



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL - ESTRUCTURAS

**CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE DISIPADORES DE
ENERGÍA SÍSMICA DE BAJO COSTO**

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

P R E S E N T A :

José Ernesto García Mora Pinto

TUTOR PRINCIPAL:

Dr. Hector Guerrero Bobadilla, Instituto de Ingeniería

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, noviembre de 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ
Secretario: DR. JUAN JOSÉ PÉREZ GAVILÁN ESCALANTE
Vocal: DR. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA
1 e r. Suplente: DR. ADRIÁN POZOS ESTRADA
2 d o. Suplente: DR. ROBERTO GÓMEZ MARTÍNEZ

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA

AGRADECIMIENTOS

A Paty, que me animó a estudiar la maestría y durante estos años de estudio siempre estuvo cerca para darme fuerza, alegrarme los días y algunas veces para tolerarme y al final de esta gran experiencia me ayudó con la redacción de esta tesis.

A mi familia que me ha animado y apoyado en cada proyecto en el que me embarco.

Al Dr. Héctor guerrero Bobadilla por su constante apoyo, la confianza que me tuvo para realizar este proyecto de investigación, su gran disposición a compartir su conocimiento y todas sus enseñanzas dentro y fuera de las aulas.

A mis sinodales, Dr. José Alberto Escobar Sánchez, Dr. Juan José Pérez Gavilán Escalante, Dr. Adrián Pozos Estrada, Dr. Roberto Gómez Martínez por su gran disposición y el tiempo invertido para revisar esta tesis.

A mis compañeros, Rigoberto Nava, Fernan Cerón, Juan Carlos Vargas, Omar Ortega, Ángel Moreno, Vladimir Rodríguez, Daniel Sánchez, Oscar Silverio, Gabriela Cuesta, Paola Gil, José Luis Cabrera, Leonardo Nogales, Juan José, Victor, y todos los compañeros de la licenciatura por su invaluable ayuda en la fabricación de los dispositivos experimentales.

A mis compañeros Daniel Sánchez, Gabriel Flores, Yakir Herrada y Oscar Valencia por todo su apoyo durante la realización de las pruebas experimentales.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por todas las facilidades proporcionadas para realizar las pruebas experimentales, en especial al Laboratorio de Estructuras y Materiales y a todo su personal.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por todas las oportunidades de desarrollo a lo largo de mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico proporcionado durante mis estudios de posgrado.

Al Tobías, gran compañero de desvelos que siempre me anima con su entusiasmo.

RESUMEN

En esta tesis se presentan los resultados de una investigación enfocada en caracterizar el comportamiento experimental de disipadores de energía sísmica de bajo costo. Estos disipadores de tipo “contraventeo restringido al pandeo” fueron propuestos originalmente por Guerrero (2016). Se describen las características generales del diseño, las variables de estudio y las características individuales de 15 especímenes fabricados por alumnos de la UNAM.

Se hace una descripción del trabajo realizado previo a las pruebas en el laboratorio. Esta descripción incluye: las pruebas de resistencia en los materiales constitutivos, los cálculos teóricos para predecir el comportamiento, el diseño del arreglo experimental, los cálculos que definen los protocolos de carga y la instrumentación necesaria para registrar los datos que caracterizan el desempeño.

Se presenta el procesamiento de los datos experimentales, comparando la respuesta de todos los dispositivos y ejemplificando el análisis con los datos de un disipador. Se obtienen características del desempeño, lo que permite realizar análisis estructurales que incluyen a los disipadores estudiados. También se valida la resistencia, durabilidad y confiabilidad del diseño.

En esta tesis se reportan: los factores de rigidez equivalente; la longitud del núcleo que se deforma plásticamente en cada disipador; las curvas de capacidad a partir de la envolvente de ciclos histeréticos; los desplazamientos y fuerzas de fluencia; los factores de sobre resistencia a tensión y compresión; la energía histerética acumulada; la ductilidad acumulada y distribuciones de probabilidad de falla contra ductilidad acumulada. En cada análisis se ejemplifica el procedimiento y se presentan los resultados para cada disipador.

Adicionalmente se compara la respuesta, ante una misma historia de desplazamientos, entre un disipador ensayado y un modelo numérico, el cual se calibró utilizando las características que describen el comportamiento de los disipadores. Finalmente, se analiza la resiliencia de los disipadores. Para ello, se comparan las demandas de ductilidad acumulada (que se obtuvieron de analizar estructuras equipadas con disipadores y sometidas a fuerzas sísmicas) contra la capacidad máxima experimental desarrollada por los dispositivos. Lo anterior con el objetivo de verificar la resistencia, durabilidad y probabilidad de falla de los disipadores estudiados.

ABSTRACT

This thesis presents the results of a research project focused on characterizing the experimental behavior of low-cost seismic energy dissipators. They were “Buckling-Restrained Braces”; originally proposed by Guerrero (2016). This work describes the general characteristics of their design, the study variables and the individual characteristics of 15 specimens manufactured by students of the UNAM.

Work that was carried out prior to the tests in the laboratory is described. This description includes: the tests of resistance for constituent materials, the theoretical calculations to predict their behavior, the design of their experimental setup, the calculations that define the load protocols and the necessary instrumentation to record the data that characterize the performance.

Next, the processing of the experimental data is presented. Comparison of the response among all the devices is presented. The analysis of experimental data is developed to obtain performance characteristics; which are helpful for structural analyzes. The strength, durability and reliability of the design is also validated.

In this thesis the following parameters are reported: the equivalent stiffness factors; the length of plastic behavior; capacity curves from the envelope of hysteretic cycles; yielding displacements and forces; the overstrength factors for tension and compression; accumulated hysteretic energy; accumulated ductility and probability distributions of failure against accumulated ductility. In each analysis the procedure is exemplified, and results are presented for each dissipator.

Comparison of the response, given the same displacement history, between a tested dissipator and a numerical model is presented. Finally, dissipator resilience is analyzed. To do this, the cumulative ductility demands (which were obtained from analyzing structures equipped with dissipator and subjected to seismic forces) are compared against the maximum experimental capacity developed by the devices. The above with the objective of verifying the resistance, durability and probability of failure of the dissipators studied.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Disipadores de energía sísmica.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Objetivos	4
1.4. Contenido de la tesis.....	5
Capítulo 2. Justificación y alcances	7
Capítulo 3. Estado del arte	9
Capítulo 4. Desarrollo de la investigación	11
4.1. Dispositivo experimental.....	11
4.1.1. Características del disipador.....	11
4.1.2. Variables de estudio.....	12
4.1.3. Fabricación de especímenes	12
4.1.4. Pruebas experimentales en materiales constitutivos.....	17
4.1.5. Análisis teórico del comportamiento.....	20
4.2. Configuración del experimento.....	26
4.2.1. Arreglo general	26
4.2.2. Protocolo de carga	27
4.2.3. Instrumentación	29
4.3. Análisis de resultados experimentales	31
4.3.1. Curvas de histéresis	31
4.3.2. Factor de rigidez equivalente.....	36
4.3.3. Factor de longitud.....	39
4.3.4. Envolventes de ciclos histeréticos	41
4.3.5. Análisis de parámetros de fluencia del disipador	45
4.3.6. Factores de sobre resistencia a tensión y compresión	50
4.3.7. Cálculo de energía histerética.....	57
4.3.8. Análisis de ductilidad acumulada.....	60
4.3.9. Probabilidad de falla vs ductilidad acumulada	65
4.3.10. Calibración de modelos numéricos con experimentales	69
4.3.11. Resiliencia ante eventos sísmicos	72
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	79
Referencias	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un contraventeo restringido a pandeo y grafica que compara su desempeño contra los contraventeos convencionales, (adaptado de Clark, et al., 1999)	2
Figura 2. Secciones transversales de varios contraventeos restringidos a pandeo desarrollados en Japón (adaptado de Uang & Nakashima, 2004)	3
Figura 3. Esquema general de construcción del disipador	12
Figura 4. Esquema del proceso de colado de mortero	13
Figura 5. Fotografías del proceso de fabricación	15
Figura 6. Esquema de la conexión utilizada en las pruebas experimentales	16
Figura 7. Isométrico de la conexión utilizada en las pruebas experimentales	17
Figura 8. Curva carga desplazamiento experimental	18
Figura 9. Comparación de curvas carga - desplazamiento analítica y experimentales	19
Figura 10. Secciones consideradas para el análisis de deformación elástica a tensión y compresión	22
Figura 11. Longitudes teóricas del núcleo con comportamiento inelástico	24
Figura 12. Arreglo general del experimento	26
Figura 13. Protocolos de carga estándar y fatiga	28
Figura 14. Esquema general de instrumentación	29
Figura 15. Instrumentación de un dispositivo en su ubicación final	30
Figura 16. Arreglos de instrumentación (acercamiento)	31
Figura 17. Curvas de histéresis para los ciclos del protocolo estándar	32
Figura 18. Curvas de histéresis para los ciclos del protocolo de fatiga	33
Figura 19. Historia de desplazamientos aplicados en el tiempo (protocolos de carga)	34
Figura 20. Curvas esfuerzo-desplazamiento para ductilidad de 4 de todos los especímenes	35
Figura 21. Ajuste de mínimos cuadrados para los datos en el intervalo elástico lineal	37
Figura 22. Valores del factor de rigidez equivalente (f_k) por disipador	38
Figura 23. Relación de rigidez entre compresión y tensión en la zona elástica	38
Figura 24. Valores del factor de longitud para comportamiento a tensión	40
Figura 25. Valores del factor de longitud para comportamiento a compresión	40
Figura 26. Ajuste de datos para determinar la envolvente de las curvas de histéresis	42
Figura 27. Curvas de esfuerzo contra desplazamiento acumuladas de todos los disipadores	43
Figura 28. Curvas de esfuerzo deformación acumuladas de todos los disipadores	45
Figura 29. Ejemplo de aplicación del procedimiento incluido en (FEMA 356, 2000)	46

Figura 30. Curvas bilineales idealizadas para todos los disipadores.....	47
Figura 31. Valor promedio y envolventes de las curvas bilineales idealizadas	47
Figura 32. Esfuerzo y desplazamiento de fluencia en tensión por cada disipador	49
Figura 33. Deformación unitaria de fluencia por cada disipador	49
Figura 34. Ajuste de datos por disipador y determinación de ω para $\eta = 4$	51
Figura 35. Datos del factor ω para todos los disipadores y ajuste de resultados.....	51
Figura 36. Valor del factor de sobre resistencia a tensión, ω para $\eta=4$, por cada disipador	52
Figura 37. Ejemplo del proceso de determinación del factor β	54
Figura 38. Factor β calculado para todos los disipadores.....	54
Figura 39. Factor β para disipadores con material de polipropileno como desadherente	56
Figura 40. Factor β para disipadores con material de caucho como desadherente	56
Figura 41. Energía histerética acumulada con respecto al tiempo por cada disipador.....	58
Figura 42. Energía total disipada por cada dispositivo.....	58
Figura 43. Fotografías de barras al finalizar las pruebas.....	59
Figura 44. Análisis geométrico de deformaciones plásticas, (adaptado de Merritt, et al., 2003)	61
Figura 45. Curvas de ductilidad acumulada	63
Figura 46. Ductilidad acumulada total desarrollada por cada dispositivo.....	63
Figura 47. Ductilidad acumulada en el ciclo contra ductilidad máxima impuesta en un ciclo para el disipador 5	64
Figura 48. Distribución de probabilidad de falla contra ductilidad acumulada.....	66
Figura 49. Distribución de probabilidad de falla contra ductilidad acumulada.....	68
Figura 50. Curvas de histéresis experimental y numérica	70
Figura 51. Ductilidad acumulada experimental y numérica.....	71
Figura 52. Esquema general de la estructura analizada con simulación híbrida	72
Figura 53. Modelo base para realizar el estudio numérico con variación de periodos.....	73
Figura 54. Curva de demanda de ductilidad acumulada en simulación híbrida	75
Figura 55. Curvas de ductilidad acumulada con demandas de simulación híbrida.....	76
Figura 56. Curvas de probabilidad de falla con demandas de ductilidad de simulación híbrida	77
Figura 57. Instalación de soleras para reducir espacio libre.....	85
Figura 58. Refuerzo en la interfaz de mortero.....	86
Figura 59. Propuesta de conexión con elementos de concreto	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los dispositivos	14
Tabla 2. Características experimentales de barras de acero	19
Tabla 3. Resultados de pruebas de mortero	20
Tabla 4. Rigidez equivalente del sistema a compresión.....	23
Tabla 5. Rigidez equivalente del sistema a tensión	23
Tabla 6. Desplazamientos totales requeridos para cada nivel de ductilidad objetivo	25
Tabla 7. Protocolos de carga que se aplica a cada disipador.....	28
Tabla 8. Valores de fuerza y desplazamiento para curvas bilineales promedio	48
Tabla 9. Grupos de disipadores utilizados para ajustar curvas de probabilidad.....	65
Tabla 10. Valores de demandas de ductilidad acumulada y ductilidad máxima.....	74

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. DISIPADORES DE ENERGÍA SÍSMICA

En las últimas décadas la práctica del diseño estructural sismo-resistente se ha enriquecido con la implementación de tecnologías de disipación de energía. Dichas tecnologías se orientan según dos principios: proporcionar amortiguamiento al sistema estructural y aislar la estructura principal para reducir la transmisión de fuerzas sísmicas. Lo anterior permite mejorar el desempeño ante solicitaciones sísmicas mientras se mantienen los costos en un nivel razonable (Christopoulos, et al., 2006). Con estos dispositivos se puede mejorar la respuesta del sistema estructural sin la necesidad de incrementar la resistencia o ductilidad de sus elementos constitutivos.

Los disipadores de energía sísmica se pueden clasificar en activos y pasivos. Los primeros son sistemas de protección que requieren para su funcionamiento la intervención de algún sistema de control adicional como sistemas de cómputo o electromecánicos, por lo que dependen de fuentes de energía externas, lo cual es una limitante significativa para su aplicación (Christopoulos, et al., 2006). Por su parte, los sistemas pasivos se encuentran listos para desarrollar su función en cualquier momento y no dependen de ningún otro sistema para garantizar su desempeño haciéndolos más confiables.

Entre los amortiguadores pasivos existen: las masas sincronizadas, los amortiguadores viscosos, los amortiguadores de fricción, los viscoelásticos, los metálicos y los de auto centrado, que en general incrementan los coeficientes de amortiguamiento crítico y con esto se reducen las demandas de desplazamiento en la estructura. A los amortiguadores de fricción y metálicos también se les conocen como amortiguadores histeréticos, su funcionamiento depende del desarrollo de desplazamientos inelásticos que proporcionan amortiguamiento y disipan energía.

Dentro de los disipadores histeréticos, se incluye a los contraventeos restringidos a pandeo (BRB por sus siglas en inglés), los cuales consisten, en términos generales, de un elemento metálico largo conectado en los extremos y cuya sección central tiene la función de deformarse inelásticamente en tensión y en compresión. Para lograr lo anterior, la sección central se mantiene restringida al pandeo mediante una subestructura que lo confina.

En la Figura 1 se presenta un esquema general de los elementos de un BRB, en la parte izquierda se representa un núcleo de acero con sección cruciforme al cual se le coloca un material desadherente, este material evita la unión del acero con el mortero de relleno. En la parte central de la figura se indica la ubicación del mortero que en conjunto con el tubo de acero conforman la subestructura que evita el pandeo.

En la parte derecha de la Figura 1 se presentan un sistema de coordenadas que en su eje vertical indica fuerzas y en el eje horizontal desplazamientos. En este se grafican dos curvas, una de comportamiento típico de un BRB y otra de un contraventeo convencional, se puede apreciar que ambos sistemas muestran el mismo desempeño a tensión. Sin embargo, en el desempeño a compresión, el contraventeo convencional se pandea y su desempeño cambia radicalmente, a diferencia del BRB cuyo desempeño es igual a tensión y compresión.

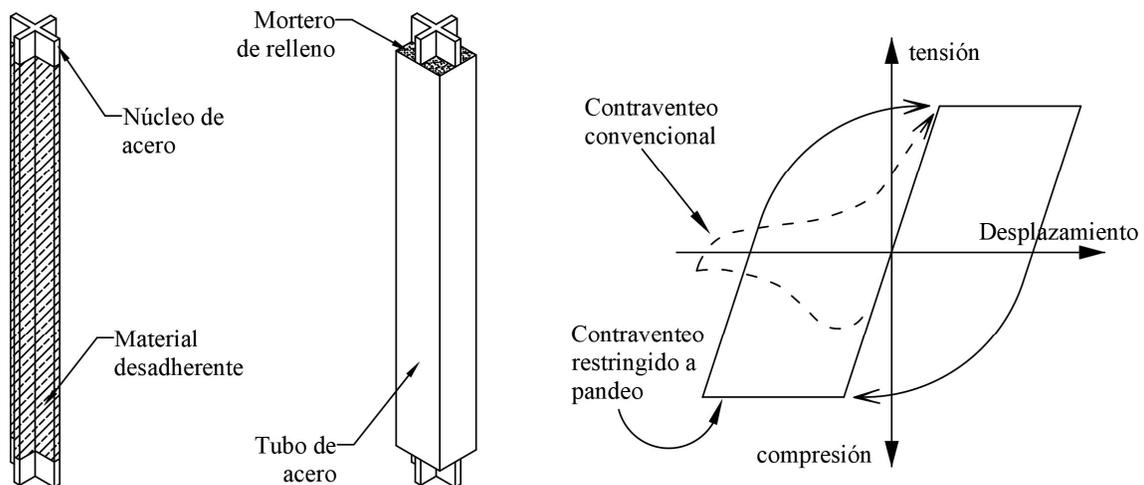


Figura 1. Esquema de un contraventeo restringido a pandeo y grafica que compara su desempeño contra los contraventeos convencionales, (adaptado de Clark, et al., 1999)

Entre las virtudes de los BRB se encuentra que su construcción (en términos generales) es sencilla ya que solo se requiere de un núcleo de acero y un elemento confinante al pandeo. Dicho elemento se puede construir con tubos de acero rellenos de concreto, piezas de concreto armado, y en general cualquier subestructura que proporcione restricción suficiente. Incluso existen diseños de disipadores construidos únicamente con secciones de acero unidas con tornillos y parcialmente restringidos a pandeo (Wang, et al., 2017).

En la Figura 2 se presentan varias configuraciones de núcleos y elementos de confinamiento reportados en Uang & Nakashima (2004). Las figuras 2a y 2b corresponden a tubos de acero rellenos de mortero con núcleos de planchas de acero, una en forma de cruz y la otra sencilla; la figura 2c es una sección de concreto reforzado colada sobre un núcleo de acero con sección IPR; la figura 2d son planchas de concreto reforzado unidas con tornillos sobre una plancha de acero; y las figuras de la 2e a la 2h son tubos de acero sin relleno de mortero, los cuales dan restricción a los núcleos aprovechando cierta compatibilidad entre sus geometrías.

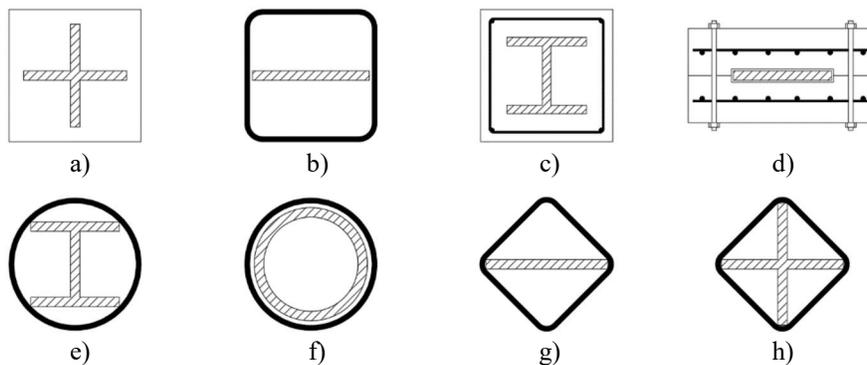


Figura 2. Secciones transversales de varios contraventeos restringidos a pandeo desarrollados en Japón (adaptado de Uang & Nakashima, 2004)

Otra de las características de interés en los BRB es su capacidad para desarrollar ciclos histeréticos estables con desempeños muy similares en tensión y en compresión, lo cual los hace ideales para resistir solicitaciones sísmicas que por su naturaleza generan oscilaciones en las estructuras. Dicha característica facilita el diseño estructural sismo-resistente e incrementa la confiabilidad en la respuesta del sistema en comparación con los contraventeos convencionales.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso de BRB se ha popularizado a lo largo de los últimos años en varios países y, constantemente, se presentan nuevos diseños en investigaciones donde se caracteriza su funcionamiento. Sin embargo, su implementación en viviendas de bajos recursos no está documentada, esta observación es relevante considerando que en zonas pobres y altamente sísmicas usar dispositivos tipo BRB ayudaría a evitar pérdidas humanas y materiales como las ocurridas en los sismos de septiembre de 2017 en México.

Esta falta de implementación se puede atribuir a que muchos de los diseños actuales de BRB están patentados; lo cual, además de generar una dependencia con empresas fabricantes, incrementa los costos por el pago de derechos. Incluso aquellos diseños de patente libre que actualmente se pueden encontrar en la literatura están contruidos con piezas maquinadas y conexiones especiales que incrementan su costo y disminuyen su disponibilidad para comunidades de escasos recursos.

Ante la especialización en la fabricación de BRB, y los costos asociados, es deseable la implementación de un diseño que no requiera de herramientas o mano de obra especializadas, que sus materiales sean de fácil acceso y que sea de patente libre, de tal forma que en términos globales sean de bajo costo. Con estos principios se realiza la presente investigación sobre el diseño propuesto por Guerrero (2016 y 2018a) con el fin de caracterizar su comportamiento y proporcionar herramientas para su implementación.

1.3. OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis es caracterizar estadísticamente el desempeño de un disipador de energía sísmica de bajo costo, de forma que sea factible adaptar el diseño para su uso en viviendas de escasos recursos. El objetivo se logrará a través de:

1. Determinar, con un intervalo de confianza aceptable, la capacidad de disipación de energía y resistencia de los disipadores de bajo costo. Lo anterior con el fin de disponer de datos que permitan cuantificar el riesgo de falla del disipador ante eventos sísmicos y establecer parámetros que indiquen el mantenimiento o remplazo de los dispositivos.
2. Identificar las variables principales de construcción del disipador que permitan replicarlo y escalar la resistencia y capacidad de deformación. Con estos parámetros se posibilita ajustar los disipadores a distintos sistemas estructurales de acuerdo con sus necesidades específicas.
3. Registrar los datos necesarios para determinar estadísticamente los factores de rigidez equivalente y sobre resistencia, necesarios para diseñar una estructura que incluya disipadores de bajo costo.

1.4. CONTENIDO DE LA TESIS

La presente tesis describe las actividades que se llevaron a cabo para caracterizar los disipadores de bajo costo. En el capítulo 2 se presentan las motivaciones que justifican realizar la investigación y en el capítulo 3 un resumen de la literatura consultada con respecto al tema de contraventeos restringidos al pandeo. A partir de las referencias fue posible estudiar el funcionamiento de los disipadores, también, se obtuvieron criterios para adquirir y procesar datos de las pruebas, así como métodos de análisis para caracterizar la respuesta.

En el capítulo 4 se detalla el proceso de la investigación. El orden de las secciones corresponde a la secuencia en la que se desarrollaron las actividades para caracterizar los disipadores, estas actividades se agrupan en tres secciones generales.

La primera sección (4.1) detalla las características físicas del disipador, su geometría, materiales constitutivos y las variaciones al diseño que se estudiaron. Lo anterior definió el proceso de fabricación y durante este se tomaron muestras de los materiales constitutivos, las cuales se ensayaron en el laboratorio. Con la información recabada se realizaron predicciones teóricas del desempeño esperado en los dispositivos.

En la segunda sección (4.2) se describen los aspectos referentes a las pruebas experimentales, las cuales se alimentaron de los análisis teóricos previos. Se detalla cómo se instalaron los disipadores y equipos de laboratorio, así como la conexión entre ellos; la secuencia en la que se aplican las cargas a los disipadores; y la definición de los sistemas de adquisición de datos.

En la tercera sección (4.3) se presentan los análisis de los datos experimentales, entre ellos, el cálculo de factores de comportamiento, la interpretación de las gráficas que muestran el desempeño de los disipadores y la descripción de los procedimientos utilizados. La secuencia de las subsecciones corresponde con el orden en el que se realizaron los cálculos, dicho orden se definió considerando la información requerida para cada análisis, ya que, en lo general, los análisis requieren de cálculos realizados previamente para poder desarrollarse. En algunas subsecciones se presentan resultados desglosados por cada disipador y la secuencia en la que se muestran los resultados corresponde al orden cronológico de las pruebas.

CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES

México es un país altamente sísmico. Terremotos del pasado han generado grandes pérdidas humanas y económicas. Especialmente en comunidades pobres y apartadas. Implementar dispositivos de protección sísmica resulta imperativo para mejorar el desempeño sísmico de las construcciones de aquellas comunidades tan vulnerables.

Para poder garantizar un adecuado funcionamiento de cualquier dispositivo diseñado para la disipación de energía sísmica es necesario llevar a cabo análisis experimentales que caractericen su desempeño, su capacidad de disipación, su resistencia y las limitaciones en su construcción. Estas características, en conjunto con recomendaciones de diseño y construcción, permiten la implementación de los dispositivos en estructuras nuevas o existentes.

El estudio se restringe a pruebas experimentales en los dispositivos aplicando cargas cíclicas reversibles axiales sin considerar subensambles que involucren conexiones o marcos estructurales. Por lo tanto, no se analizarán las rotaciones en las conexiones ni la interacción de los dispositivos con uniones viga-columna.

Como lo indica el objetivo principal, lo que se persigue con esta investigación es realizar un análisis estadístico completo de los parámetros más representativos del funcionamiento de un disipador, es decir, su capacidad para acumular deformaciones inelásticas y la cantidad de energía disipada. Para esta investigación se incluye el ajuste de la resistencia y la ductilidad acumulada a distribuciones de probabilidad, así como una aproximación del comportamiento a modelos numéricos.

CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE

En el año 2001, la *Structural Engineers Association of Northern California* (SEAOC) en conjunto con la *American Institute of Steel Construction* (AISC) emitieron recomendaciones para marcos estructurales reforzados con contraventeos restringidos al pandeo (SEAOC-AISC, 2001). Las recomendaciones incluyen una sección para el análisis experimental del desempeño de los BRB que considera pruebas de carga cíclicas. Éstas a su vez forman parte de las *Provisiones para el diseño sísmico de estructuras de acero (AISC 341, 2016)*, documento en donde se presentan ampliamente los principios para el diseño y las características de las pruebas experimentales. En específico, se describen aquellas que corresponden exclusivamente al dispositivo experimental y aquellas aplicables a subensambles donde se considera la conexión y las rotaciones derivadas de la interacción con marcos estructurales, también, se presentan los protocolos de carga y los límites mínimos de energía histerética y ductilidad acumuladas.

Existen reportes muy completos, como el realizado por Merritt et al. (2003) en la universidad de San Diego en California sobre los BRB para la empresa Corebrace, que utilizan las recomendaciones de la SEAOC y que han servido de referencia para varias investigaciones. Entre sus aportaciones se presentan herramientas de análisis para caracterizar el desempeño, bases para determinar los datos a obtener y procedimientos para analizar los resultados con el fin de validar el correcto desempeño y la confiabilidad de disipador.

En la literatura es posible encontrar muchos ejemplos de pruebas experimentales tanto en dispositivos aislados (Black et al., 2004), (Ozcelik & Dikiciaşık, 2015), (Guo et al., 2017), (Ju et al., 2009), como en subensambles (Merritt et al., 2003), (Newell, 2006), (Dehghani & Tremblay, 2017), (Chou & Chen, 2010), donde se utilizan los protocolos de carga especificados en principio por la SEAOC u otros que algunos autores modifican (Wang et al., 2017), (Dehghani & Tremblay, 2017). Otro aspecto por destacar es que algunos estudios complementan la investigación experimental con modelos numéricos de elementos finitos con resultados aceptables en la modelación de la respuesta de los dispositivos (Wang et al., 2018), (Budaházy & Dunai, 2015), (Guo et al., 2017). Incluso, es posible encontrar investigaciones que incluyen estudios en marcos en tamaño real de proyectos importantes (Tsai et al., 2004) y marcos a escala de concreto prefabricado reforzados con BRB (Guerrero et al., 2018b).

Existen además estudios enfocados en analizar la influencia de la interacción entre las partes constitutivas de los disipadores en el desempeño global, por ejemplo, los tipos de conexión para un mismo disipador (Wang et al., 2018), la interacción entre distintos tipos de materiales desadherentes y espacios libres entre núcleo y confinamientos a pandeo (Dehghani & Tremblay, 2017), (Chen et al., 2016) y utilizando diferentes tipos de estructuras de confinamiento para el núcleo (Ozcelik & Dikiciaşık, 2015), (Ozcelik et al., 2016).

Incluso es posible encontrar propuestas de disipadores de bajo costo (Palazzo et al., 2009) que buscan objetivos similares de masificación de este tipo de dispositivos. Sin embargo, tienen una aproximación diferente a la que corresponde a esta investigación por el tipo de conexión propuesta que requiere una fabricación especializada.

Las investigaciones en torno a los BRB se incrementan constantemente con propuestas de nuevas configuraciones y materiales (Tsai et al., 2004) (Chen et al., 2016). Aunque comparten el principio de funcionamiento, siempre existe espacio para la innovación y el análisis a profundidad de la interacción entre los componentes constitutivos, lo cual genera bases que pueden ser de utilidad para el desarrollo de nuevas propuestas.

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Como se ha mencionado, el dispositivo que se estudia fue propuesto por Guerrero (2016) como parte de su tesis doctoral. Es un disipador de energía sísmica de bajo costo de tipo contraventeo restringido a pandeo. El bajo costo está relacionado con los materiales utilizados y el proceso de fabricación. Los materiales son comunes en la construcción de edificaciones y de fácil acceso en zonas urbanas. El proceso de fabricación se puede desarrollar con herramientas poco especializadas y mano de obra con conocimientos básicos de construcción.

4.1.1. Características del disipador

La Figura 3 muestra un esquema general del diseño de los dispositivos estudiados. Se indica la barra central de acero que funcionó como núcleo del disipador y tuvo sección cuadrada con una medida nominal de media pulgada y una medida real de 1.22 cm de lado. La barra contó con ganchos en sus extremos, definidos por la longitud L2, y cuya función es anclar la barra en el mortero de los extremos. La parte central de la barra, con longitud L1, es la sección que puede deformarse libremente y que está restringida al pandeo. Dicha sección se cubrió con un material plástico cuya función fue desadherir el acero del mortero y facilitar la deformación, en la Figura 3 se denomina MD.

La parte central de la barra se colocó dentro de un perfil tubular rectangular (PTR) de 89 mm de lado y longitud L3 el cual se relleno con mortero y su función fue restringir el pandeo de la barra. Cada gancho de la barra se introdujo en un PTR de 102 mm de lado y longitud L4 que se relleno con mortero, su función fue: confinar el mortero en los extremos donde se ancla la barra; alojar pernos de cortante que mejoran la interacción entre mortero, gancho y PTR; alojar las conexiones con el arreglo experimental; y traslaparse con el PTR central para evitar las fallas fuera de plano.

Finalmente, se indica una separación entre morteros denominada D1, la cual, se relleno con poliestireno expandido. Su función es permitir que la barra se deforme en compresión sin la influencia del mortero, de tal forma que la resistencia este dada solo por la barra de acero. Las dimensiones correspondientes a cada disipador se presentan en la Tabla 1

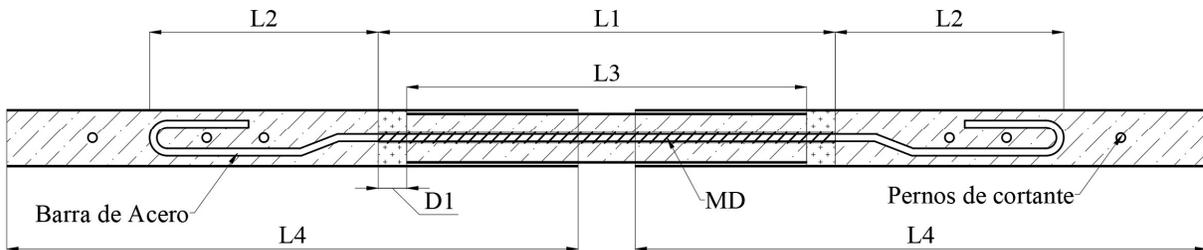


Figura 3. Esquema general de construcción del dissipador

4.1.2. Variables de estudio

Sobre el diseño general del dispositivo se plantearon variables de estudio con el objetivo de analizar la flexibilidad para escalar la resistencia, la longitud y los materiales constitutivos. Lo anterior con el objetivo de acotar los límites de funcionamiento del diseño y enriquecer las recomendaciones de construcción.

La primera variable en el diseño es la cantidad de barras que se pueden colocar en el núcleo. Se fabricaron dispositivos con una, dos y tres barras de acero de las mismas dimensiones. Esto se implementó por estar directamente relacionado con la capacidad de disipación y resistencia.

La segunda variable es el material desmoldante, del cual se utilizaron dos tipos: el primero es una cinta de caucho extraída de cámaras de llanta de bicicleta y el segundo son tiras de espuma de polipropileno de 1/8" de espesor, también conocido como bajo alfombra. Esta variable se relaciona con el desempeño en compresión por la diferencia en el coeficiente de fricción de cada material y en la fatiga por el espaciado entre el núcleo y el confinamiento de mortero (Dehghani & Tremblay, 2017).

La tercera variable es la longitud del núcleo, específicamente aquella donde se concentran las deformaciones plásticas, esto se relaciona directamente con la rigidez del dispositivo y la capacidad de disipación. Con este fin se instalaron barras cuya longitud $L1$ (ver Figura 3) fue de 35 y 75 cm, manteniendo invariable la longitud en la zona de anclaje.

4.1.3. Fabricación de especímenes

El proceso de fabricación se llevó a cabo con el apoyo de estudiantes de la maestría en estructuras y de la licenciatura en ingeniería civil, ambos de la UNAM, esta condición incluye una variable adicional dado que, a pesar de la preparación y experiencia profesional, ninguna

de las personas que participaron eran especialistas en procesos de fabricación de disipadores, en el uso de las herramientas requeridas o en la mezcla y colado de morteros. Dicha condición es consistente con el planteamiento del problema, es decir, que personas no especializadas en fabricación de disipadores sean capaces de hacerlos.

Todos los materiales utilizados se entregaron sin ningún proceso previo, es decir, tal como se adquirieron directamente en un comercio, por lo que fue necesario preparar todas las piezas. El proceso se dividió en grupos de trabajo con actividades de corte de piezas, doblado y habilitado de núcleos y perforación de PTR en una primera etapa. Posteriormente, los grupos se dividieron en: ensamble de piezas, habilitado para colado y preparación de morteros.

El proceso se llevó a cabo en aproximadamente dos semanas, requiriendo de una semana para la preparación de las piezas y otra para el habilitado y colado. Para este último proceso, cada dispositivo requirió de tres etapas de colado esquematizadas en la Figura 4, en la cual se puede observar que en la primera etapa se coló la parte central del disipador, utilizando poliestireno como frontera en uno de los lados y vaciando el mortero por el otro. Una vez endurecida la primera etapa se inició la segunda, en la cual se colocó el poliestireno en la frontera del mortero, se instaló el PTR en su posición final, se colocaron los pernos de cortante y se vació el mortero por el extremo libre. La etapa tres de colado inicia al endurecerse la segunda y sigue los mismos pasos que esta.

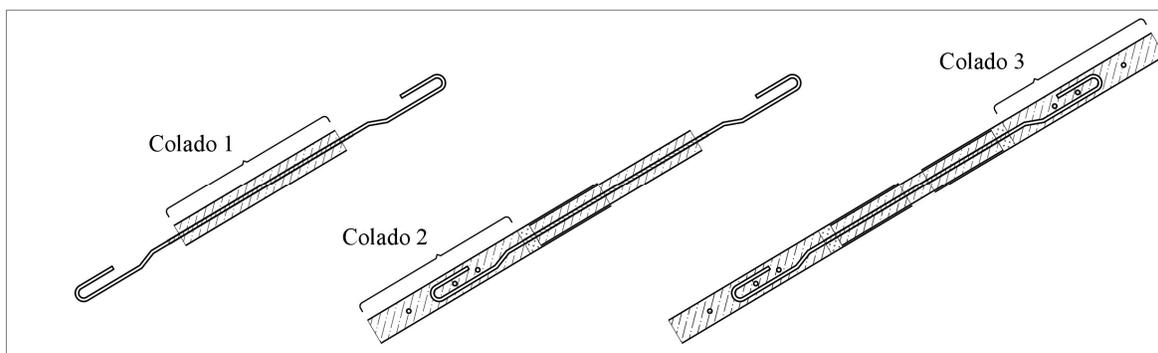


Figura 4. Esquema del proceso de colado de mortero

En total se fabricaron 15 especímenes que consideran las variables de estudio expuestas previamente. Las características de cada dispositivo se presentan en la Tabla 1, en la cual se detallan: el número que identifica a cada dispositivo, el número de barras de acero en el núcleo, el material que se utiliza como desadherente, la longitud que puede deformarse

libremente, la longitud de anclaje en los extremos, la longitud del PTR que restringe el pandeo, la longitud de los PTR en los extremos y la longitud sin restricción que permite las deformaciones de la barra a compresión. Cabe mencionar que los encabezados de la tercera a la octava columna hacen referencia a la Figura 3.

Tabla 1. Características de los dispositivos

ID	Barras	Material desadherente (MD)	L1 [cm]	L2 [cm]	L3 [cm]	L4 [cm]	D1 [cm]
1	2	Caucho	75	40	70	100	2.5
2	1	Caucho	75	40	70	100	2.5
3	1	Caucho	75	40	70	100	2.5
4	1	Caucho	75	40	70	100	2.5
5	1	Caucho	75	40	70	100	2.5
6	1	Polipropileno	75	40	70	100	2.5
7*	1	Polipropileno	75	40	70	100	2.5
8	1	Caucho	80	40	70	100	5.0
9	3	Polipropileno	75	40	70	100	2.5
10	1	Caucho	75	40	70	100	2.5
11*	2	Polipropileno	75	40	70	100	2.5
12	1	Polipropileno	80	40	70	100	5.0
13	1	Polipropileno	35	40	70	100	2.5
14	1	Polipropileno	35	40	70	100	2.5
15*	2	Polipropileno	75	40	70	100	2.5

* Utilizados en otro proyecto

Cabe mencionar que los dispositivos 7, 11 y 15 se utilizaron en el proyecto de investigación de Sánchez Arriaga (2019) en el cual se realizaron pruebas de simulación híbrida, por lo que sus resultados no forman parte esta investigación. En el caso del dispositivo 4, al analizar los resultados experimentales se observó que su comportamiento fue muy inestable y los resultados distaban mucho del resto de los disipadores, por lo tanto, se omitieron sus datos del análisis general asumiendo que existieron errores de fabricación.

También es relevante comentar que, originalmente, todos los disipadores se fabricaron con una distancia D1 (ver Figura 3) igual a 5 cm. Sin embargo, al iniciar las pruebas se observó que esa distancia provocaba una falla prematura del dispositivo. Dado esto se decidió reducir la distancia D1 a 2.5 cm incluyendo una capa adicional de *grout* del lado del anclaje. Por lo tanto, las características indicadas previamente en la Tabla 1 corresponden al estado de cada dispositivo al inicio de las pruebas.

En la Figura 5 se presentan imágenes del proceso de fabricación de los disipadores y del habilitado de las conexiones experimentales. En la Figura 5a se observa el habilitado de las barras de acero que conforman el núcleo, en la Figura 5b se aprecia el mezclado del mortero de relleno, la Figura 5c corresponde a los preparativos para la primera etapa de colado, en la Figura 5d se observa el proceso de soldadura de placas sobre el dispositivo, las cuales sirven para conectarlo con el arreglo experimental, en la Figura 5e se observa el proceso de pintura de los dispositivos y en la Figura 5f se aprecian dispositivos terminados, los cuales se pintaron y rotularon con su número de identificación.



Figura 5. Fotografías del proceso de fabricación

Para poder realizar las pruebas e imponer los desplazamientos propuestos fue necesario desarrollar conexiones que permitieran la interacción entre el arreglo experimental, el actuador y los dispositivos. Se optó por una conexión atornillada que permitiera cambiar entre dispositivos ágilmente y simulando casos reales en donde se requiera reemplazar disipadores degradados. El número de tornillos y espesores de placas se sobre diseñaron para evitar un comportamiento inesperado de la conexión durante el experimento. Se realizó la revisión de todos los elementos que intervienen en la conexión para verificar que la resistencia superara la capacidad del disipador de mayor resistencia.

En la Figura 6 se presentan los detalles de la conexión utilizada. En la Figura 6a se presenta una vista en planta de la conexión, en la cual se pueden observar las placas PL1 que están soldadas a los disipadores y se conectan a las placas PL2 mediante ocho tornillos, cuatro por lado, a su vez, la placa PL2 esta soldada a la placa PL3 con soldadura de filete en ambos lados. La placa PL3 es la base para unir los dispositivos al muro de reacción en un lado y al actuador en el otro, esto permite la transmisión de fuerzas del arreglo experimental a los disipadores.

En la Figura 6b se presenta un corte por el centro de la conexión, en esta se aprecia el arreglo de cuatro tornillos que une cada placa PL1 con su respectiva PL2, así como las soldaduras que unen al disipador con sus placas. Este tipo de conexión resultó muy practica en el desarrollo de la investigación, principalmente por la holgura de los agujeros, lo cual facilitó la instalación, el alineamiento y la nivelación de los disipadores con respecto a los actuadores.

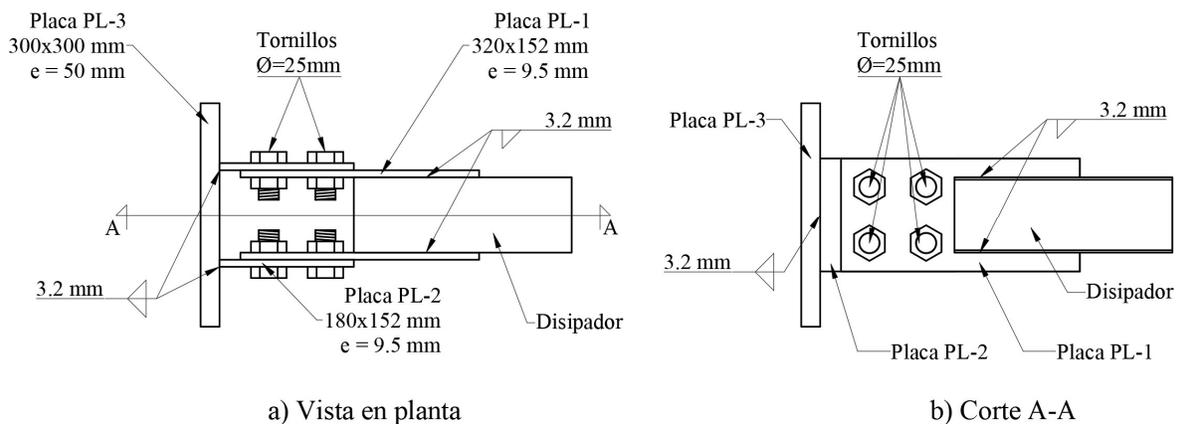


Figura 6. Esquema de la conexión utilizada en las pruebas experimentales

Finalmente, en la Figura 7 se presenta un isométrico de la conexión, en el cual se puede observar, además de lo indicado previamente, la posición de los pernos de cortante del dissipador y los agujeros en la placa PL3 donde se colocan los tornillos que unen la conexión con el arreglo experimental

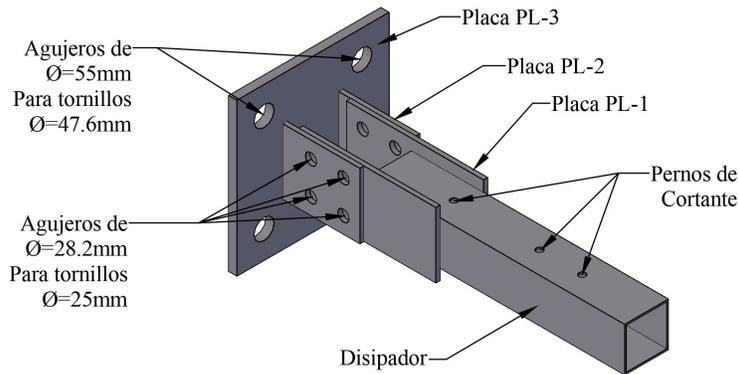


Figura 7. Isométrico de la conexión utilizada en las pruebas experimentales

4.1.4. Pruebas experimentales en materiales constitutivos

Durante el proceso de fabricación de los dispositivos se determinó realizar pruebas de resistencia y comportamiento en sus materiales, específicamente en el acero del núcleo y el mortero, este último se utiliza como relleno para restringir el pandeo y anclar la barra en los extremos. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

4.1.4.1. Pruebas en el acero del núcleo

Para determinar las propiedades del núcleo del dissipador se realizaron pruebas de tensión en tres muestras tomadas del mismo lote de barras que se utilizaron en la fabricación, cada una con una longitud total aproximada de 70 cm y una longitud de prueba aproximada de 50 cm. Las pruebas se realizaron en el laboratorio de estructuras del Instituto de Ingeniería de la UNAM, con una velocidad de carga de 0.2 mm/s y se llevaron a la falla para determinar la resistencia máxima.

La Figura 8 presenta un ejemplo de las curvas obtenidas del ensaye de las barras, en el eje horizontal se muestran los desplazamientos en milímetros y en el eje vertical se muestra la carga aplicada en toneladas, ambos valores son capturados por el sistema de control del marco de carga donde se realizó la prueba. En la curva se puede apreciar al inicio un desplazamiento atribuido al ajuste del sistema de carga, posteriormente la zona de

comportamiento elástico, una meseta de fluencia bien definida, una zona post fluencia donde se presenta endurecimiento por deformación y finalmente la falla.

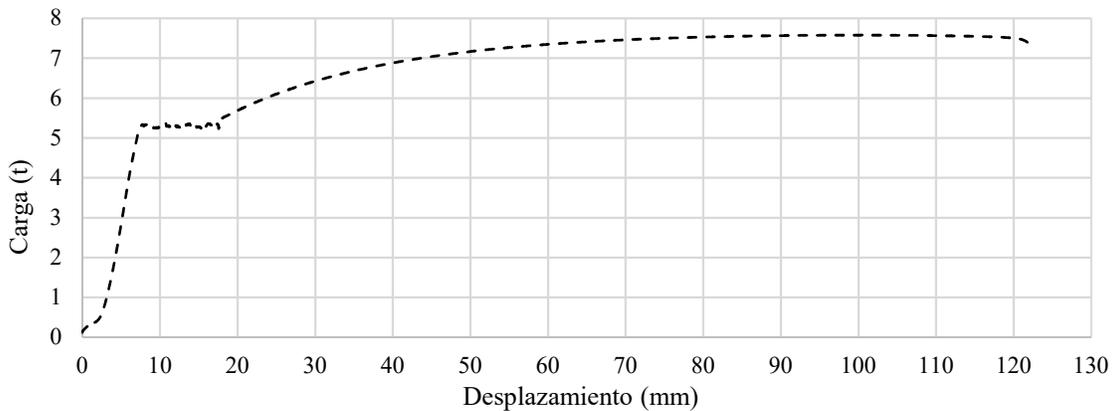


Figura 8. Curva carga desplazamiento experimental

Los datos medidos se ajustaron a curvas de esfuerzo-deformación, las cuales se utilizaron para calibrar una curva analítica utilizando el modelo de Mander (1983). El modelo se alimentó de los datos ajustados y el coeficiente de ajuste para la zona de endurecimiento por deformación se obtuvo de la propuesta de Rodríguez & Botero (1995). Una vez calibrada la curva analítica es posible calcular el esfuerzo esperado en el núcleo para un desplazamiento dado, es decir, se puede calcular la fuerza esperada al aplicar desplazamientos cíclicos a los disipadores. Lo anterior es posible si se elimina la meseta de fluencia con base en Higashida et al. (1978) donde se observa que las curvas esfuerzo-deformación para cargas cíclicas no presentan dicha meseta, pero conservan un esfuerzo de fluencia muy similar.

La curva analítica y las curvas experimentales ajustadas se presentan en la Figura 9, considerando para el eje horizontal el valor de desplazamiento y en el eje vertical los valores de carga, ambos se calcularon con las características de las barras ensayadas y sus curvas esfuerzo deformación. En la figura también es posible apreciar el ajuste de la curva analítica con las curvas experimentales.

Las características principales de las curvas esfuerzo deformación ajustadas se muestran en la Tabla 2. En esta se detalla el identificador de la muestra, el área medida en la barra, la longitud de la barra que se deforma libremente, la deformación de fluencia al inicio de la meseta, el esfuerzo de fluencia obtenido del promedio de la meseta, la deformación ultima ubicada poco antes de la falla de las barras y finalmente el esfuerzo máximo registrado en la

zona inelástica. Con los valores de cada barra se obtuvo un promedio y se aprecia que el comportamiento es muy estable entre las pruebas.

Tabla 2. Características experimentales de barras de acero

Muestra	Área (cm ²)	Longitud (cm)	Deformación de fluencia (ϵ_y)	Esfuerzo de fluencia (σ_y) [kg/cm ²]	Deformación última (ϵ_u)	Esfuerzo máximo (σ_u) [kg/cm ²]
M1	1.49	50.3	0.00178	3553	0.183	5092
M2	1.49	50.5	0.00178	3573	0.178	5095
M3	1.49	50.1	0.00179	3570	0.178	5089
Promedio	1.49	50.3	0.00178	3565	0.180	5092

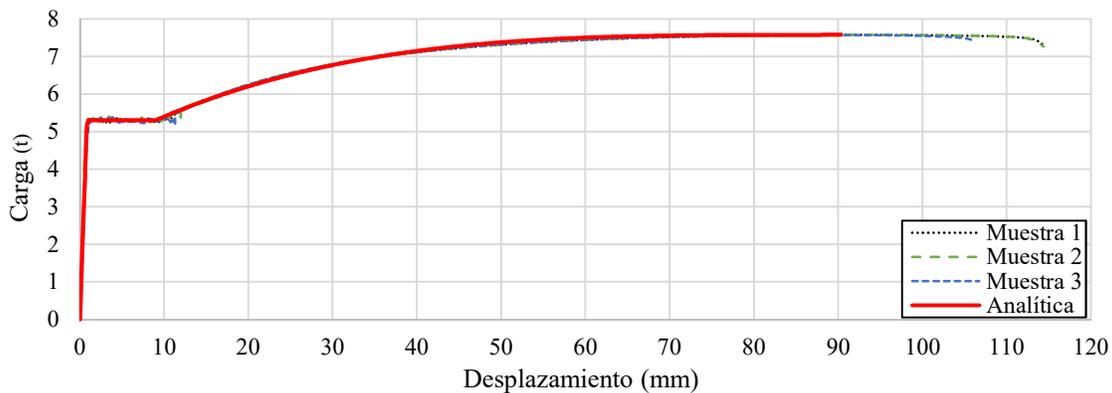


Figura 9. Comparación de curvas carga - desplazamiento analítica y experimentales

4.1.4.2. Pruebas de mortero

Durante el proceso de fabricación de dispositivos se tomaron muestras del mortero utilizado para rellenar los PTR con el objetivo de obtener la resistencia a los 28 días y utilizar los datos en la revisión del desempeño de los disipadores. Para esto, se conformaron siete cubos de mortero de 5 cm por lado y se ensayaron en el laboratorio de materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM, con una velocidad de carga de 4.5 t/min hasta llevarlos a la falla.

Los resultados de la prueba se presentan en la Tabla 3, la cual, se compone por el identificador de la muestra; el peso de la muestra; el valor de altura promedio del cubo; el área promedio, la cual se obtuvo promediando tres áreas determinadas a distintas alturas; el valor registrado de carga máxima antes de la falla; el valor de esfuerzo máximo, que se calculó con los datos previos; y finalmente la densidad de la muestra. De los valores de la tabla se puede observar que las dimensiones son variables, lo cual es consecuencia de que los cubos se cortaron de muestras más grandes, sin embargo, se observa consistencia en los resultados de esfuerzo,

con variaciones de menos de 15% con respecto a la media, así como valores muy uniformes de densidad con variaciones menores al 1% con respecto a la media.

Tabla 3. Resultados de pruebas de mortero

Resultados experimentales						
Muestra	Peso (gr)	Alto(cm)	Área (cm ²)	Carga máx. (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Densidad (gr/cm ²)
1	267.8	5.09	25.74	9741	378.4	2.04
2	262.6	5.03	25.35	11286	445.2	2.06
3	246.6	4.91	24.33	10715	440.3	2.06
4	256.8	5.00	24.96	10704	428.8	2.06
5	257.6	4.98	25.18	10265	407.7	2.05
6	262.8	5.01	25.42	10495	412.8	2.06
7	258.9	5.02	24.94	12133	486.5	2.07
PROMEDIO	259.0	5.01	25.13	10763	428.5	2.06

4.1.5. Análisis teórico del comportamiento

Previo a las pruebas experimentales en los disipadores se realizó un análisis de las características de los materiales constitutivos y del dispositivo en su conjunto para estar en condiciones de diseñar el arreglo experimental y los desplazamientos a imponer.

Los dispositivos fabricados, a diferencia de otros reportados en la literatura, carecen de un cambio considerable en la sección transversal del núcleo que permita definir con exactitud la zona de comportamiento elástico que transmite las fuerzas a la estructura. En el diseño, objeto de la investigación, la transmisión de fuerzas se realiza a través de la interacción de los ganchos realizados en los extremos de la barra, el mortero, los pernos y el PTR de los extremos. Siendo este último el que se soldó a la conexión atornillada (ver Figura 3 y Figura 6). Dado lo anterior fue necesario realizar los análisis que se presentan a continuación.

Anclaje de la barra

En cuanto al anclaje, se diseñaron los ganchos para garantizar el desarrollo de la carga de fluencia del núcleo, para lo cual se utilizó la ecuación (1) que se obtuvo de las NTC de la Ciudad de México (GOB-CDMX, 2017). Dado que la ecuación está diseñada para barras circulares se calculó un diámetro equivalente igualando los perímetros de ambas secciones con la ecuación (2), adicionalmente se utilizaron dos factores de ajuste, el primero se

determina con la magnitud del diámetro equivalente y tiene un valor de 0.8 para las barras utilizadas y el segundo tiene un valor de 2, el cual se utiliza para barras sin corrugaciones.

$$l_{dt} = 0.076 * d_{be} * \frac{f_y}{\sqrt{f'_c}} * c1 * c2 \quad (1)$$

donde l_{dt} es la longitud de desarrollo teórica, d_{be} es el diámetro de la barra equivalente, f_y es el esfuerzo de fluencia experimental del acero, f'_c es la resistencia a la compresión del mortero y las constantes $c1$ y $c2$ corresponden a los factores de ajuste. El valor de d_{be} se calcula como:

$$d_{be} = \frac{4 * l_b}{\pi} \quad (2)$$

donde l_b corresponde a uno de los lados de la sección cuadrada de la barra del núcleo

Se aplicó la ecuación (1) que corresponde a barras con ganchos de 180° y utilizando los datos presentados previamente se obtuvo un resultado de 34 cm de longitud de desarrollo que, comparada con los 40 cm considerados en el diseño, da un factor de seguridad adicional de FS=1.18. Cabe destacar que para el valor de f_y y f'_c se utilizaron los resultados promedio obtenidos en las pruebas experimentales, por lo tanto, se considera que el factor es adecuado.

Deformación elástica de las conexiones

El objetivo de este análisis es determinar los desplazamientos que se presentan en la conexión, los cuales se derivan de la carga que aplica el actuador sobre el dispositivo. Estos desplazamientos se sumaron al desplazamiento objetivo que se impuso a los disipadores. Para determinar la magnitud de la deformación ante cargas distintas, se calculó la rigidez de la conexión para cargas de tensión y de compresión. Dicha rigidez se analizó de forma simplificada, considerando únicamente las secciones de acero y asumiendo que la función del mortero era únicamente permitir la interacción y evitar pandeos. En la Figura 10 se muestra esquemáticamente los elementos considerados para el análisis de rigidez.

La Figura 10a presenta el análisis a compresión. En la parte superior se observa una llave que delimita la parte de la conexión analizada, dicha llave parte del lado izquierdo de la placa PL-3 hasta el centro de un perno de cortante, indicado con una línea discontinua. También se

muestra en la figura, la dirección de la fuerza de reacción que desarrolla la barra hacia el perno de cortante, este último es el encargado de transmitir la fuerza hacia la conexión de acuerdo con la hipótesis de que el mortero no interviene en la rigidez. A partir de la línea discontinua se considera que la fuerza se aplica de forma axial y se distribuye de manera uniforme a través de las secciones de acero, dado lo anterior, para determinar la rigidez se utiliza la longitud y el área de cada elemento dentro de los límites descritos.

La Figura 10b presenta el análisis a tensión, nuevamente se incluye una llave en la parte superior que delimita la sección considerada y la dirección de la fuerza de reacción de la barra hacia el perno de cortante considerado. En este análisis se utilizan las mismas hipótesis expuestas para la rigidez a compresión.

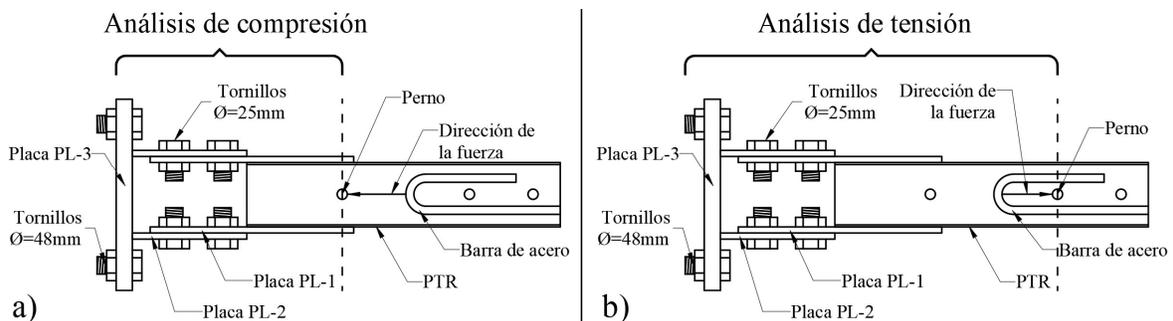


Figura 10. Secciones consideradas para el análisis de deformación elástica a tensión y compresión

En las tablas 4 y 5 se presentan la rigidez calculada para la conexión en los procesos de compresión y tensión respectivamente. El análisis se realizó de izquierda a derecha con referencia a la Figura 10 y la rigidez axial se calculó por tramos, cada tramo está delimitado por el cambio en la sección transversal de la conexión, es decir que cada tramo tiene un área constante y su longitud depende del punto donde cambia la sección transversal. En la primera columna de las tablas, se detallan los elementos considerados para cada tramo y en las siguientes los valores de área, longitud y rigidez del tramo. Finalmente, se calculó la rigidez de la conexión para cada proceso de carga, considerando la rigidez de cada tramo y que cada dispositivo tiene dos conexiones.

Tabla 4. Rigidez equivalente del sistema a compresión

Rigideces axiales por lado a compresión			
Elementos	Área (cm²)	Longitud (cm)	Rigidez (t/mm)
Dos placas de 6" * 5/8" con longitud igual al espacio entre la conexión atornillada y placa base más el espesor de la placa base	29.03	7.88	736.86
Cuatro placas de 6" * 5/8" con longitud igual al largo de la conexión atornillada	29.03	30.40	191.00
Dos placas de 6" * 5/8" más el área del PTR con longitud igual a la distancia entre el borde y el perno a compresión	35.48	15.00	473.12
Rigidez a compresión de las conexiones (t/mm)			57.43

Tabla 5. Rigidez equivalente del sistema a tensión

Rigideces axiales por lado a tensión			
Elementos	Área (cm²)	Longitud (cm)	Rigidez (t/mm)
Cuatro tornillos de 47.6 mm de diámetro y longitud igual a la placa del actuador más la placa base	62.07	10.16	1221.88
Dos placas de 6" * 5/8" con longitud igual al espacio entre la conexión atornillada y placa base	29.03	2.80	2073.73
Cuatro placas de 6" * 5/8" con longitud igual al largo de la conexión atornillada	29.03	30.40	191.00
Dos placas de 6" * 5/8" más el área del PTR con longitud igual a la conexión soldada	41.53	16.80	494.43
Área del PTR con longitud desde la conexión soldada hasta el primer perno a tensión	12.50	18.20	137.36
Rigidez a tensión de las conexiones (t/mm)			31.57

Penetración de fluencia

Como se comentó previamente el diseño de los disipadores presenta incertidumbre en la longitud exacta donde se presentará la deformación plástica del núcleo ya que carece de un cambio en la sección transversal. Entre los mecanismos que se pueden analizar para aproximar una longitud probable se encuentra el de penetración de fluencia en la zona de anclaje de la barra. Este fenómeno se puede calcular en el dispositivo utilizando la ecuación (3) (Calvi et al., 2007) que proporciona la longitud de la barra dentro de la zona de anclaje que se deformará plásticamente. Al igual que en el cálculo de la longitud de desarrollo se utilizó el diámetro equivalente calculado con la ecuación (2) y los factores de ajuste.

$$l_{pf} = 0.022 * d_{be} * f_y * c1 * c2 \quad (3)$$

donde l_{pf} corresponde a la longitud de penetración de fluencia en la zona de anclaje, d_{be} es el diámetro de la barra equivalente, f_y es el esfuerzo de fluencia experimental del acero de las barras, las constantes $c1$ y $c2$ fueron definidas previamente para la ecuación (1).

El resultado de la ecuación (3), utilizando los datos de la barra utilizada, es 26.8 cm desde la interfaz del mortero hacia la zona de anclaje.

Longitudes probables de comportamiento inelástico

La longitud del núcleo con comportamiento inelástico es una característica de los dispositivos que determina el desempeño y es necesaria para diseñar las pruebas experimentales. Sin embargo, en la etapa de predicción del comportamiento es difícil definir la longitud con exactitud, esto en consideración de que la barra es cuadrada, lisa y cuenta con un doblez y un gancho en la zona de anclaje, lo cual, no está previsto en los análisis de anclaje de barras.

Para estudiar el problema, se plantearon tres hipótesis para definir la longitud de comportamiento inelástico; la primera supone que la barra fluye hasta el anclaje mecánico que proporcionan los ganchos en los extremos, por lo que la longitud total se delimita por las partes superiores de los ganchos (L1); la segunda considera que la fluencia de la barra penetra en la zona de anclaje la distancia calculada en la sección anterior, por lo que la longitud sería la suma de la parte central más la penetración de fluencia en cada lado (L2); La tercera hipótesis infiere que el primer doblez realizado en la barra provoca un anclaje mecánico con el mortero que reduce la penetración de fluencia, por consiguiente, la longitud corresponde a la distancia entre los dobleces realizados en cada lado de la barra (L3).

La Figura 11 muestra gráficamente la ubicación de las tres hipótesis de longitud planteadas y con la magnitud que les corresponde. Las longitudes L1 y L3 están definidas por el diseño del dissipador y la L2 depende del cálculo de penetración de fluencia. Cabe mencionar que, mientras mayor sea la longitud que fluye, mayor será el desplazamiento que se debe aplicar al dispositivo para obtener un nivel de ductilidad objetivo.

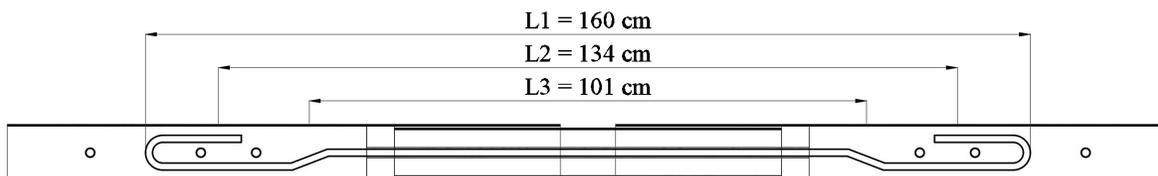


Figura 11. Longitudes teóricas del núcleo con comportamiento inelástico

Desplazamientos para el protocolo de carga

Como se planteó previamente, para realizar el experimento es necesario determinar los desplazamientos que debe desarrollar el actuador para imponer una ductilidad objetivo en los dispositivos. Dichos desplazamientos se obtuvieron sumando; el desplazamiento del sistema (D_s), que está en función de la rigidez de la conexión; y el desplazamiento del núcleo (D_n) que depende de la ductilidad objetivo y la longitud del núcleo con comportamiento inelástico. Para esta última longitud se utilizó el valor de L_1 (ver Figura 11), la cual corresponde al caso más crítico ya que deriva en los mayores desplazamientos, pero garantiza que la ductilidad impuesta al núcleo sea al menos igual a la ductilidad objetivo.

El desplazamiento del núcleo (D_n) se calculó multiplicando la longitud L_1 (ver Figura 11) por la deformación unitaria de fluencia experimental del acero y por la ductilidad objetivo. El desplazamiento del sistema (D_s) se obtuvo multiplicando la fuerza teórica del núcleo en cada nivel de ductilidad, por la rigidez de la conexión en tensión.

En la Tabla 6 se presentan los valores de ductilidad objetivo propuestos, la fuerza en el núcleo para cada desplazamiento, los desplazamientos del núcleo para cada nivel de ductilidad, el desplazamiento del sistema calculado para cada fuerza y el desplazamiento total que debe desarrollar el actuador. Los valores presentados corresponden a un dissipador de una sola barra en el núcleo, para dissipadores con otras características se ajustaron los valores utilizando los mismos criterios expuestos.

Tabla 6. Desplazamientos totales requeridos para cada nivel de ductilidad objetivo

Ductilidad objetivo	Fuerza (kg)	Desplazamiento del Núcleo (D_n) [mm]	Desplazamiento del Sistema (D_s) [mm]	Desplazamiento Total (mm)
0.25	1,327	0.7	0.04	0.8
0.50	2,653	1.4	0.08	1.5
0.75	3,980	2.1	0.13	2.3
1.00	5,306	2.9	0.17	3.0
1.50	5,335	4.3	0.17	4.4
2.00	5,364	5.7	0.17	5.9
4.00	5,476	11.4	0.17	11.6
6.00	5,582	17.1	0.18	17.3
8.00	5,683	22.8	0.18	23.0

4.2. CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO

4.2.1. Arreglo general

El arreglo general para realizar los experimentos consistió en colocar los disipadores de forma horizontal conectados en un extremo a un bloque de reacción y en el otro extremo a un actuador con una capacidad de 50 toneladas, lo cual, al menos duplica la resistencia máxima del disipador. El actuador aplicó desplazamientos axiales reversibles de acuerdo con el protocolo que se presenta en la siguiente sección.

En la Figura 12 se muestra una fotografía del arreglo utilizado para realizar las pruebas. Se puede observar que se instalaron dos disipadores en horizontal, cada uno conectado a un actuador. Esta configuración permitió agrupar las actividades de colocación de disipadores y desarrollo de las pruebas experimentales. En la figura también se presentan los elementos principales del arreglo, entre ellos, el bloque de reacción, los actuadores, los disipadores, las placas de conexión descritas en la sección 4.1.3 y un soporte adicional, este último tenía la función de contener el disipador en caso de ocurrir una falla súbita fuera de plano, la cual no ocurrió en ningún dispositivo.

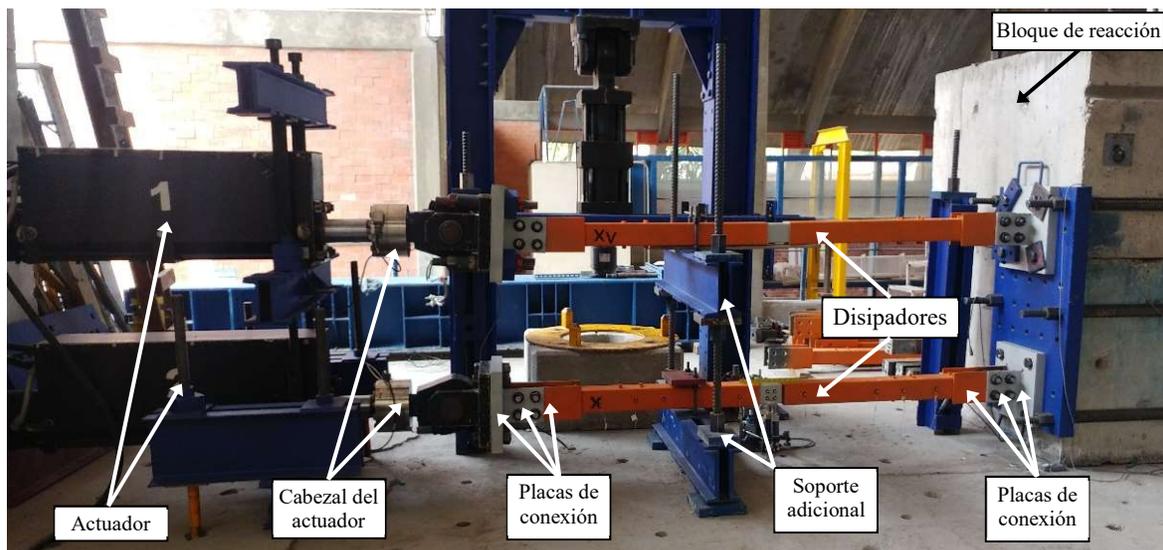


Figura 12. Arreglo general del experimento

4.2.2. Protocolo de carga

Los disipadores se probaron con tres protocolos de carga, el primero (protocolo estándar) está basado en la secuencia propuesta por el código AISC 341 (2016) para pruebas de acreditación de BRB, al cual se le agregaron tres ciclos en el intervalo elástico y un ciclo con ductilidad de 1.5. Posteriormente, dicho protocolo se modificó en algunos especímenes reduciendo la ductilidad máxima. El segundo protocolo (para fatiga) que se aplicó posteriormente al protocolo estándar consiste en ciclos continuos con ductilidad constante hasta que se presente la falla. El último protocolo (simulación híbrida) fue usado para la tesis “Simulación híbrida de una estructura equipada con disipadores tipo BRB” (Sánchez Arriaga, 2019) y se aplicaron desplazamientos calculados en un modelo numérico de una estructura excitada con un movimiento sísmico en la base.

En la Tabla 7 se enlistan los disipadores con algunas de sus características principales, el tipo de protocolo aplicado, así como la ductilidad máxima para el protocolo estándar y el de fatiga. En la Figura 13 se presentan gráficamente los protocolos estándar y de fatiga, en el eje de las abscisas se coloca el nivel de ductilidad y en las ordenadas el tiempo de la prueba. Se indica con una línea vertical el momento en que acaba el protocolo estándar y comienza el de fatiga, lo cual sucede en desplazamiento cero con respecto a la posición inicial del dispositivo. En la figura se puede observar que el protocolo estándar tiene dos ciclos para cada nivel de ductilidad y llega a una máxima de 8, también se aprecia que el protocolo de fatiga tiene ciclos constantes y la ductilidad máxima es de 8. Finalmente, se puede observar que todas las líneas que conforman los ciclos tienen la misma pendiente, esto se debe a que las pruebas se realizaron a velocidad constante, con 0.1 mm/s para el protocolo estándar y 1.0 mm/s para el de fatiga.

El objetivo de los protocolos de desplazamiento es obtener información suficiente del desempeño de los disipadores para realizar predicciones y modelar su comportamiento; en principio, con el protocolo estándar que es una prueba común a todos y que permite contar con datos comparables; posteriormente, con las pruebas de fatiga que determinan la durabilidad de los disipadores para distintas condiciones de deformación; y finalmente, con las pruebas de simulación híbrida donde será posible calcular una demanda de ductilidad en los disipadores simulando su interacción con un edificio excitado con un movimiento sísmico.

Tabla 7. Protocolos de carga que se aplica a cada disipador

Disipador	Barras	Material desmoldante	Longitud de núcleos [cm]	Tipo de protocolo	Ductilidad máxima estándar	Ductilidad de fatiga
1	2	Caucho	75	Estándar y fatiga	4	4
2	1	Caucho	75	Estándar y fatiga	4	4
3	1	Caucho	75	Estándar y fatiga	6	6
5	1	Caucho	75	Estándar y fatiga	8	8
6	1	Polipropileno	75	Estándar y fatiga	6	6
8	1	Caucho	80	Estándar y fatiga	8	8
9	3	Polipropileno	75	Estándar y fatiga	6	8
10	1	Caucho	75	Estándar y fatiga	4	4
12	1	Polipropileno	80	Estándar y fatiga	6	6
13	1	Polipropileno	35	Estándar y fatiga	6	6
14	1	Polipropileno	35	Estándar y fatiga	6	6
7	1	Polipropileno	75	Híbrida	-	-
11	2	Polipropileno	75	Híbrida	-	-
15	2	Polipropileno	75	Híbrida	-	-

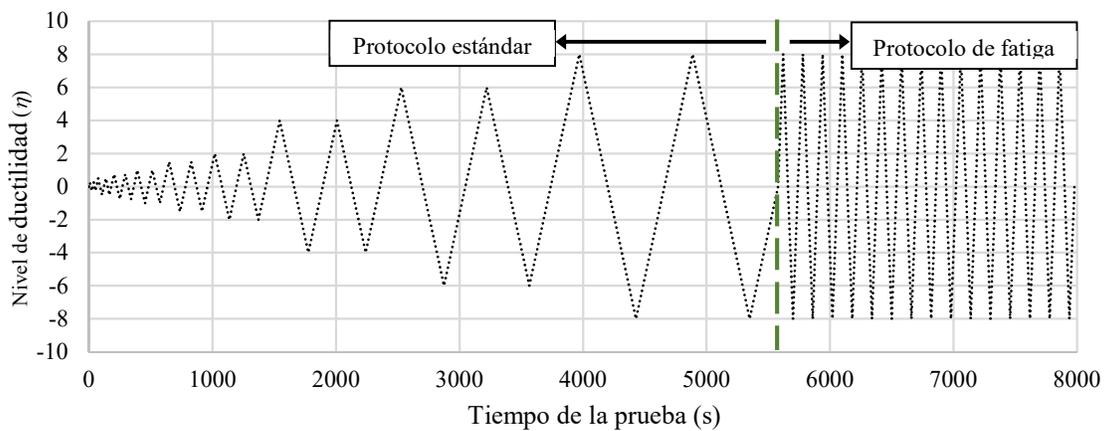


Figura 13. Protocolos de carga estándar y fatiga

4.2.3. Instrumentación

En las pruebas experimentales se utilizó un arreglo de instrumentación para obtener información adicional a la capturada por el sistema de control de los actuadores, esto con el objetivo de registrar los desplazamientos desarrollados en el dispositivo de forma más precisa y generar redundancia en la información medida.

El arreglo se integró con dos sistemas distintos. El primero se conformó de transductores de desplazamiento (TD) que se instalaron en ambos extremos del dispositivo considerando las conexiones. El segundo es un sistema óptico de captura de movimiento, que utiliza leds estroboscópicos como marcadores de posición y una cámara que registra la posición de estos en tres direcciones ortogonales. Los leds se instalaron sobre los PTR, sin incluir las conexiones, con el objetivo de registrar: los desplazamientos impuestos al cuerpo principal del disipador en las posiciones probables de fluencia del núcleo; el movimiento en el PTR central que restringe el pandeo; y las deformaciones en uno de los extremos. En total se instalaron 20 leds.

En la Figura 14 se presenta un esquema general de la ubicación de la instrumentación sobre el dispositivo, en la cual se puede observar la ubicación de los transductores, los cuales se instalaron en una estructura independiente y registran el movimiento de las placas de conexión. También se indica la ubicación de los leds y la distancia con la que se distribuyen en el extremo derecho y la parte central. Las dimensiones acotadas en los leds corresponden a las longitudes probables de fluencia del núcleo comentadas en la sección 4.1.5, a excepción de la que indica 30 cm cuya función es de control ya que no interactúa con el mortero.

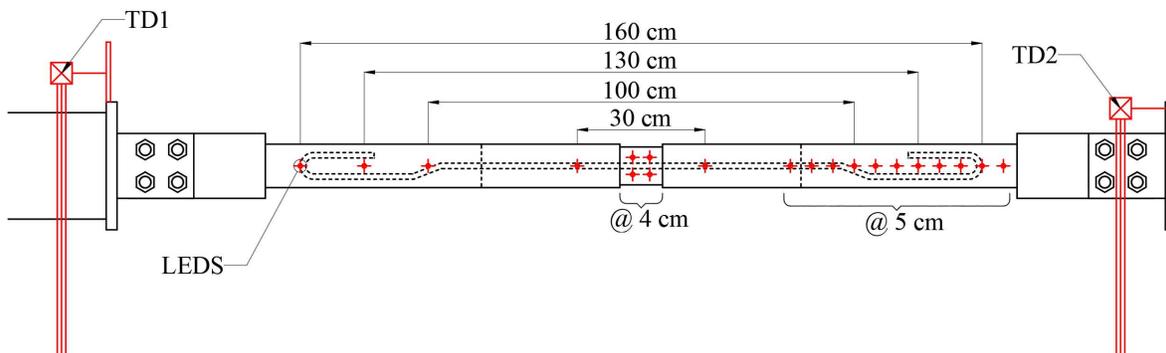


Figura 14. Esquema general de instrumentación

En la Figura 15 se muestra una fotografía de un disipador instalado e instrumentado previo al inicio de las pruebas, se indica la ubicación de los leds en el PTR de la zona central y los ubicados en la parte izquierda.

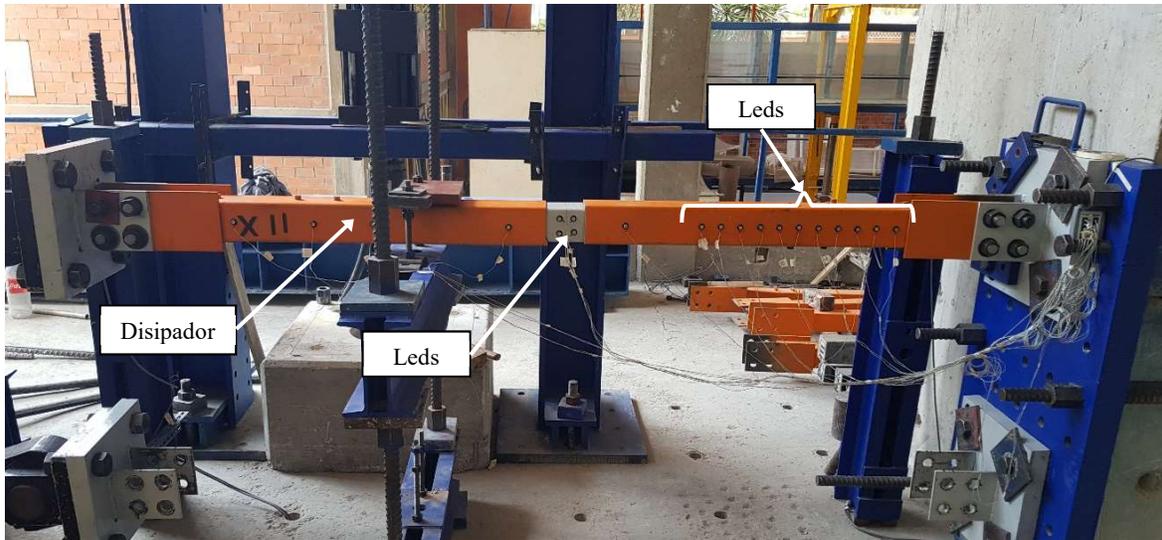


Figura 15. Instrumentación de un dispositivo en su ubicación final

En la Figura 16a se muestra una fotografía con un detalle de la instalación de los leds en la parte central del disipador, se puede observar el PTR central, encargado de restringir el pandeo, pintado en color gris y con cuatro leds instalados, los cuales permiten seguir el movimiento de la sección durante las pruebas.

En la Figura 16b se hace un acercamiento al transductor de desplazamiento instalado sobre la placa de conexión del lado del bloque de reacción. En la Figura 16c, se aprecia el transductor que registra el movimiento de la conexión en el extremo que se conecta con el actuador. El vástago de este transductor se apoya sobre una placa de color negro que forma parte de la estructura del actuador. Este instrumento controló el desplazamiento del actuador durante las pruebas.

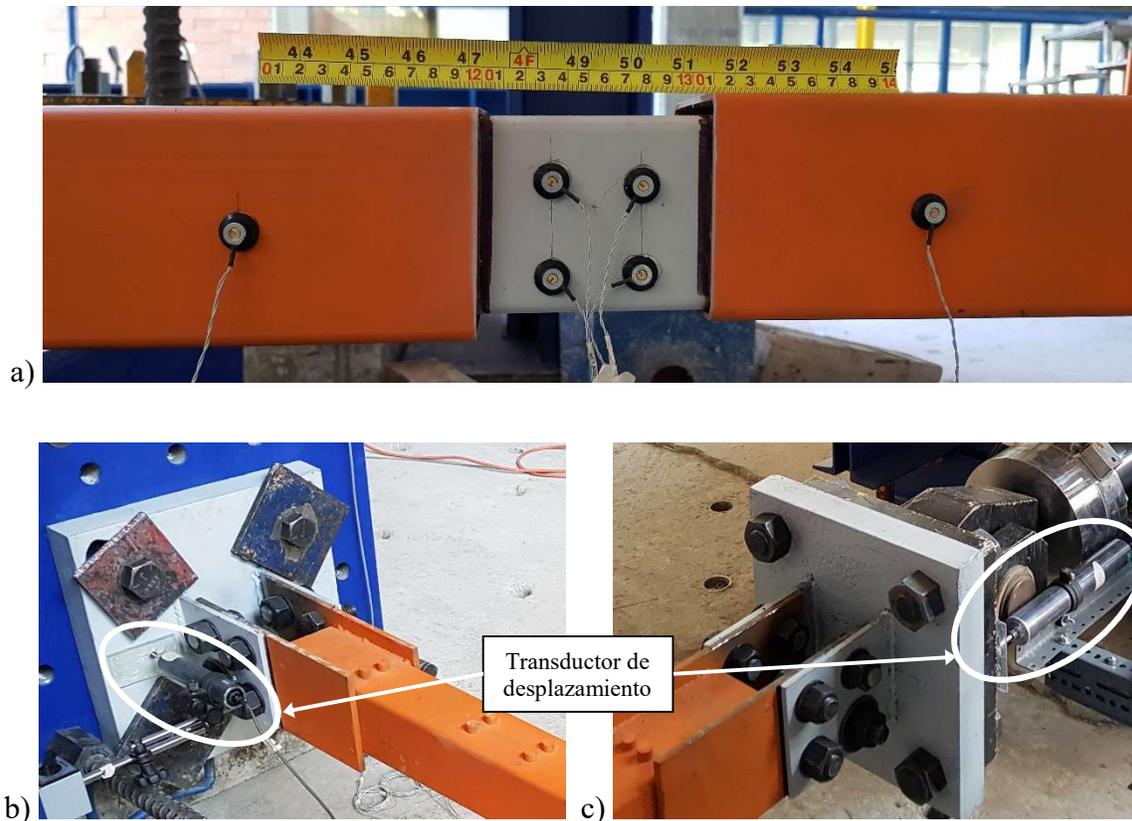


Figura 16. Arreglos de instrumentación (acercamiento)

4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.3.1. Curvas de histéresis

Una vez concluidas las pruebas experimentales se realizó el procesamiento de los datos registrados durante la mismas. Estos consistieron en valores de fuerza registrados por la celda de carga del actuador y los desplazamientos registrados por el sistema óptico, el transductor de desplazamiento interno del actuador y los transductores externos.

El procesamiento inicial consistió en sincronizar tiempos de las lecturas del sistema óptico con el sistema de adquisición de datos del laboratorio, verificar la historia de desplazamiento, calcular los desplazamientos efectivos impuestos al disipador y comparar los datos adquiridos en ambos sistemas. Por cada disipador se graficó la historia de desplazamiento aplicada y las curvas de histéresis del protocolo estándar y el de fatiga para verificar la consistencia de los resultados. En las figuras 17, 18 y 19 se muestran las gráficas realizadas con los datos del sistema óptico y la celda de carga, correspondientes a la prueba del disipador 5 que se utiliza como ejemplo.

Analizando la Figura 17 se observan varios fenómenos a destacar. Se identifican claramente las regiones de comportamiento elástico e inelástico y una zona aproximada donde ocurre la fluencia del núcleo. Es posible identificar una pendiente positiva en la región post – fluencia relacionada al endurecimiento por deformación. Existe una diferencia visible entre la resistencia máxima a compresión con respecto a la de tensión. Dicha diferencia se origina por dos fenómenos: la interacción del núcleo con el material desadherente y el confinamiento del núcleo dado por el mortero considerando el efecto de Poisson, este último fenómeno se da principalmente en los extremos. Las pendientes en las ramas de descarga son similares a la elástica con una ligera reducción a medida que se incrementa el desplazamiento y crece la influencia del efecto Bauschinger. Finalmente, se destaca la ocurrencia de un fenómeno similar a un deslizamiento en la zona cercana al cambio de dirección de la fuerza, dicho fenómeno se observó en todas las pruebas realizadas con mayor o menor magnitud y se presenta una vez que se ha superado el límite de fluencia del núcleo, una característica a destacar es que el fenómeno es repentino en el cambio de tensión a compresión y mucho más gradual en el caso inverso.

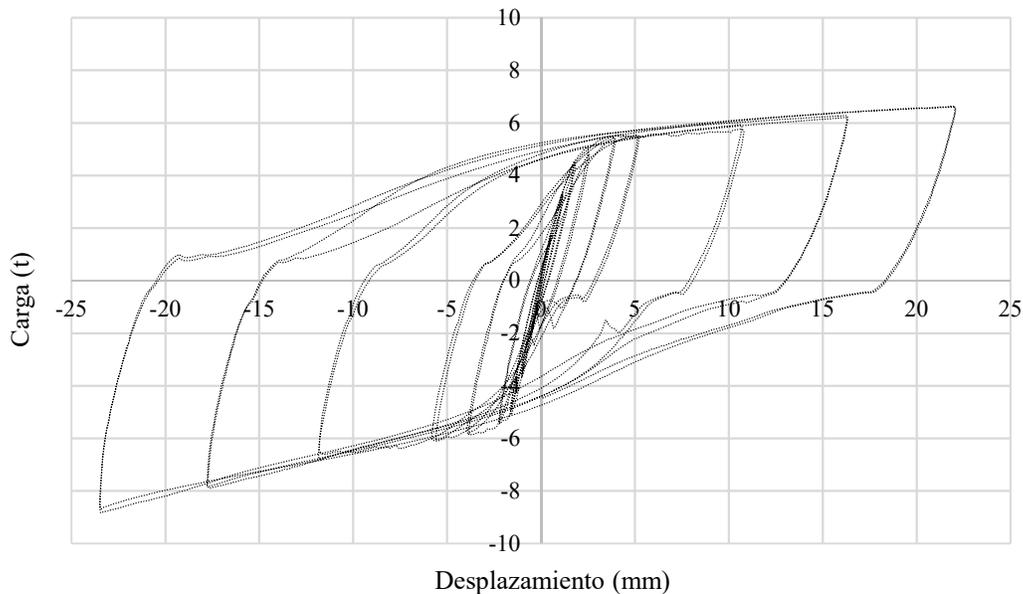


Figura 17. Curvas de histéresis para los ciclos del protocolo estándar

En la Figura 18, que corresponde al protocolo de fatiga, se puede observar que el comportamiento es muy estable ante la repetición de ciclos de desplazamiento. Lo anterior

se sostiene si se considera que el comportamiento en las ramas de descarga y en la zona donde se presenta el efecto de deslizamiento, comentado en el párrafo anterior, son prácticamente iguales. En la zona de deformación plástica es evidente la pérdida de resistencia y rigidez con la repetición de los ciclos de fatiga siendo más crítico para los ciclos a compresión. Estos efectos de degradación son provocados por pandeos locales de la barra que generan grietas en las esquinas y paredes de la barra. Dichas grietas se propagan sobre la sección y reducen considerablemente el área provocando la falla súbita del núcleo cuando se aplican cargas de tensión.

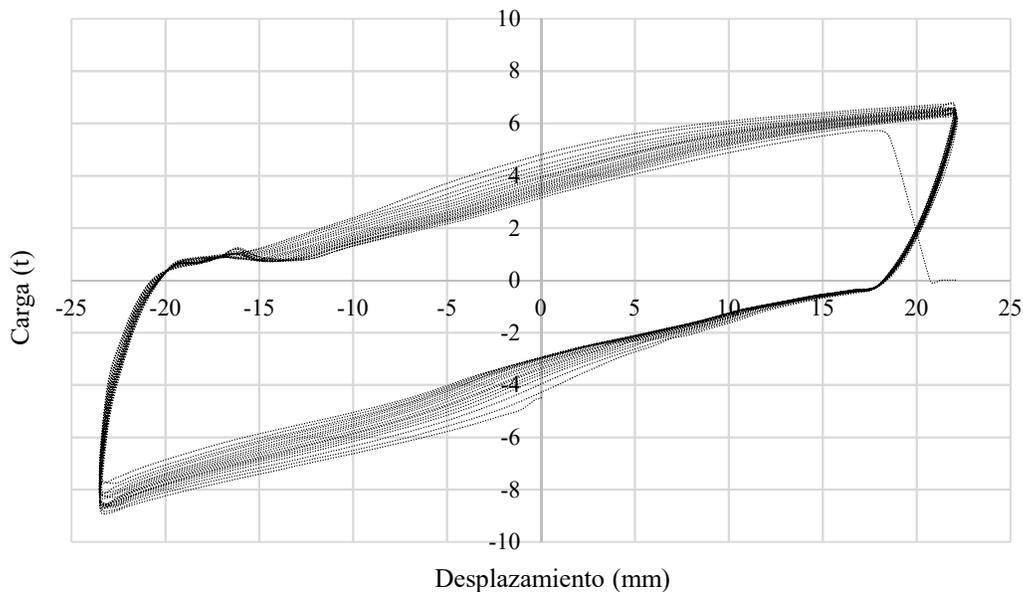


Figura 18. Curvas de histéresis para los ciclos del protocolo de fatiga

En la Figura 19 se presenta la historia de desplazamientos efectivos aplicados al disipador 5, los valores se tomaron del sistema óptico de medición y el objetivo es verificar la congruencia entre el protocolo de carga programado para la prueba, contra el protocolo efectivamente impuesto al disipador. En la gráfica se observa que en lo general la magnitud de los desplazamientos de tensión (positivos) son muy similares a los de compresión (negativos). Sin embargo, es posible detectar ligeras diferencias en los valores pico de ciclos, como se observa en el ciclo indicado en la figura. También se aprecia un cambio en la pendiente de las rectas en los ciclos de fatiga, como se comentó en la sección 4.2.2 esto se debe al incremento en la velocidad de aplicación de la carga.

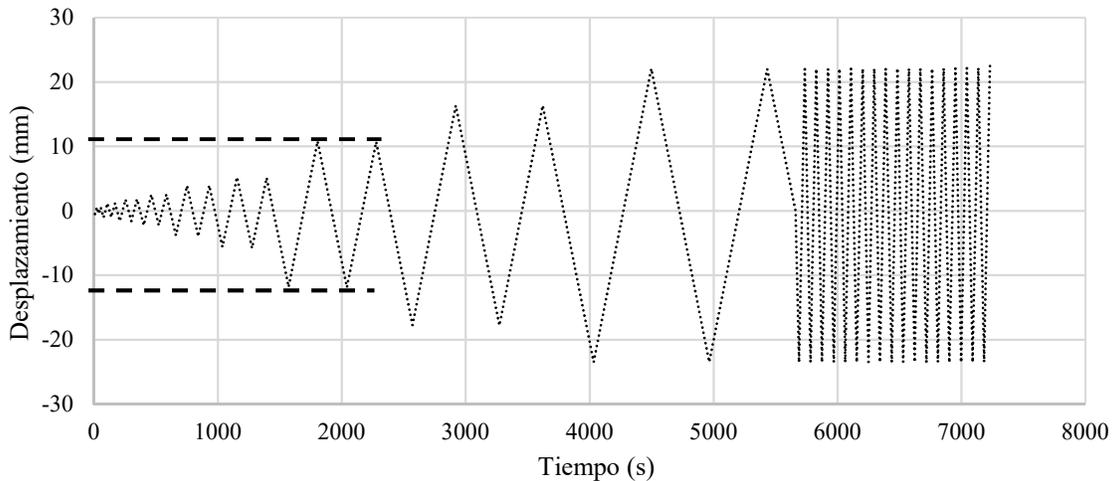


Figura 19. Historia de desplazamientos aplicados en el tiempo (protocolos de carga)

Continuando con el procesamiento de datos el siguiente paso fue la extracción de los ciclos individuales de histéresis, esto con el objetivo de determinar la carga y el desplazamiento máximo en cada ciclo para realizar los análisis subsecuentes. El proceso se realizó mediante un barrido de los datos y se identificaron las regiones donde el desplazamiento cambia de signo, de este modo cada dos cambios de signo se obtuvo un ciclo de desplazamientos. En cada ciclo se identificaron los valores de desplazamiento y carga máximos que corresponden al pico en tensión y los valores mínimos que corresponden al pico en compresión.

En la Figura 20 se presenta un conjunto de curvas correspondientes al segundo ciclo de ductilidad aproximada de cuatro para todos los especímenes. La carga se dividió con respecto al área del núcleo para que los datos sean comparables dada la variación en el número de barras. Las curvas se centraron únicamente con respecto al eje vertical considerando el desplazamiento pico a pico del ciclo y manteniendo los valores de esfuerzo sin modificación.

Analizando los datos presentados en la Figura 20 se puede observar que el comportamiento del diseño estudiado es muy estable en lo general. Al comparar las curvas de cada disipador se aprecia una congruencia en la forma general y en la tendencia de cada etapa de carga. Para las curvas de los disipadores 13 y 14 se utilizó un protocolo con desplazamientos menores dado que el núcleo tiene una longitud menor y las pruebas se diseñaron para imponer una ductilidad objetivo, esto explica la variación en el tamaño general de las curvas. Es importante resaltar que el disipador 9 presenta un comportamiento distinto en las transiciones entre compresión máxima y tensión máxima. La observación anterior se puede atribuir a que

el dissipador contaba con tres barras en su núcleo, siendo la interacción entre ellas durante las pruebas lo que determinó el comportamiento observado. La interacción mencionada puede estar influenciada por un recubrimiento de mortero reducido entre las barras extremas del núcleo y el PTR que las confina, así como la posibilidad de que cada barra reaccionó en desplazamientos distintos.

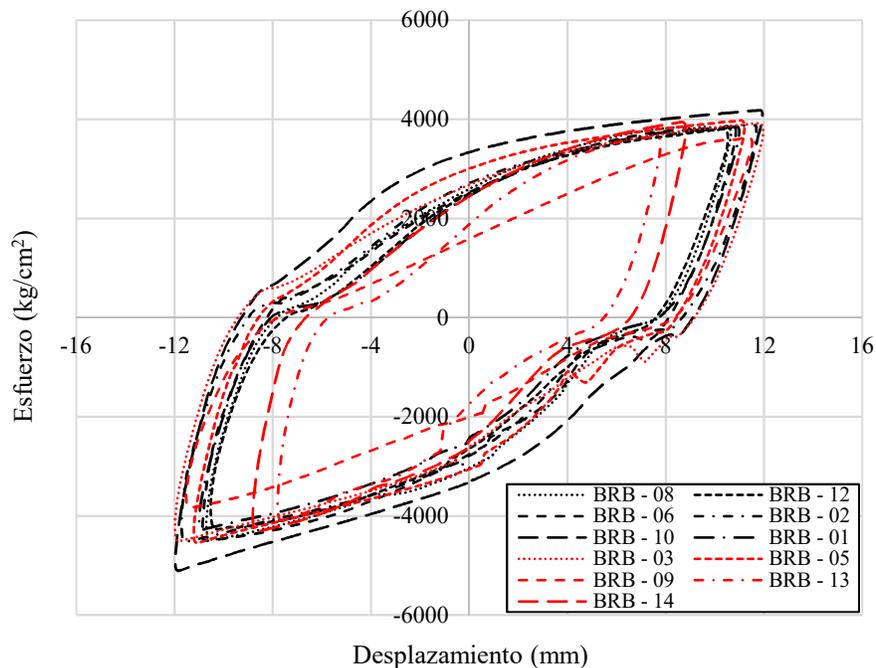


Figura 20. Curvas esfuerzo-desplazamiento para ductilidad de 4 de todos los especímenes

Cabe aclarar que, a pesar de que se utilizó el mismo protocolo de desplazamiento para todos los dispositivos de la misma longitud, existen diferencias en los desplazamientos efectivamente impuestos. Esto se puede observar en los picos de las curvas y se debe principalmente al arreglo experimental y al control que se utilizó para los actuadores. Sin embargo, las variaciones entre el desplazamiento objetivo y el impuesto son, en promedio, menores a 2 mm.

Las curvas de histéresis obtenidas se contrastaron con otros estudios y se puede observar una similitud con las curvas que desarrollan probetas de acero en otras pruebas cíclicas reversibles (Rodríguez, et al., 1999). Entre las similitudes se destacan: el endurecimiento por deformación y el incremento en los esfuerzos de compresión que se observa en los dissipadores. Entre las diferencias se destaca que las curvas de los dissipadores son más angostas en las zonas de recarga, este efecto se puede relacionar con el deslizamiento de la

barra de acero dentro del mortero de anclaje. Dicho deslizamiento es ocasionado por el fenómeno de penetración de fluencia (Zhao & Sritharan, 2007).

En Rodríguez et al. (1999) también se reportan curvas de histéresis de probetas que presentan pandeo, en las cuales se aprecia una pérdida de rigidez en los ciclos posteriores al primer pandeo, esta tendencia es muy similar a la observada en los ciclos de fatiga aplicados a los disipadores, lo anterior es congruente con el método de falla identificado en los disipadores al terminar las pruebas ya que todas las barras presentaron pandeo.

4.3.2. Factor de rigidez equivalente

El factor de rigidez equivalente (f_k) permite relacionar la rigidez efectiva del disipador con aquella que tendría una barra con la longitud total del dispositivo y el área del núcleo. Su determinación es de gran utilidad para el análisis estructural y, en principio, se puede obtener de forma teórica cuando está bien diferenciada la zona que trabaja inelásticamente. En el diseño, objeto de esta investigación, la interacción en la zona de anclaje entre el núcleo, el PTR, los ganchos, el relleno de mortero y los pernos de conexión es compleja y, por tanto, el factor se determinó estadísticamente analizando los resultados experimentales mediante las siguientes relaciones:

$$k_{BRB} = f_k * k' \quad (4)$$

$$\text{con: } k' = \frac{E * A_n}{L} \text{ y } f_k = \frac{k_{BRB}}{k'} \quad (5)$$

donde k_{BRB} es la rigidez efectiva del dispositivo, k' es la rigidez considerando únicamente el área del núcleo, L corresponde a la longitud total del dispositivo, E es el módulo de elasticidad del acero y A_n es el área del núcleo.

Para determinar la rigidez del dispositivo se utilizaron los datos de fuerza y desplazamiento para los primeros cuatro ciclos, verificando en todos los casos que el comportamiento se encontrara en el intervalo elástico-lineal. Posteriormente se procedió a realizar un ajuste por mínimos cuadrados para determinar la ecuación de una recta y se tomó la pendiente de esta como la rigidez del disipador.

En la Figura 21 se presenta un ejemplo del procedimiento de ajuste realizado con los datos en la zona de tensión para el disipador 5. En el eje vertical se presentan los valores de fuerza

medida y los desplazamientos aplicados se encuentran en el eje horizontal. Los datos obtenidos de la prueba corresponden a los primeros cuatro ciclos de carga, los cuales se identifican en la figura como datos puntuales con un símbolo de cuadro negro. A los datos se les realiza un ajuste por mínimos cuadrados, de este, se obtiene la recta punteada que se incluye. La ecuación de dicha recta también se presenta en la figura junto con el valor de R^2 , este último parámetro determina la calidad de ajuste de la ecuación con los datos experimentales y su valor máximo es uno, se puede apreciar que en el caso analizado el ajuste es muy cercano al ideal.

El procedimiento de ajuste mostrado da como resultado la rigidez del disipador k_{BRB} cuya magnitud es igual a la pendiente de la recta, en este análisis su valor es de 2.8 t/mm. Calculando k' con las características del disipador 5 y utilizando la ecuación (5) se obtiene un valor de $f_k = 2.3$ para cargas de tensión.

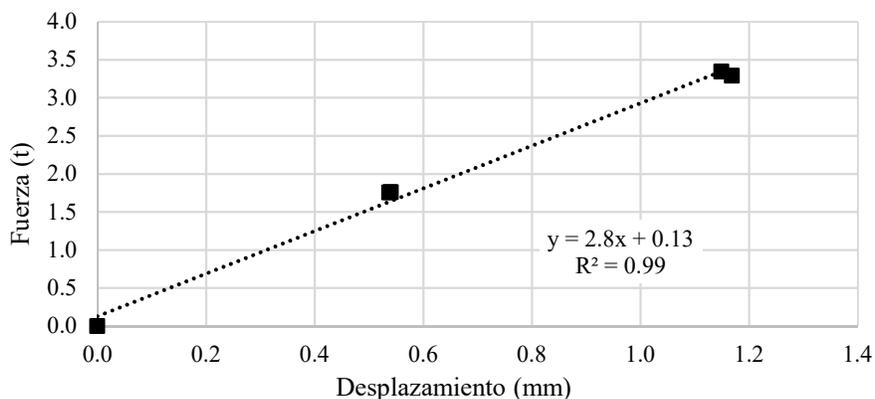


Figura 21. Ajuste de mínimos cuadrados para los datos en el intervalo elástico lineal

Una vez realizado el procedimiento en todos los dispositivos se procesaron los datos y se construyó la gráfica que se presenta en la Figura 22, en la cual, se presenta el valor promedio más menos una desviación estándar. Para este factor en específico se obtuvo una dispersión menor al 18%. Cabe destacar que se utilizaron los valores de todos los dispositivos, sin embargo, es de esperarse que a mayor área en el núcleo esta relación baje como se puede observar en los disipadores 01 y 09 que cuentan con 2 y 3 barras respectivamente. En los disipadores 13 y 14 debería observarse una tendencia similar considerando que, al ser más cortos, el núcleo es más rígido; sin embargo, en los resultados, no es tan evidente la diferencia.

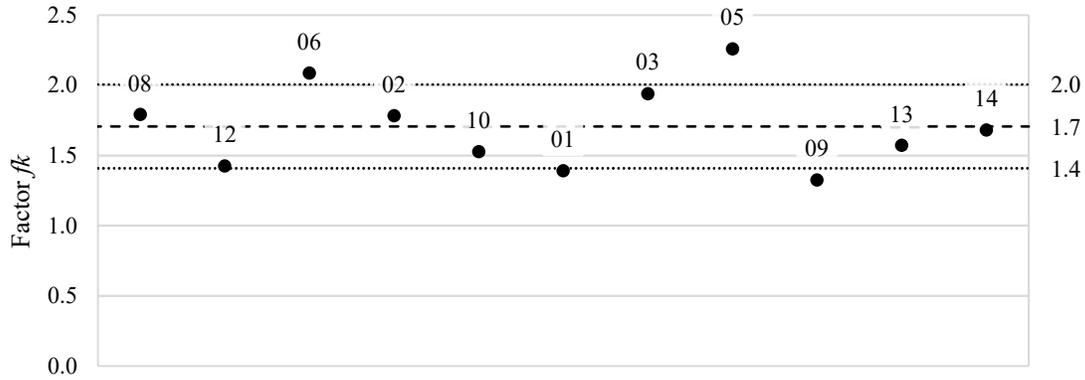


Figura 22. Valores del factor de rigidez equivalente (f_k) por disipador

El método descrito se utilizó nuevamente para analizar la rigidez del dispositivo en la zona de compresión. Este procedimiento se realizó para obtener la relación de rigideces entre compresión y tensión, derivado de las observaciones en las curvas de histéresis donde la pendiente inicial y post - fluencia es superior en compresión. Los datos procesados para todos los dispositivos permitieron construir la gráfica de la Figura 23, en la cual se observa que la rigidez a compresión es en promedio un 30% superior a la de tensión con una variación de un 15%. En general se observa un comportamiento estable entre todos los dispositivos excepto el disipador 13 que es un caso excepcional.

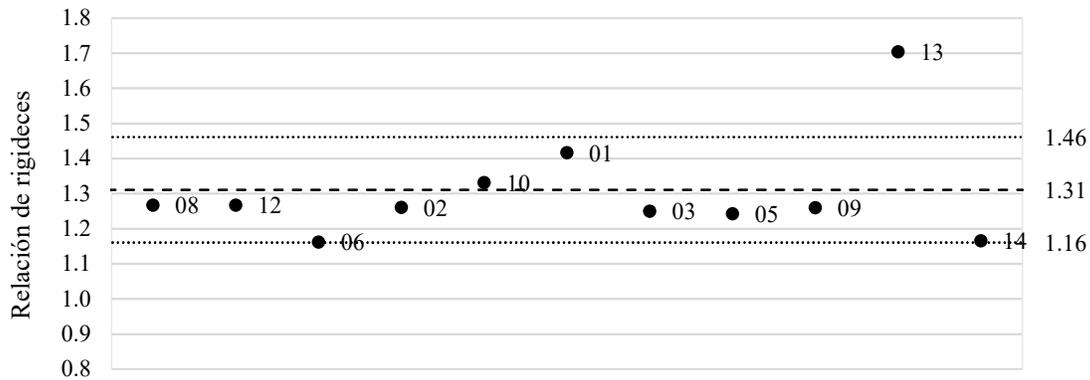


Figura 23. Relación de rigidez entre compresión y tensión en la zona elástica

4.3.3. Factor de longitud

Se define el factor de longitud, f_l , como la relación entre la longitud del núcleo que se deforma plásticamente y la longitud total del núcleo hasta la parte superior de los ganchos de anclaje. Este parámetro permite determinar qué proporción de las barras instaladas en el disipador funciona como núcleo y qué proporción forma parte de las conexiones. La importancia del parámetro radica en que dadas las características del material y la longitud que actúa es posible determinar con mejor aproximación el desplazamiento de fluencia, y con esto, la relación entre distorsiones de entrepiso y ductilidades impuestas a los dispositivos, así como una rigidez teórica del dispositivo.

El factor se calculó utilizando los datos experimentales de los ciclos de deformación elástica para determinar la rigidez del disipador y un análisis teórico de la rigidez de la conexión. El factor se determinó con las relaciones de rigidez mostradas en la ecuación (6) de la cual se despejó el valor de la longitud del núcleo y se dividió entre la longitud L_1 (ver Figura 11) como se muestra en la ecuación (7). Lo anterior considerando que el valor de longitud del núcleo no puede ser mayor a la distancia entre extremos de los ganchos y que la rigidez de las conexiones es positiva. El valor teórico de rigidez en la conexión se obtuvo con un criterio equivalente al mostrado en la Figura 10.

$$\frac{1}{k_{BRB}} = \frac{2}{k_c} + \frac{1}{k_n} \quad (6)$$

$$f_l = \frac{L}{L_1} = \left(\frac{1}{k_{BRB}} - \frac{2}{k_c} \right) * E * A_n \quad (7)$$

donde k_{BRB} es la rigidez efectiva del dispositivo, k_c es la rigidez de la conexión, k_n es la rigidez del núcleo, L_1 es la distancia entre los extremos de los ganchos, E es el módulo de elasticidad del acero y A_n es el área del núcleo.

Los resultados presentados en la Figura 24 muestran que en 7 de los 11 disipadores el factor es menor a uno y se tiene un promedio de 0.85, es decir, que en promedio se deforma inelásticamente el 85% de la longitud instalada. En el análisis a tensión la desviación estándar es de 0.13 o 13% de la longitud instalada.

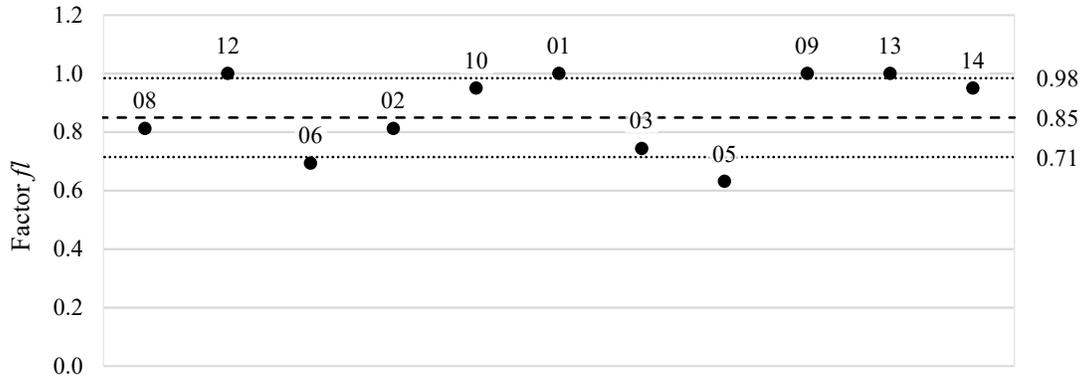


Figura 24. Valores del factor de longitud para comportamiento a tensión

El análisis presentado para la zona de tensión se repitió para los datos correspondientes a la zona de compresión obteniendo los valores de longitud de fluencia promedio en compresión y, posteriormente, el factor de longitud. Los resultados se presentan en la Figura 25 donde se puede observar que, a diferencia del comportamiento a tensión, los 11 disipadores presentan un factor menor a uno y se tiene un promedio de 0.69, es decir, que para los ciclos de compresión aplicado a los disipadores en promedio se deforma inelásticamente solo el 69% de la longitud instalada con una desviación estándar cercana a 0.11.

Si se comparan los resultados entre tensión y compresión, se puede calcular una relación promedio de aproximadamente 1.23, que es similar al valor de relación de rigideces calculado en el inciso 4.3.2. Lo anterior es congruente ya que la rigidez axial está directamente relacionada con la longitud, ambos análisis utilizan la rigidez experimental como variable y el resto de los datos son constantes definidas teóricamente o valores relacionados al material.

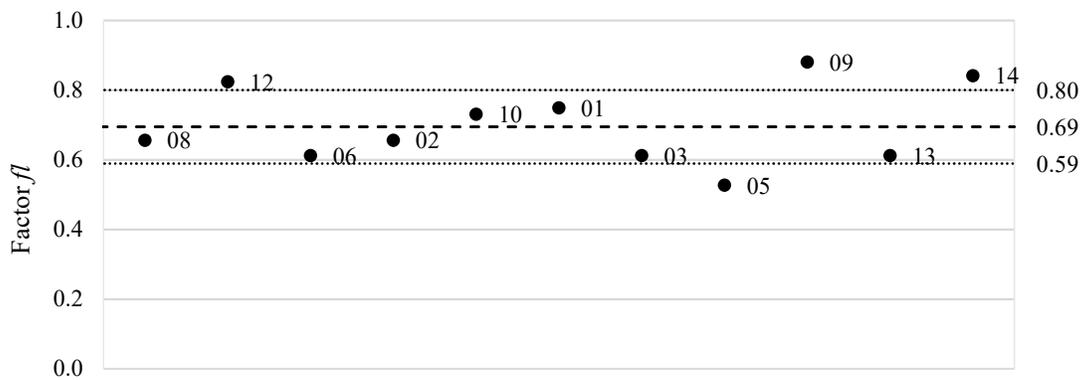


Figura 25. Valores del factor de longitud para comportamiento a compresión

4.3.4. Envoltentes de ciclos histeréticos

Con los datos procesados de las curvas de histéresis, específicamente, la extracción de ciclos individuales, se construyeron las curvas envoltentes del comportamiento de los disipadores, y se unieron los valores límite de cada ciclo para desarrollar una curva de capacidad desplazamiento contra fuerza. De la inspección de esta curva se puede tener una aproximación de la zona de fluencia y las pendientes de sobre-resistencia derivada del endurecimiento por deformación.

De las curvas de cada ciclo de histéresis se extrajeron los datos de carga máxima y el desplazamiento correspondiente tanto para tensión como para compresión. Posteriormente, se promediaron los datos de los ciclos de histéresis de igual desplazamiento máximo y se obtuvo cada punto de la curva final.

Un ejemplo de la construcción de la envolvente a partir de los datos individuales de cada ciclo se presenta en la Figura 26, los datos corresponden al disipador 5, este dispositivo se seleccionó porque se impusieron desplazamientos máximos mayores a 20 mm, los cuales corresponden a ductilidades altas. Lo anterior permite observar en la gráfica un desempeño muy similar al que tendría una barra de acero sometida a cargas cíclicas lo cual tiene coherencia con lo esperado en el diseño de disipador estudiado.

En algunos pares de datos se aprecia un incremento de la fuerza desarrollada por el disipador para un mismo nivel de desplazamiento. Este comportamiento se atribuye al endurecimiento provocado por la acumulación de deformación inelástica. Un fenómeno que es apreciable en el disipador de ejemplo es un incremento pronunciado de la capacidad de carga en compresión, posiblemente derivado de un incremento en la fricción entre la barra sometida a grandes deformaciones y el material desadherente y/o por el efecto de Poisson.

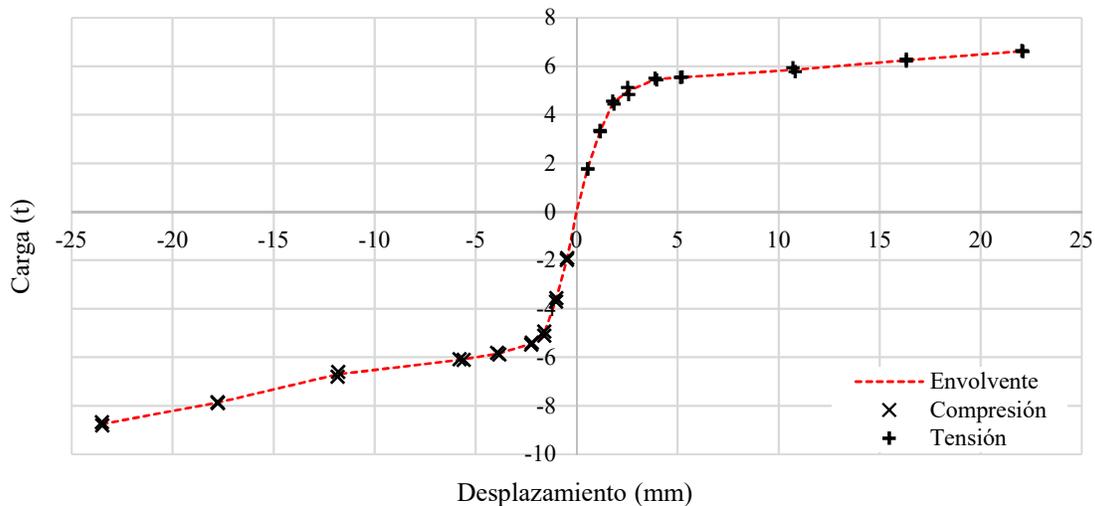
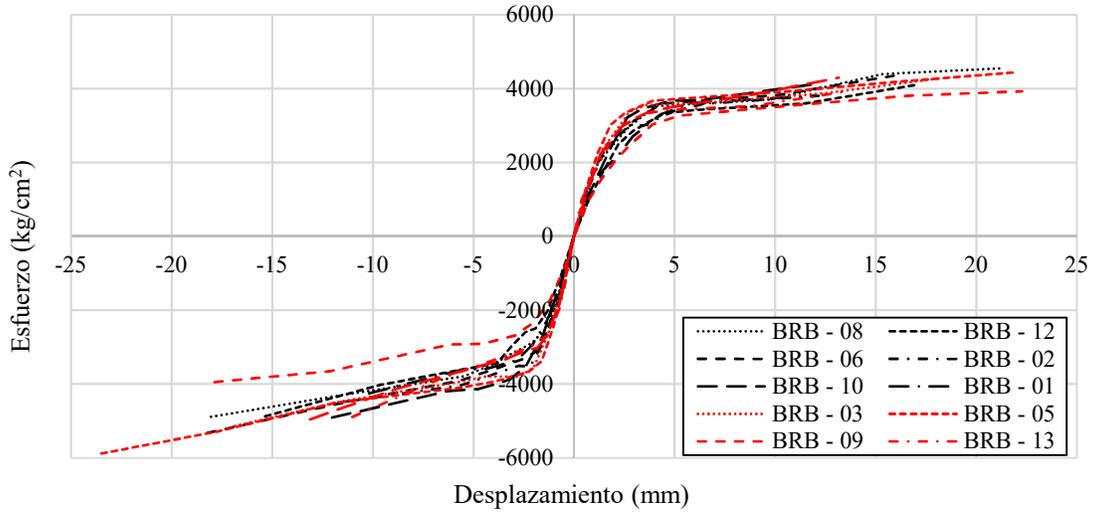


Figura 26. Ajuste de datos para determinar la envolvente de las curvas de histéresis

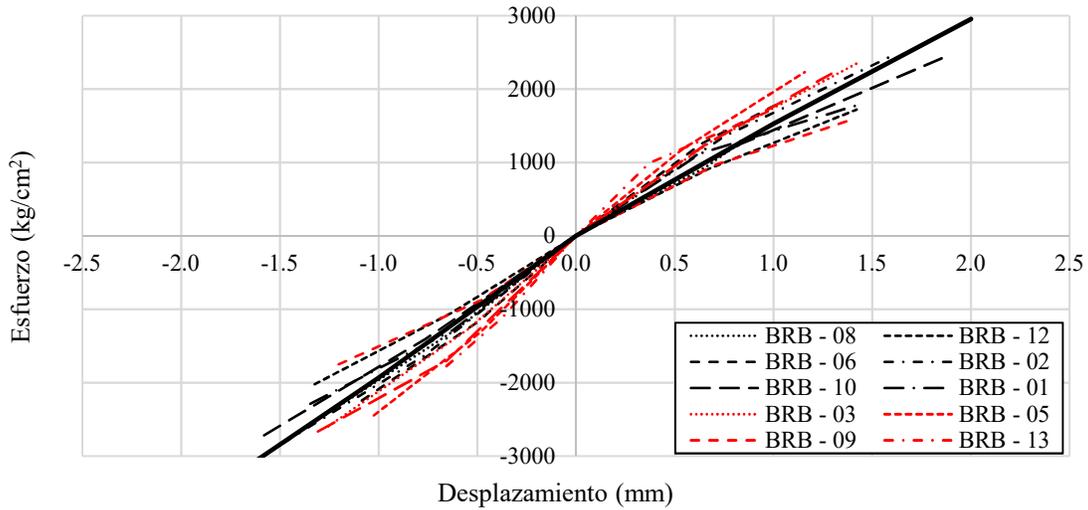
Una vez calculadas las envolventes de todos los disipadores se colocaron en un mismo gráfico para comparar los desempeños y, en consecuencia, la estabilidad en la respuesta del diseño. En consideración de que algunos disipadores tienen un área superior se dividió la fuerza con respecto al área del núcleo y se obtuvieron las gráficas de la Figura 27.

Al analizar la Figura 27a se observa buena estabilidad en el desempeño, ya que es visible una congruencia entre las curvas de los disipadores. La dispersión que se aprecia es más relevante en la zona de fluencia, pero tiende a estabilizarse cuando ya está establecido el comportamiento inelástico. También, se puede apreciar que la inestabilidad de los resultados es mayor para el cuadrante de compresión.

