

Caracterización experimental de riostras de pandeo restringido a escala sometidas a cargas cíclicas

Experimental Characterization of Practical Scale Buckling Restrained Braces under Cyclic Testing

Román Andrés Cancelado⁽¹⁾

⁽¹⁾ Ingeniero Civil. Magíster en Ingeniería-Estructuras. Integrante del Grupo de Investigación en Análisis, Diseño y Materiales (GIES), Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. acancelador@unal.edu.co

Recibido 10 de agosto de 2012. Modificado 28 de noviembre de 2013. Aprobado 14 de octubre de 2013.

Palabras claves

Disipadores de energía, estructuras metálicas, experimentación, ingeniería civil, riostras de pandeo restringido.

Resumen

Se realizan ensayos cíclicos a cuatro riostras de pandeo restringido (*Buckling Restrained Braces*) fabricadas a escala 1:4, elaboradas en el país. Las riostras están constituidas por un núcleo de acero, superficie aislante, mortero de relleno y encamisado en perfil de acero. Como resultado se presentan las curvas fuerza-desplazamiento, las curvas características y los factores de ajuste de resistencia. Se concluye que los ensayos cumplen los criterios de aceptación de ensayos cíclicos de calificación. No hay degradación de la rigidez en las curvas de histéresis. La deformación axial inelástica acumulada de las probetas es superior al recomendado por normatividad.

Key words

Buckling restrained braces, civil engineering, energy dissipaters, steel structures, testing.

Abstract

Cyclic testing of four 1:4 scale buckling restrained braces (BRB), built with local materials and labor are realized. The braces consist of a configuration of steel plate core, an insulating surface, filling mortar as confining material and hollow steel structural as a confinement sleeve. The force-displacement curves, the characteristic curve of the braces and the adjustment strength factors are determined and studied. It is concluded that the tests satisfy the acceptance criteria for qualifying cyclic testing. There is no stiffness degradation of hysteresis loops. The cumulative inelastic axial deformation of the specimen is higher than recommended normative.

INTRODUCCIÓN

Las construcciones existentes que requieran de algún tipo de intervención y por consiguiente, la licencia de construcción, deben ser objeto de un estudio de vulnerabilidad sísmica y posterior reforzamiento estructural, según lo indica la normatividad vigente en cada país. Es bien sabido que un alto porcentaje de las construcciones existentes en las ciudades colombianas, y en general, en países latinoamericanos, son edificaciones diseñadas y construidas de acuerdo con normativas anteriores y no cumplen con los reglamentos vigentes de construcción sismo resistente. Se deben considerar alternativas de reforzamiento estructural, que tengan un buen desempeño sísmico y que su implementación sea técnica y económicamente viable, a partir de las investigaciones y análisis de tecnologías que están siendo utilizadas en otros países, como por ejemplo, los dispositivos disipadores de energía.

El tema de los dispositivos de disipación de energía ha cobrado gran interés y ha generado una serie de expectativas en cuanto a su viabilidad económica, técnica y estética. Dentro de los investigadores que han trabajado y desarrollado estos dispositivos se encuentran Aiken (1996), Cheng, Jiang & Lou (2008) y Symans, Charney, Whittaker, Constantinou, Kircher, Johnson & McNamara (2008), entre otros. Dentro de las investigaciones colombianas sobre el tema, se encuentran Reyes (2001), Toro & Turga (2004) y Oviedo & Duque (2009), entre otros.

En el grupo de disipadores de energía por fluencia de metales (amortiguamiento histerético) se destacan las riostras de pandeo restringido y los pórticos con riostras de pandeo restringido (*BRB-Buckling Restrained Braces*, y *BRBF-Buckling Restrained Braced Frames*) los cuales se han implementado con éxito en otros países y deben ser estudiados y analizados para ser adaptados a nuestra tecnología y necesidades.

En lo que respecta a la historia y al desarrollo los BRB, desde su concepción, en la década de 1970, hasta estudios e investigaciones presentadas en los últimos años, se destacan las investigaciones y compilaciones elaboradas por Black, Makris & Aiken (2002), Uang & Nakashima (2004) y Xie (2005), entre otros. En Cancelado (2012) se presenta de manera detallada un recuento de los trabajos de investigación realizados en Colombia, así como de trabajos e investigaciones en otros países.

El mecanismo de falla de estos elementos consiste en la fluencia a tensión y pandeo en modos altos a compresión. Dicho comportamiento es descrito en la Figura 1. Los BRB son elementos que se componen básicamente de un núcleo de acero dúctil diseñado para que resista esfuerzos de tensión y compresión. Para evitar el pandeo elástico (modos bajos), el núcleo se coloca dentro una camisa de acero para el

confinamiento del núcleo. La camisa puede estar vacía o contener algún material llenante. En la Figura 2 se presentan los componentes básicos de los BRB.

PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

El diseño general de los BRB se realizó siguiendo las recomendaciones y metodologías planteadas por Black et al. (2002), Wada, Saeki, Takeuchi & Watanabe (1989), Tsai, Lai, Hwang, Lin & Weng (2004), Palazzo, Crisafulli, López & Cahís (2006), Wei & Tsai (2008), entre otros. El diseño detallado de cada uno de los elementos de los BRB, en particular, la platina de núcleo y las conexiones para montaje en el actuador, se pueden consultar en Cancelado (2012). Las características de las probetas de BRB a escala 1:4, se describen en la Tabla 1.

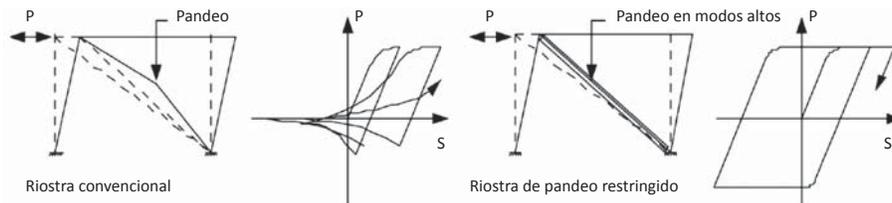


Figura 1. Comportamiento de arriostamiento común y de arriostamiento con pandeo restringido. Adaptado de Xie (2005)



Figura 2. Descripción general de una riostra de pandeo restringido -BRB-

Tabla 1. Descripción de las probetas para los ensayos

Elemento	Probeta BRB 1	Probeta BRB 2	Probeta BRB 3	Probeta BRB 4
Grupo	Disipadores Tipo 1		Disipadores Tipo 2	
Área del núcleo Acero A-36	2.4 cm ² (6mmx40mm)		4.5 cm ² (9mmx50mm)	
Camisa confinamiento Acero A-500 Gr. C	Cuadrada 100x100x3mm	Circular 114,3x2mm (4.5"x2mm)	Cuadrada 100x100x4.5mm	Circular 113,5x4mm (4"x4mm)
Inercia _{camisa}	177,05 cm ⁴	159,03 cm ⁴	226,35 cm ⁴	206,45 cm ⁴
P _{diseño núcleo (P_y)}	109 kN		193 kN	
P _{diseño camisa}	777 kN	698 kN	993 kN	906 kN
FS=P _{camisa} /P _{núcleo}	5,6	5,1	3,8	3,5
Longitudes	Longitud de núcleo: 1075 mm, Longitud de camisa: 1250 mm. Longitud de total de BRB: 1700 mm			
Material de relleno	Mortero SikaGrout 200 de Sika; f' _{cr} = 60 MPa y E _r = 19.400 MPa (datos según catálogo); Norma ASTM-C-1107			
Superficie aislante	Espesor = 3 mm. (Capa de cinta antiadherente, e = 0.7 mm; Lámina de neopreno, e = de 1.6 mm; Capa de grasa común, e = 0.7 mm)			
Zona transición	Espuma de alta densidad de 20 mm de espesor			
Diseño de conexión	Conexión pernada a deslizamiento crítico; Platinas ASTM A-36; Pernos de alta resistencia ASTM A-325			

