELALLERA%202.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)

Wen, Y. Method for random vibration of hysteretic system. Journal of the engineering mechanics division. Abril. 102 (EM2):249-26. (1976)

### **AGRADECIMIENTOS**

Programa de Becas Doctorales para Docentes UTN. Subsecretaría de Posgrado. Secretaría de Ciencia y Tecnología. Rectorado. UTN.

Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza.

CeReDeTeC. Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica.