

ENSAYE EXPERIMENTAL DE CONTRAVENTEOS RESTRINGIDOS AL PANDEO

**ELABORADO PARA:
DAMPO SYSTEMS SA DE CV**

**POR:
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**

SEPTIEMBRE, 2019

1 INTRODUCCIÓN

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM) desarrolló y realizó la solicitud de patente de un contraventeo restringido al pandeo innovador. Este dispositivo fue ensayado y validado en laboratorio, y se realizó este reporte como parte de los entregables a la empresa Dampo Systems SA de CV, quienes adquirieron los derechos de comercialización del dispositivo.

Cabe destacar que las pruebas del dispositivo se llevaron a cabo en el Laboratorio de Estructuras del IIUNAM, de junio a agosto de 2019.

Se ensayaron dos dispositivos ante carga cíclica reversible, aplicada de manera cuasi-estática y controlada por desplazamientos. Un dispositivo ensayado fue un contraventeo restringido al pandeo convencional que sirvió como referencia para fines de comparación. El otro dispositivo fue el propuesto por el IIUNAM.

En este informe se presentan las características de ambos dispositivos ensayados, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos en términos de las curvas de histéresis y energía disipada. Al final se presentan conclusiones producto de observaciones hechas durante la realización del estudio.

2 CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO

2.1 Arreglo experimental

Los dispositivos se ensayaron en un marco de carga como el que se muestra esquemáticamente en la Figura 1. Se puede ver que el marco se fijó a una losa de reacción. Luego, se aplicó carga cíclica con la ayuda de un actuador MTS sujetado de la trabe superior del marco de carga. Nótese que el contraventeo restringido al pandeo se colocó entre el actuador y una placa anclada a la losa de reacción.

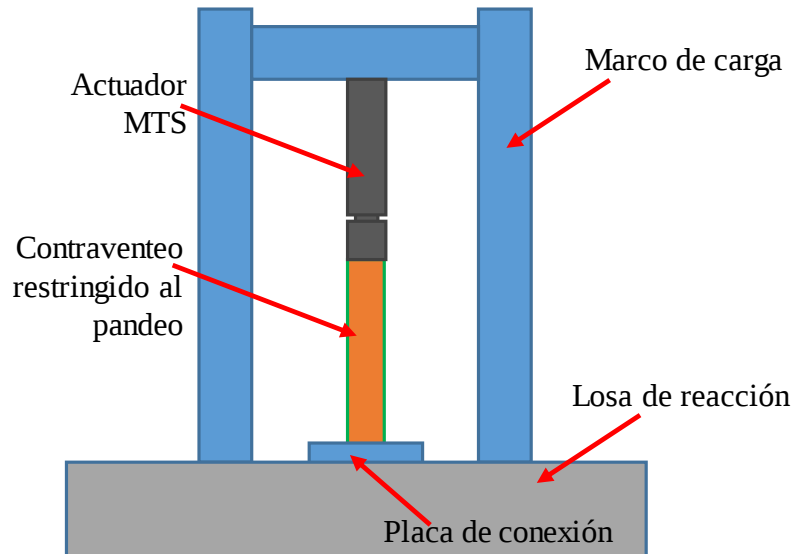


Figura 1. Esquema del arreglo experimental.

2.2 Especímenes ensayados

La Figura 2, muestra un croquis de los especímenes ensayados junto con sus dimensiones, en cm. Se puede observar que el Especímen 2 contaba con una camisa exterior metálica, mientras que el Especímen 1 no la tenía. Nótese que ambos dispositivos tenían placas de fijación, una en la parte superior y otra en la parte inferior. Esas placas permitieron conectar los dispositivos a la losa de reacción y al actuador, como se aprecia en la Figura 1. La altura total del espécimen ensayado fue de 100 cm. La sección transversal del núcleo, en la zona más débil, fue de 9.5 x 50 mm, es decir, 475 mm², misma que creció en los extremos a 1430 mm². Es importante mencionar que la camisa exterior del Especímen 2 fue hecha a base de cuatro placas de 1.2 mm de espesor y 135 mm de ancho. Sin embargo, su área efectiva se redujo por unas multiperforaciones de 30x90 cm, como se indica en la Figura 2, resultando en un área transversal efectiva de 600 mm².

La resistencia del acero que componía al núcleo se midió a mediante pruebas a tensión de probetas de acero extraídas del mismo lote de material con que el núcleo de acero fue hecho. La curva se muestra en la Figura 3, donde el esfuerzo de fluencia resultó 3790 kg/cm² y el esfuerzo máximo de 5000 kg/cm².

Cabe aclarar que los especímenes fueron diseñados para resistir las cargas que se especifican en la Tabla 1. El Especímen 1 fue diseñado para resistir una carga a la fluencia de 16.6 t en tensión y en compresión, una carga última en tensión de 22 t y una carga última en compresión de 24 t. Por su parte, el Especímen 2 fue diseñado para resistir una carga a la fluencia de 27.5 t en tensión y de 16.6 t en compresión, una carga última en tensión de 22 t y una carga última en compresión de 24 t.

Tabla 1. Cargas de diseño de los CRP ensayados.

Especímen	Carga de fluencia		Carga máxima	
	en compresión	en tensión	en compresión	en tensión
1	16.6 t	16.6 t	24.0 t	22.0 t
2	16.6 t	27.5 t	24.0 t	22.0 t

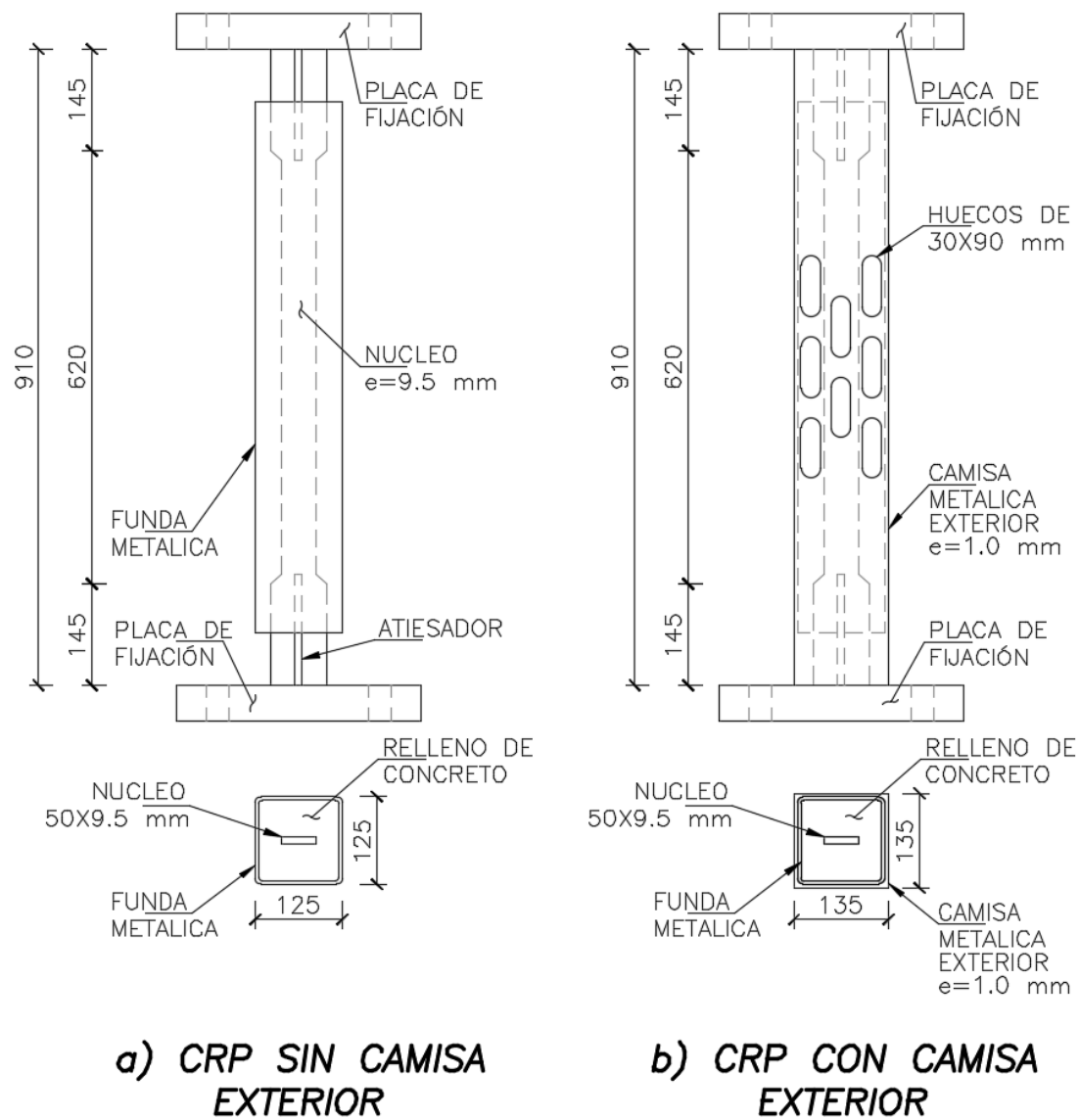


Figura 2. Dimensiones del disipador ensayado, en mm: a) Espécimen 1, b) Espécimen 2.

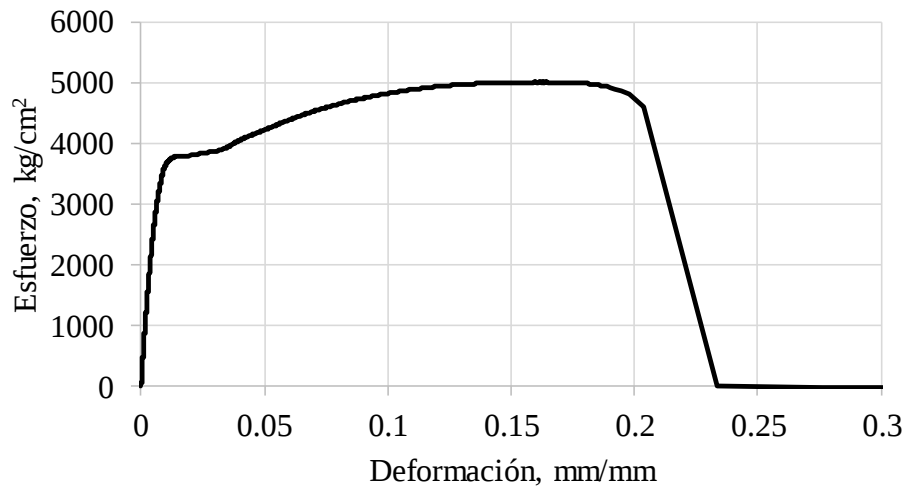


Figura 3. Curva experimental esfuerzo-deformación del acero del núcleo.

2.3 Protocolo de carga

Se aplicaron tres protocolos de carga. El primero consistió en aplicar dos ciclos de desplazamiento de ± 0.25 mm (Figura 4a). El segundo, que siguió las recomendaciones de AISC (2016) y Merrit et al. (2003), se presenta en la Figura 4b. Y el tercero consistió en aplicar ciclos de desplazamientos de gran amplitud para evaluar la fatiga del disipador (Figura 4c). Los tres protocolos de carga fueron aplicados de manera cuasi-estática, con un actuador MTS con capacidad de ± 50 t y carrera de ± 100 mm. Todas las pruebas se hicieron controladas por desplazamientos. En la Figura 4, se aprecia que se aplicaron desplazamientos de 0.25 a 20 mm; con dos ciclos de carga por cada nivel de desplazamiento.

Es importante mencionar que todos los desplazamientos se controlaron con la lectura del actuador hidráulico.

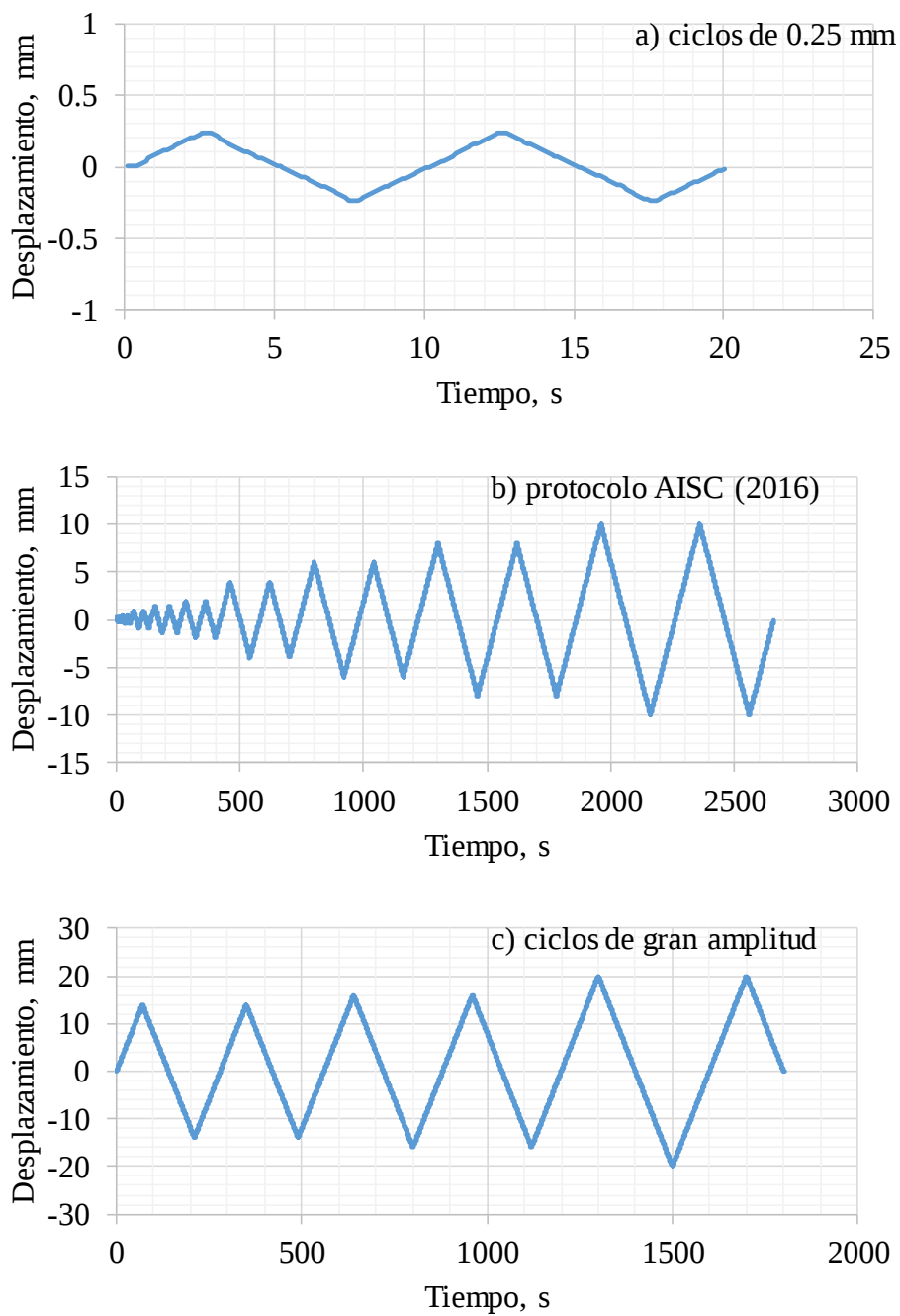


Figura 3. Protocolo de desplazamientos aplicados en la segunda etapa de las pruebas.

2.4 Instrumentación

Para medir los desplazamientos y cargas aplicadas se utilizaron el transductor de desplazamientos y la celda de carga del actuador hidráulico. También se utilizaron otros tres transductores de desplazamientos externos, uno paralelo al eje principal de los dispositivos y dos perpendiculares a éste. Adicionalmente se colocó una instrumentación a base de fibra óptica. Dado que el transductor de desplazamientos y la celda de carga del actuador hidráulico generaron información confiable, sólo se reportan los resultados de éstos en este reporte. A manera de ejemplo, la Figura 4 muestra una fotografía del Espécimen 2 con su instrumentación. Se pueden ver los transductores de desplazamiento externos y los sensores de fibra óptica.



Figura 4. Fotografía del Espécimen 2 con su instrumentación.

3. RESULTADOS

3.1 Curvas de histéresis

La Figura 5 muestra las curvas carga-deformación, mejor conocidas como curvas de histéresis, para cada prueba realizada. Se puede observar que ambos especímenes permanecieron prácticamente elástico-lineales ante los ciclos de desplazamientos aplicados en la primera prueba (± 0.25 mm). En la segunda prueba se puede ver que los dispositivos desarrollaron comportamiento inelástico estable, logrando alcanzar un desplazamiento máximo de 10 mm; lo que representa una ductilidad de desplazamiento de 7, pues la fluencia se alcanzó a los 1.41 mm. Finalmente, en la Prueba 3 se puede ver que los dispositivos lograron alcanzar una deformación máxima de 20 mm, equivalente a una ductilidad de 14, antes de presentar falla.

Es importante mencionar que el Espécimen 2 logró alcanzar una tensión cercana a 30 t, lo que ocurrió debido a la camisa exterior. De lado de la compresión se alcanza a observar un pequeño incremento en la resistencia de fluencia, mismo que se desvanece rápidamente debido al pandeo de la camisa exterior bajo cargas de compresión.

La resistencia última, en tensión y en compresión, resultó similar para ambos dispositivos. Mientras que el Espécimen 1 tuvo una carga última en tensión de 22 t, el Espécimen 2 presentó 21.5 t. De lado de la compresión, la resistencia última del Espécimen 1 fue de 24 t, mientras que el Espécimen 2 presentó 24.5 t.

En general se puede ver que las resistencias a la flexión y últimas son muy similares a las calculadas en la etapa de diseño (ver Tabla 1). Ello permite decir que los dispositivos tienen una capacidad de carga predecible con métodos analíticos.

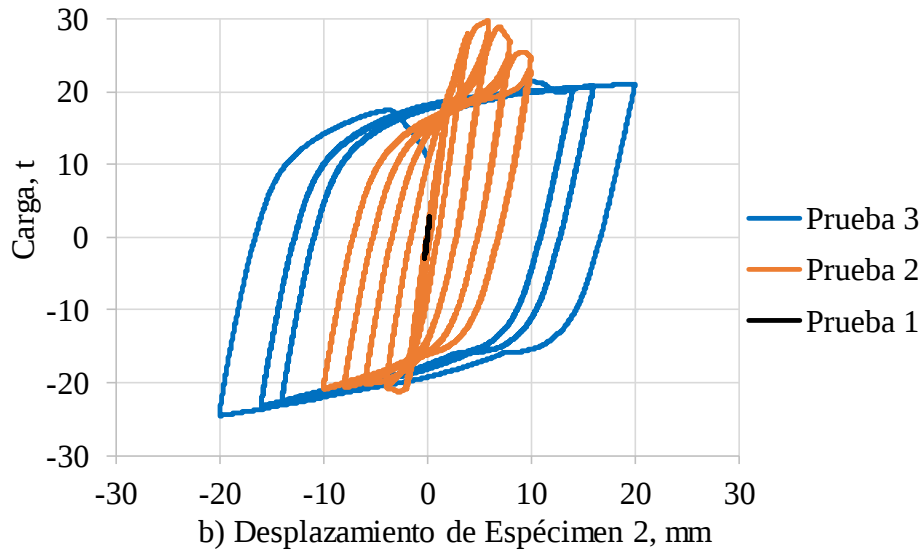
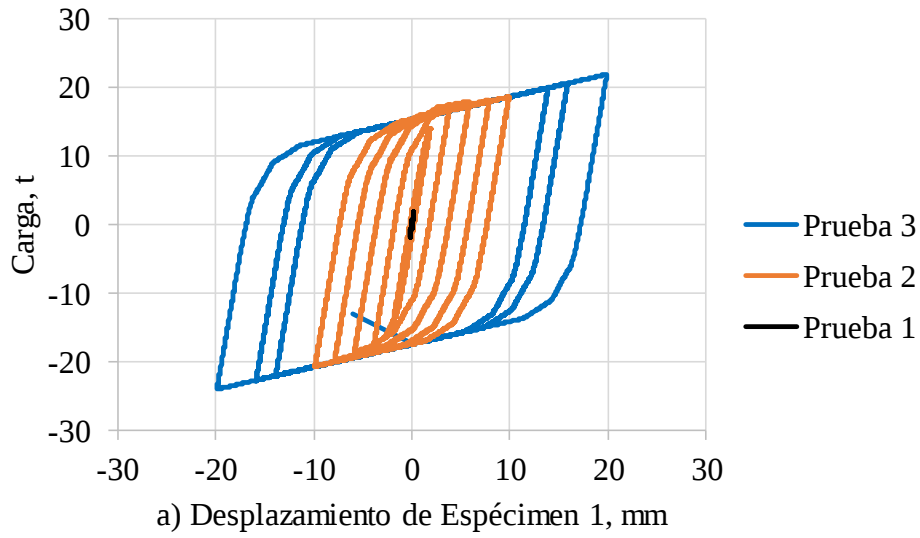


Figura 5. Curvas carga-deformación de las pruebas de ambos dispositivos.

3.2 Capacidad de disipación y ductilidad acumulada

Se calculó la capacidad de disipación de energía, E_{his} , y la ductilidad acumulada, μ_{ac} , de ambos dispositivos ensayados usando las ecuaciones (1) y (2) (Merrit et al., 2003).

$$E_{his} = \int P du \quad (1)$$

$$\mu_{ac} = \frac{E_{his}}{P_y u_y} \quad (2)$$

donde P y u son la carga y el desplazamiento axiales y P_y y u_y son la carga y el desplazamiento axiales de fluencia.

Las Figura 6 muestra la variación de la disipación de energía y la ductilidad acumulada en el tiempo que duró cada prueba. Se puede ver que ambos dispositivos superaron el valor mínimo de ductilidad acumulada, de 200, que recomienda AISC (2016). Para fines ilustrativos, en la figura se muestra la demanda de ductilidad acumulada de un oscilador de un grado de libertad, con periodo de vibrar de 1 s, sujeto al movimiento sísmico de SCT componente Este-Oeste del 19 de septiembre de 1985 para una ductilidad pico de 4.0, relación de amortiguamiento de 0.05 y comportamiento elasto-plástico perfecto. Se puede ver que la demanda de ductilidad acumulada es de 61.9, lo que es casi cinco veces inferior a la capacidad de disipación de los dispositivos.

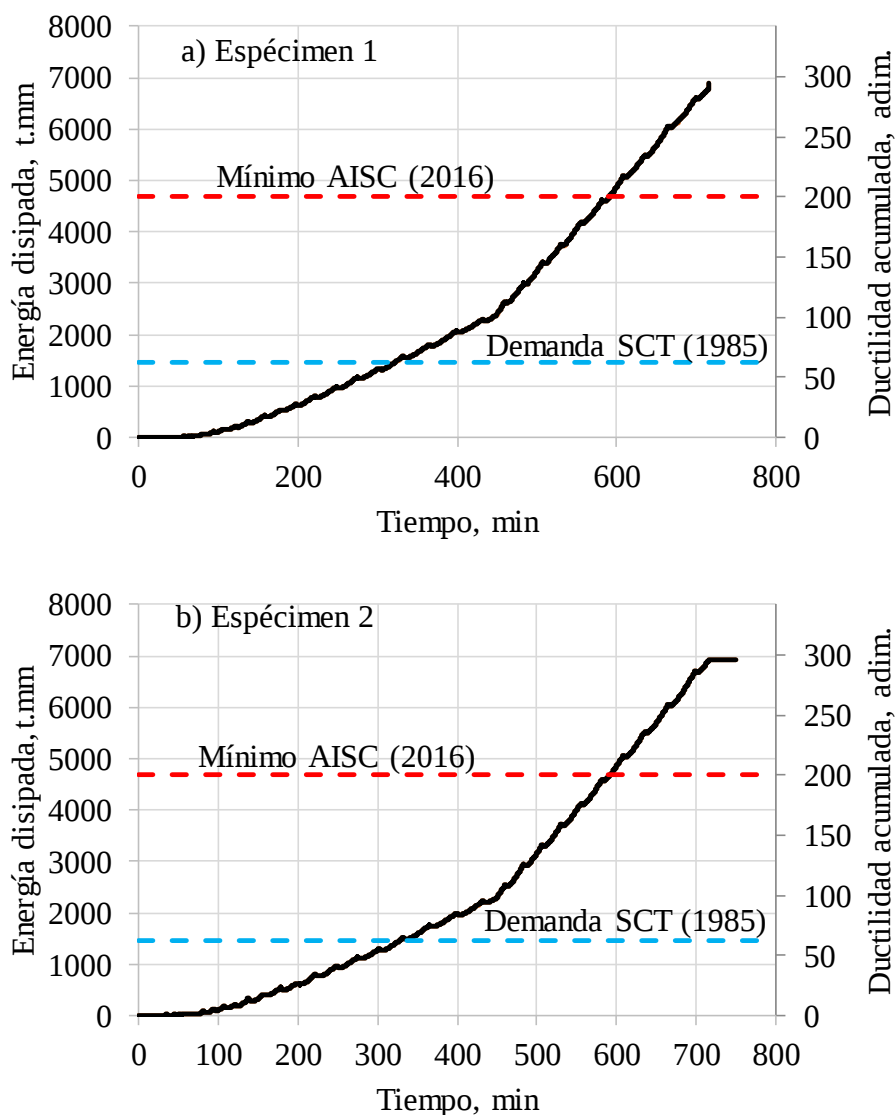


Figura 6. Curvas energía y ductilidad acumulada.

5. CONCLUSIONES

Se realizaron pruebas experimentales en dos contraventeos restringidos al pandeo, uno convencional y otro innovador propuesto en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, ante carga cíclica reversible, aplicada de manera cuasi-estática. Se observó lo siguiente:

- Ambos dispositivos presentaron comportamiento elástico-lineal durante la aplicación del primer protocolo de carga, donde se aplicaron dos ciclos de desplazamientos de ± 0.50 mm.
- Después, durante la aplicación del segundo protocolo de carga, los dispositivos presentaron comportamiento inelástico estable, logrando deformaciones de hasta 10 mm y ductilidad de desplazamiento de 7.0.
- El Espécimen 2, propuesto en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, logró una resistencia mayor en tensión gracias a la funda metálica exterior. Esta funda tiene la ventaja de indicar, de manera visual, el nivel de deformación que ha ocurrido en el dispositivo. Eso sirve como un indicador de degradación que eventualmente puede ayudar a determinar si el dispositivo debe ser reemplazado por uno nuevo. La capacidad en tensión del dispositivo propuesto se puede controlar mediante la capacidad de carga de la funda y del núcleo del dispositivo.
- Ambos dispositivos fueron ensayados con un protocolo de carga de deformaciones grandes, lográndose deformaciones de ± 20 mm, y ductilidad de desplazamiento de 14. Ello permite mostrar que los dispositivos tienen una capacidad inelástica muy buena.
- La capacidad de ductilidad acumulada, como una medida de la capacidad de disipación de energía, resultó cercana a 300. Ello es superior al mínimo de 200 establecido por AISC (2016) y casi cinco veces superior a la demanda esperada ante un sismo muy intenso.

En general, las pruebas mostraron que ambos dispositivos ensayados lograron desarrollar un buen comportamiento inelástico estable con gran capacidad de disipación de energía. Las resistencias medidas en las pruebas resultaron muy similares a aquellas consideradas en la

etapa de diseño, lo que permite asegurar que ambos dispositivos tienen capacidades de carga, a la fluencia y últimas, predecibles de manera analítica.

Referencias

- Merrit, S., Uang, C.M. y Benzoni, G., (2003), “Subassemblage testing of Corebrace Buckling-Restrained Braces”, Reporte No. TR-2003/01, Universidad de California, San Diego, EUA.
- AISC (2016). AISC 341 - Seismic provisions for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction. EEUU.