La escala de las probetas fue seleccionada buscando un peso relativamente bajo (1 kN en promedio), facilidad en su transporte y manipulación y disminución en los costos de fabricación. La longitud de diseño se determinó a partir de la observación de 10 especímenes de BRB a escala real (teniendo una longitud promedio de 7m) y aplicando la relación de escala 1:4. La resistencia a la compresión (f'_{cr}) fue elegida a partir de morteros usados en investigaciones similares, Palazzo et al. (2006), Karimi & Arbabi (2008) y Gheidi, Mirtaheiri, Zandi, Alanjari (2009) siendo 30 MPa un valor promedio de resistencia. Sin embargo, para asegurar el confinamiento del núcleo y garantizar que el mecanismo de falla se desarrollara, se utilizó un mortero con una resistencia mucho mayor.

En la Figura 3 se observan los cuatro (4) modelos de BRB en su presentación final, antes de realizar los ensayos en el actuador dinámico. El montaje de las riostras de pandeo restringido se puede observar en la Figura 4. La forma general de las riostras y el ensamble de las piezas están basados e inspirados en el producto "The Unbonded Brace" (Nippon Steel & Sumitomo Metal Co, 2012).

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio la Universidad de los Andes, empleando el actuador dinámico modelo MTS- 311.31S, con una capacidad de carga según catálogo de 1-1.2 MN (100 toneladas fuerza). Por requerimientos de laboratorio, se puede trabajar como máximo hasta la mitad de dichos valores, es decir, 0.5 MN (50 toneladas-fuerza).

La Norma NSR-10 Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS (2010) en su título F, numeral F.3.11.3, presenta las definiciones y parámetros para definir el protocolo de carga para los "Ensayos cíclicos de calificación para arriostramientos restringidos al pandeo". En la Tabla 2 se presenta el protocolo de carga calculado. Fue seleccionada una frecuencia de 10 segundos por cada ciclo de carga, es decir, 0.1 Hz.

El valor de Δ_{by} corresponde al desplazamiento de fluencia del núcleo; el valor de Δ_{bm} corresponde a la deriva de diseño, en este caso 10mm, considerando el factor de escala 1:4 de las probetas, es decir, para un edificio de tamaño real se tiene 40mm (1% de una altura libre de 4m).



Figura 3. Presentación final de las probetas de BRB

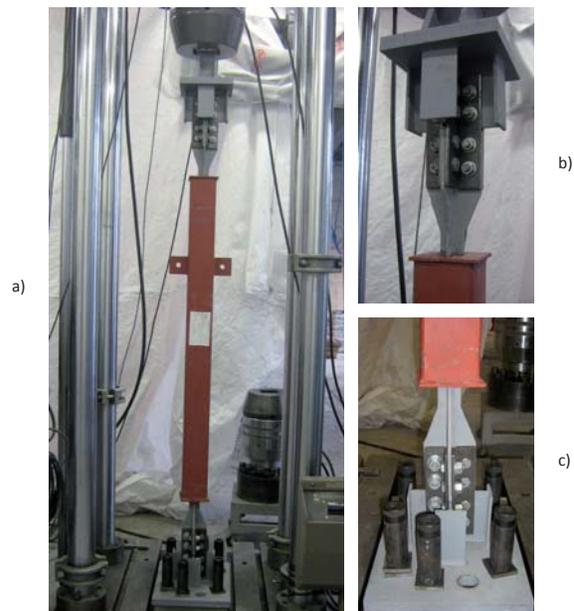


Figura 4. Montaje de los BRB en el marco del actuador
a) Vista general, b) Conexión superior, c) Conexión inferior

Tabla 2. Cálculo del protocolo de carga para ensayos

No. de Ciclos	Deformación Axial			Deformación Inelástica = No. Ciclos * 4 * $f(\Delta_{byi} - \Delta_{by})$		Deformación Inelástica Acumulada	
	Protocolo	(mm)	$f(\Delta_{by})$	$f(\Delta_{by})$	(mm)	$f(\Delta_{by})$	(mm)
2	Δ_{by}	2,19	1	0	0	0	0
2	$0.5 \times \Delta_{bm}$	5,00	2	10	22	10	22
2	$1.0 \times \Delta_{bm}$	10,00	5	29	62	39	85
2	$1.5 \times \Delta_{bm}$	15,00	7	47	102	86	187
2	$2.0 \times \Delta_{bm}$	20,00	9	65	142	151	330
4	$1.5 \times \Delta_{bm}$	15,00	7	94	205	244	535

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS BRB

COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO

Con los valores de fuerza y de desplazamiento obtenidos en el registro, se elaboraron las curvas de histéresis correspondientes a cada probeta. Estas curvas se presentan en la Figura 5.

Las cuatro probetas exhibieron, en general, un comportamiento estable durante los ciclos de tensión-compresión. Los disipadores tipo 1 alcanzaron una carga máxima a tensión de 80 kN (rango elástico) y de 110 kN (rango inelástico) y a compresión de 80 kN (rango elástico) y de 140 kN (rango inelástico). Los disipadores tipo 2 alcanzaron una carga a tensión de 130 kN (rango elástico) y de 170 kN (rango inelástico) y a compresión de 120 kN (rango elástico) y de 200 kN (rango inelástico).

Al comparar el valor de carga máxima obtenido en los ensayos, en el rango elástico, con la carga de diseño P_y , presentada en la Tabla 1, se observa una disminución cercana al 30%. Esta fluencia temprana del núcleo se puede atribuir a los momentos generados por la excentricidad del eje de aplicación de carga debido a deformaciones iniciales de la platina durante el procedimiento de corte. También se puede atribuir a los esfuerzos residuales inducidos por el cambio de temperatura y también durante el corte los cuales alteran las propiedades del acero del núcleo.

Las curvas de histéresis de las gráficas fuerza-desplazamiento presentaron una tendencia al aumento de la rigidez. Se puede observar que los dos grupos de disipadores, siguieron una trayectoria de carga similar. Una particularidad registrada en las curvas, fue el efecto de estrangulamiento o pinchado que se presentó en el cambio de dirección de la aplicación de las cargas. Este estrangulamiento se debe probablemente al tipo de conexión empleado, en el que se presentó un pequeño juego o espaciamiento entre platinas y los pernos de las conexiones.

Como análisis de las de curvas fuerza-desplazamiento, se presentan las siguientes observaciones: a) Se observó un comportamiento estable de las curvas para cada una de las zonas del protocolo de carga; b) Las trayectorias de carga son prácticamente simétricas; y c) No se presentó degradación de la rigidez en ninguna de las probetas.

CURVAS NORMALIZADAS FUERZA-DESPLAZAMIENTO

Una manera de analizar y comparar el comportamiento de la curva fuerza-desplazamiento fue mediante la normalización o estandarización de los datos obtenidos en los ensayos, en términos de los desplazamientos de fluencia (Δ_{by}) y cargas de fluencia (P_y). En la Figura 6 se presentan las curvas normalizadas para las probetas ensayadas. Para todos los ensayos se evidenció que los valores de fuerza máxima de tensión y de compresión, fueron mayores que la fuerza de fluencia obtenida para el desplazamiento de fluencia. Es importante resaltar que las platinas no se fracturaron durante la aplicación del protocolo de carga.

Se puede considerar como aceptable el comportamiento de las probetas ante cargas cíclicas, dado que experimenta un comportamiento en el rango inelástico capaz de resistir entre 1.5 y 2 veces la carga de fluencia sin presentar degradación de la rigidez durante los ciclos. Estos valores están de acuerdo con los reportados en la literatura por Piras (2009), que registró valores de 1.5 a 2 (P/P_y) y un comportamiento histérico estable para una riostra de pandeo restringido a escala real.

FACTORES DE AJUSTE DE RESISTENCIA DE LOS DISIPADORES

A partir de la curva característica de cada disipador, se calcularon los parámetros o factores de ajuste de resistencia, descritos en el reglamento NSR-10 – AIS (2010) en su numeral

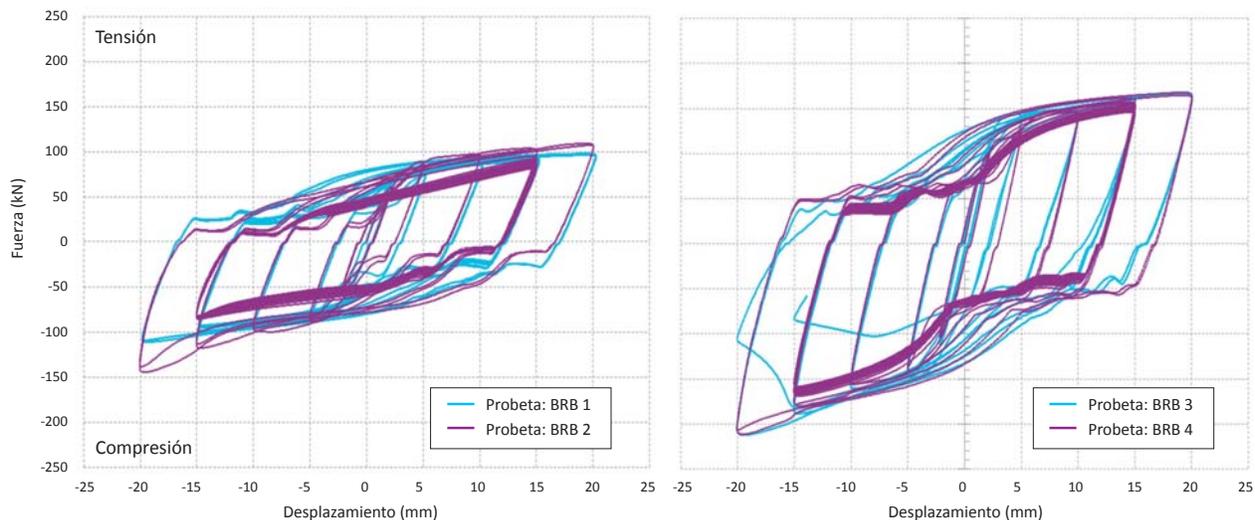


Figura 5. Comparación curva de Histéresis Fuerza Vs. Desplazamiento: disipadores tipo 1 ($A_{núcleo} = 2.4 \text{ cm}^2$) y tipo 2 ($A_{núcleo} = 4.5 \text{ cm}^2$)

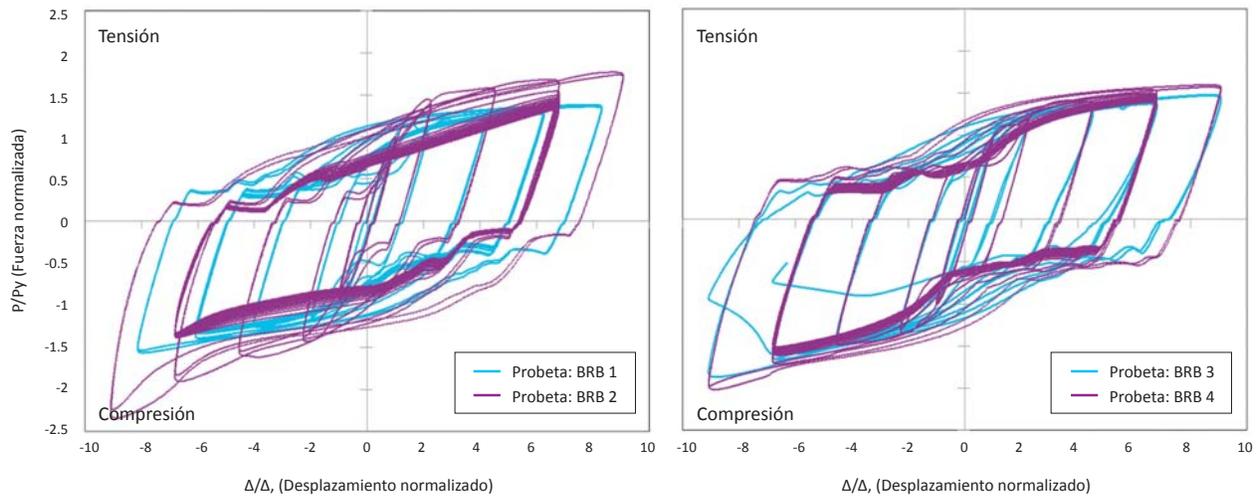


Figura 6. Curvas de histéresis normalizada fuerza vs. desplazamiento: disipadores tipo 1 ($A_{núcleo} = 2.4 \text{ cm}^2$) y tipo 2 ($A_{núcleo} = 4.5 \text{ cm}^2$)

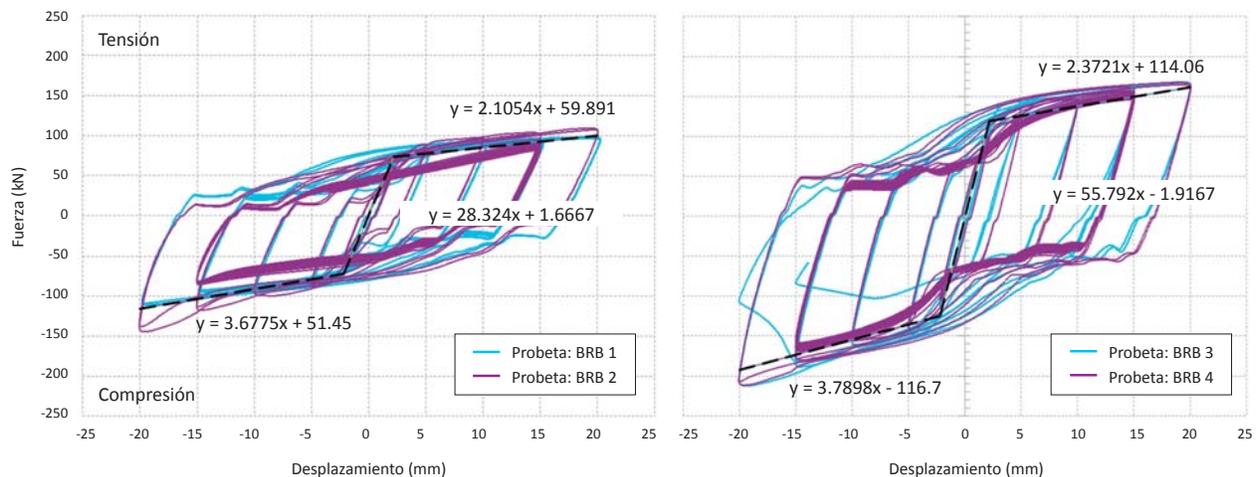


Figura 7. Parametrización de la curva característica de disipadores tipo 1 ($A_{núcleo} = 2.4 \text{ cm}^2$) y tipo 2 ($A_{núcleo} = 4.5 \text{ cm}^2$)

F.3.6.4. El factor β , es la relación de la compresión máxima/tensión máxima. El factor w , es la relación de la tensión/fluencia medida. En la Tabla 3 se presentan los factores para cada probeta. Con estos factores se verifican y ajustan los valores de diseño de los BRB. La variabilidad que se observa en los valores se puede atribuir a las diferencias particulares entre cada probeta, ocasionadas durante el proceso constructivo y durante las pruebas de laboratorio.

Tabla 3. Factores de ajuste de resistencia

Probeta	BRB-1	BRB-2	BRB-3	BRB-4
β = (de resistencia en compresión)	1.10	1.21	1.18	1.20
w = (endurecimiento por deformación)	1.12	1.26	1.03	1.02

CURVA CARACTERÍSTICA DE LOS DISIPADORES

La respuesta de cada tipo de disipador se representa por una curva que muestra la tendencia o comportamiento general de las curvas de histéresis fuerza-desplazamiento. Mediante una regresión lineal simple, se obtuvieron las ecuaciones de tres (3) segmentos lineales, que describen la respuesta fuerza-desplazamiento. En la Figura 7 se observan los valores de la pendiente y del intercepto para cada tramo de curva característica de cada tipo de disipador. Estas ecuaciones son preliminares y solamente representan a las probetas ensayadas.

De las curvas paramétricas preliminares, se observó que la pendiente de la recta del tramo a compresión es mayor que en el tramo a tensión. Esto se ocurrió para los dos tipos de disipadores, y significa que las probetas presentaron una

mejor respuesta o una mayor rigidez durante los procesos de compresión. Para los dos tipos de disipadores, las pendientes de las rectas fueron similares en el rango inelástico, tanto para tensión como en compresión. Durante el rango elástico, la pendiente de las rectas mantiene la relación 2 a 1 correspondiente a la relación entre las áreas de los núcleos de acero, entre los tipos de disipadores tipo 1 y tipo 2.

CONCLUSIONES

- Los ensayos cumplieron con los cuatro (4) criterios de aceptación de ensayos cíclicos de calificación propuestos para los arriostramientos de pandeo restringido en el reglamento NSR-10- AIS (2010). Dichos criterios se relacionan, entre otros con la revisión de la estabilidad general, de los incrementos de rigidez, y con la integridad de la riostra y de las conexiones,
- La deformación axial inelástica acumulada alcanzada por todas las probetas fue de $500 \Delta_{by}$ la cual es superior al límite recomendado de $200 \Delta_{by}$. Este límite es requerido por la normatividad vigente para los ensayos de riostras bajo carga axial.
- La conexión pernada tuvo un comportamiento bueno. Las curvas obtenidas no mostraron signos de alteración o problemas de rigidez. Se evidenciaron pequeños saltos en el cambio de dirección de aplicación de las cargas y pérdidas momentáneas de rigidez. Estos comportamientos se pueden atribuir a un deslizamiento relativo y pérdida de empotramiento
- Al analizar las curvas normalizadas de los desplazamientos (D_y) y cargas de fluencia (P_y), se observó que las riostras tuvieron un comportamiento homogéneo, registrando valores medios de resistencia a tensión de 1.5 y a compresión de 1.9. Dichos valores indican que las riostras tuvieron un desempeño en el rango inelástico sin la fractura o rotura de las platinas del núcleo.
- La curva característica modela solamente el disipador que fue ensayado, cada probeta tiene su correspondiente curva y a partir de esta se pueden llegar a calcular los parámetros de amortiguamiento y la capacidad de disipación de energía de cada una.
- A partir de la curva característica se calcularon los factores de ajuste de resistencia de los disipadores obteniendo valores medios de β de 1.22 y de w de 1.21 para los disipadores tipo 1, y de β de 1.21 y de w de 1.06 para los disipadores tipo 2.

REFERENCIAS

Aiken, I.D., (1996, July). Passive Energy Dissipation - Hardware and Applications. *Los Angeles County and SEAOC Symposium on Passive Energy Dissipation Systems for New and Existing Building*. Simposio llevado a cabo en Los Angeles, California.

AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá, Colombia: AIS, 2010.

Black, C. Makris, N. & Aiken, I.D. (2002). *Component testing, stability analysis and characterization of buckling-restrained braces*, Report No. PEER-2002/08. Recuperado del sitio de internet de Pacific Earthquake Engineering Research Center University of California, Berkeley http://peer.berkeley.edu/publications/peer_reports/reports_2002/0208.pdf

Cancelado, R.A. (2012). *Caracterización mecánica y modelamiento estructural de un disipador pasivo de energía de tipo arriostramiento de pandeo restringido. Parte 1*. (Tesis de maestría) Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

Cheng, F.Y., Jiang, H.P and. Lou, K.Y. (2008) *Smart Structures – Innovative Systems for Seismic Response Control*, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis.

Gheidi, A. Mirtaheri, M. Zandi, A.P. and Alanjari, P. (2009). Effect of filler material on local and global behaviour of buckling-restrained braces. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 20 (6),700-710.

Karimi, S. & Arbabi, F. (2008, Octubre). Seismic Evaluation And Cyclic Testing Of Buckling Restrained Braces Manufactured in Iran. 14th World Conference on Earthquake Engineering, Conferencia llevada a cabo por International Association of Earthquake Engineering. Beijing, China.

Nippon Steel & Sumitomo Metal Co. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Co/Unbonded Braces*. Recuperado 10 de agosto de 2012, de <http://www.nssmc.com/en/product/process/unbonded.html>

Oviedo, J.A. & Duque, M.P. (2009). Situación de las técnicas de control de respuesta sísmica en Colombia. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia, EIA*, 12 (1). 113-124.

Palazzo, G. Crisafulli, F. López, F. y Cahís, X. (Octubre, 2006). Análisis numérico experimental de barras de pandeo restringido. *XIX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*. Mar del Plata, Argentina. Recuperado de <http://www.jornadasaie.com.ar/jornadas-antiores/2006/trabajos/Tema%20H/104-H1.pdf>

Piras, S. (2009). *Testing for Application of Unbonded Braces*. Reporte de Clase. Recuperado del sitio web de: http://prime.ucsd.edu/progress_reports_2009/FINAL_Reports/Piras_Final_2009.pdf, University of California, USA.

Reyes, J.C. (2001). *Modelamiento sísmico no lineal de estructuras de concreto con disipadores de energía*. (Tesis de maestría) Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

- Symans, M.D., Charney, F.A., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C., Kircher, C.A., Johnson, M.W., and McNamara, R.J. (2008). Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments. *Journal of Structural Engineering*, 134(1), pp. 3-21.
- Toro, G. & Turga, D.C. (2004) *Respuesta experimental de edificios a escala con disipadores de energía*. (Tesis de maestría). Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- Tsai, K.C. Lai, J.W. Hwang, Y.C. Lin, S.L. and Weng, C.H. (2004, Agosto). Research and application of double-core buckling restrained braces in Taiwan. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Conferencia llevada a cabo por International Association of Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.
- Uang, C. & Nakashima, M. (2004). *Steel Buckling-Restrained Braced Frames in Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-based Engineering*, Bozorgnia, Y and Bertero V.V (Ed.), 16-1 a 16-37. USA: CRC Press,
- Wada, A. Saeki, E. Takeuchi, T. and Watanabe, A. (1989, diciembre). "Development of unbonded brace". Column Technical Publication No. 115 1989.12, Nippon Steel, Japan
- Wei, C.Y. & Tsai, K.C. (2008, Octubre). Local Buckling of Buckling Restrained Braces. 14th World Conference on Earthquake Engineering, Conferencia llevada a cabo por International Association of Earthquake Engineering. Beijing, China.
- Xie, Q. (2005, Junio). State of the art of buckling-restrained braces in Asia. *Journal of Constructional Steel Research*. 61(6) ,727-748.