Cabe mencionar que la dispersión de los resultados es congruente con el análisis realizado para el factor de longitud, en el cual se observó que las barras del núcleo se deforman plásticamente en longitudes que varían entre dispositivos, derivando en rigideces iniciales igualmente variables. Lo antes dicho se aprecia con mayor claridad en la Figura 27b que corresponde a la zona de comportamiento elástico. En esta figura se presenta un ajuste de los resultados por mínimos cuadrados con la finalidad de obtener una rigidez promedio y compararla con los datos experimentales.



a) Para desplazamientos mayores al de fluencia



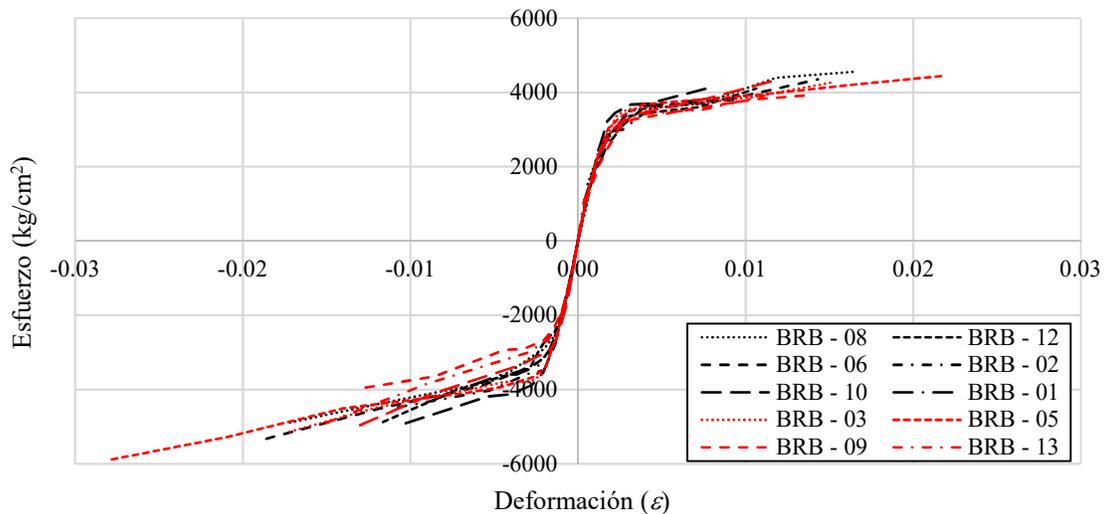
b) Para desplazamientos menores al de fluencia

Figura 27. Curvas de esfuerzo contra desplazamiento acumuladas de todos los disipadores

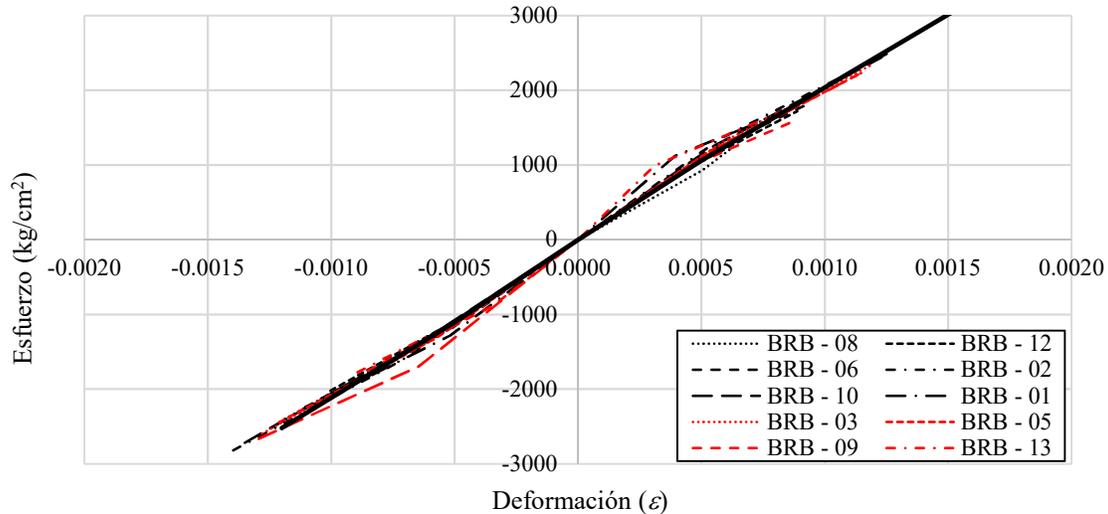
El siguiente paso de análisis realizado consistió en calcular las curvas envolventes en términos de esfuerzo deformación utilizando para este efecto los datos calculados en el inciso 4.3.3 dividiendo el desplazamiento entre la correspondiente longitud actuante tanto para tensión como para compresión. Los resultados del análisis mencionado se presentan en la Figura 28.

Lo primero que se puede apreciar en la Figura 28a es que la dispersión de los resultados se reduce considerablemente para las fuerzas de tensión en la zona post fluencia y se mantiene relativamente igual para las fuerzas de compresión. Por otro lado, en la Figura 28b es muy significativo observar que los datos se ajustan considerablemente entre ellos, reduciendo casi en su totalidad la dispersión que se observaba claramente en la Figura 27b. Este fenómeno de ajuste que se observa puede sugerir la validez en el análisis realizado para determinar la longitud del núcleo que se comporta inelásticamente.

Nuevamente se agrega en la Figura 28b un ajuste de los datos por mínimos cuadrados y se observa que representa con mejor precisión a la mayoría de los datos. Cabe destacar que en el cálculo de las curvas esfuerzo-deformación la recta que ajusta los resultados en la zona de comportamiento elástico tiene un valor de pendiente muy cercano al módulo de elasticidad del acero, esto es congruente dado que el análisis se desarrolla en la zona de comportamiento elástico donde las deformaciones son pequeñas. Por lo tanto, no se perciben otros fenómenos como la interacción en la zona de anclaje, la penetración de fluencia o la fricción en la zona restringida al pandeo.



a) Con deformaciones inelásticas



a) Solo deformaciones elásticas

Figura 28. Curvas de esfuerzo deformación acumuladas de todos los disipadores

4.3.5. Análisis de parámetros de fluencia del disipador

Los parámetros más importantes para idealizar el comportamiento de los disipadores son el desplazamiento y la fuerza de fluencia. Dichos parámetros se pueden aproximar analizando la curva envolvente de ciclos histeréticos o curva de capacidad del disipador. Sin embargo, como se puede apreciar en las figuras de la sección 4.3.4, las transiciones del comportamiento elástico al inelástico se definen por una región suavizada. Dado lo anterior, no es posible identificar con precisión los parámetros de fluencia.

Para solucionar el problema, se utilizó una metodología de análisis a la curva de capacidad descrita en FEMA 356 (2000) en la sección 3.3.3.2.4 “Idealized Force-Displacement Curve”. El método consiste en un proceso iterativo para idealizar la curva de capacidad a un comportamiento bilineal equivalente de tal forma que el área bajo la curva de ambos comportamientos sea igual. La primera recta toma como rigidez inicial la pendiente de una línea secante que cruce la curva de capacidad en un valor de fuerza igual al 60% de la fuerza de fluencia efectiva propuesta para la curva bilineal, y como rigidez post fluencia la pendiente de una recta que cruce la curva experimental en el punto del desplazamiento objetivo del disipador. El desplazamiento objetivo utilizado para el análisis fue el correspondiente a una ductilidad aproximada de 4 que equivale al ciclo 14 de desplazamiento en el protocolo estándar, este valor es el máximo común a todos los disipadores.

Un ejemplo de aplicación del procedimiento se presenta en la Figura 29. En este ejemplo, se indica con una línea roja horizontal el punto donde se cruzan las curvas y que corresponde al 60% de la fuerza de fluencia efectiva (0.6 PY). El valor del desplazamiento de fluencia se indica con una línea roja vertical que inicia en la fuerza de fluencia efectiva y se proyecta en el eje horizontal (Dy). También se aprecia el punto donde terminan la curva idealizada y la real, que es común a ambas y corresponde al desplazamiento objetivo. El proceso iterativo se realizó hasta obtener un error en la determinación del área menor al 0.1%.

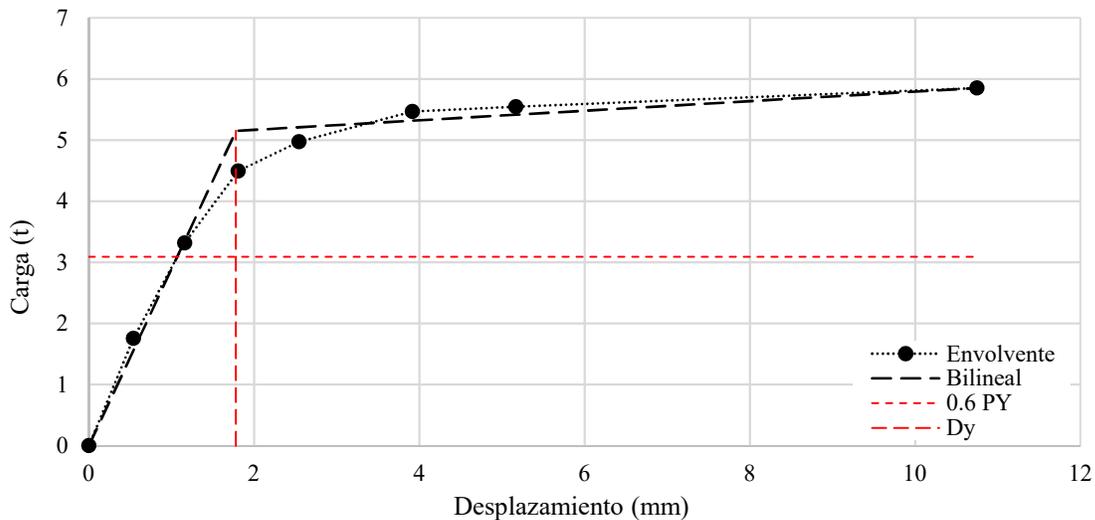


Figura 29. Ejemplo de aplicación del procedimiento incluido en (FEMA 356, 2000)

Una vez aplicado el procedimiento a todos los disipadores se presentan en la Figura 30 los resultados obtenidos. De dichos resultados se determinó el valor promedio de la curva bilineal que se presenta en la Figura 31 junto con las curvas de una desviación estándar por arriba y por debajo.

En las figuras 30 y 31 se puede observar que la idealización de las curvas tiene un comportamiento similar en todos los disipadores, teniendo una mayor variabilidad en el desplazamiento de fluencia que en la fuerza de fluencia. Lo anterior es congruente con el funcionamiento del disipador ya que la fuerza depende primordialmente del área y el desplazamiento de la longitud del núcleo que se deforma plásticamente. Por otro lado, se observa que la variabilidad de los resultados se reduce en la rama de comportamiento inelástico.

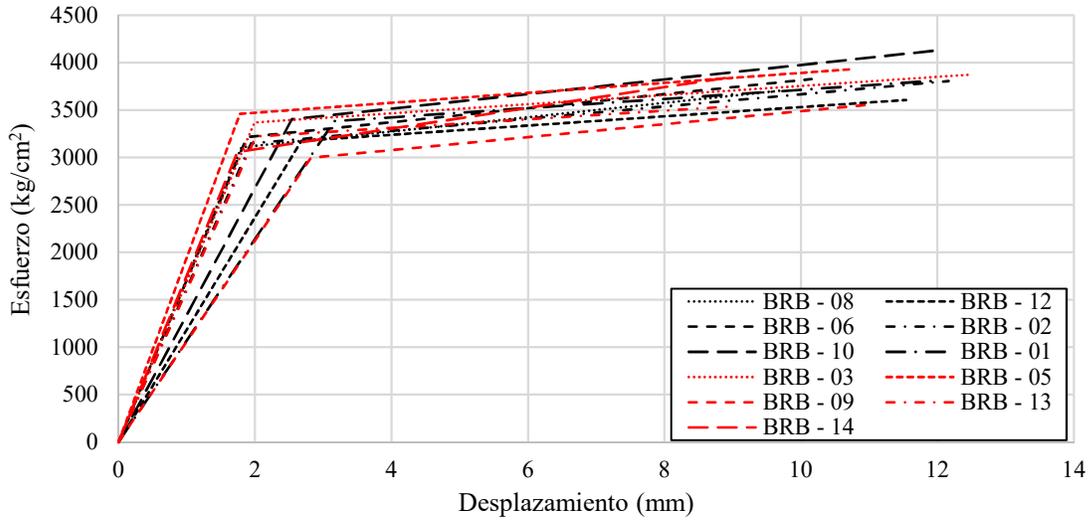


Figura 30. Curvas bilineales idealizadas para todos los disipadores

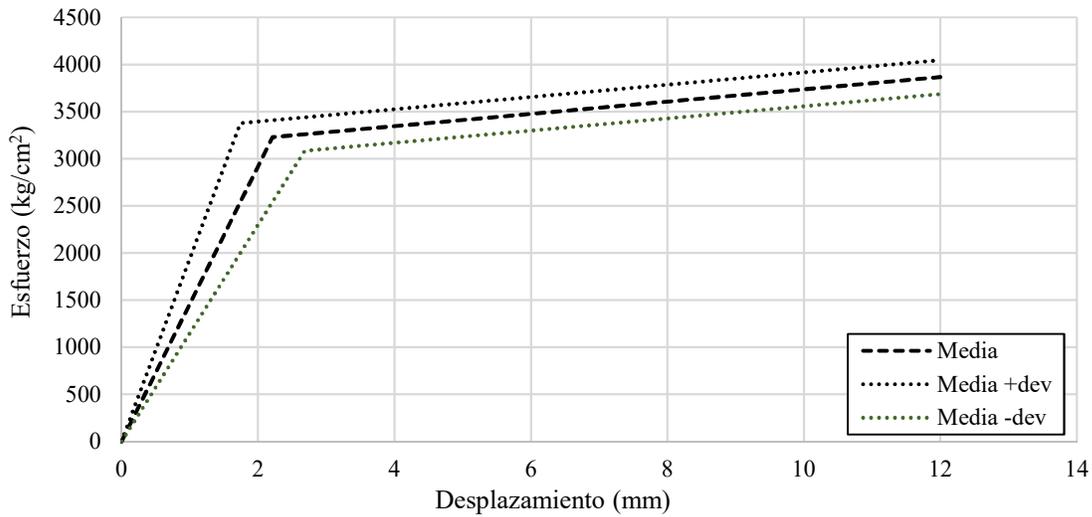


Figura 31. Valor promedio y envolventes de las curvas bilineales idealizadas

En la Tabla 8 se enlistan los valores de las tres curvas representadas en la Figura 31, cada una de las curvas se pueden definir por tres puntos de esfuerzo y desplazamiento; el origen; el cambio de pendiente, que corresponde al inicio de la fluencia; y el desplazamiento objetivo definido en el análisis. En la tabla se presentan los valores de los puntos descritos previamente, se ordenan en columnas de desplazamiento y esfuerzo para cada curva, cada fila corresponde con un punto que define la curva y están ordenados de forma ascendente. Si se analiza la dispersión de los valores en la tabla, se observa una diferencia de hasta 22% en el desplazamiento de fluencia y solo 4.5% para la fuerza de fluencia.

Tabla 8. Valores de fuerza y desplazamiento para curvas bilineales promedio

Media		Media + desviación estándar		Media - desviación estándar	
Desplazamiento	Esfuerzo	Desplazamiento	Esfuerzo	Desplazamiento	Esfuerzo
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.2	3230.7	1.7	3377.2	2.7	3084.2
12.0	3866.4	12.0	4045.6	12.0	3687.2

Adicional a las representaciones de resultados previamente expuestas, también se realizaron graficas con los valores de fluencia de cada disipador y se trazaron rectas con los valores promedio más menos una desviación estándar. La Figura 32a muestra los resultados correspondientes al esfuerzo de fluencia, se puede observar que todos los disipadores tienen valores por debajo del esfuerzo de fluencia $f_y = 3565 \text{ kg/cm}^2$ obtenido de pruebas monotónicas. También se aprecia que solo tres disipadores tienen valores fuera de una desviación estándar y solo dos son cercanos a la media.

La Figura 32b presenta los valores de desplazamiento de fluencia, se puede apreciar que todos los valores se dispersan alrededor de la media sin que ningún disipador tenga un valor cercano o igual a la misma. En este análisis los disipadores 1 y 9 son los que se alejan más de una desviación estándar de la media, estos dispositivos son los que cuentan con más de una barra en el núcleo y como se comentó previamente sus curvas de capacidad tienen una transición más suavizada entre la zona elástica y la plástica.

En la Figura 33 se muestra la deformación unitaria de fluencia calculada con los datos obtenidos en la sección 4.3.3. Se puede observar que la dispersión de los resultados se reduce con respecto a lo presentado en el desplazamiento de fluencia, se puede apreciar en la figura que la mayoría de los disipadores se aproximan a la media, con lo cual la desviación estándar baja de 22% para el desplazamiento de fluencia a un 10% para la deformación unitaria. Sin embargo, también se puede apreciar que los disipadores con valores extremos se alejan a más de dos desviaciones estándar de la media.

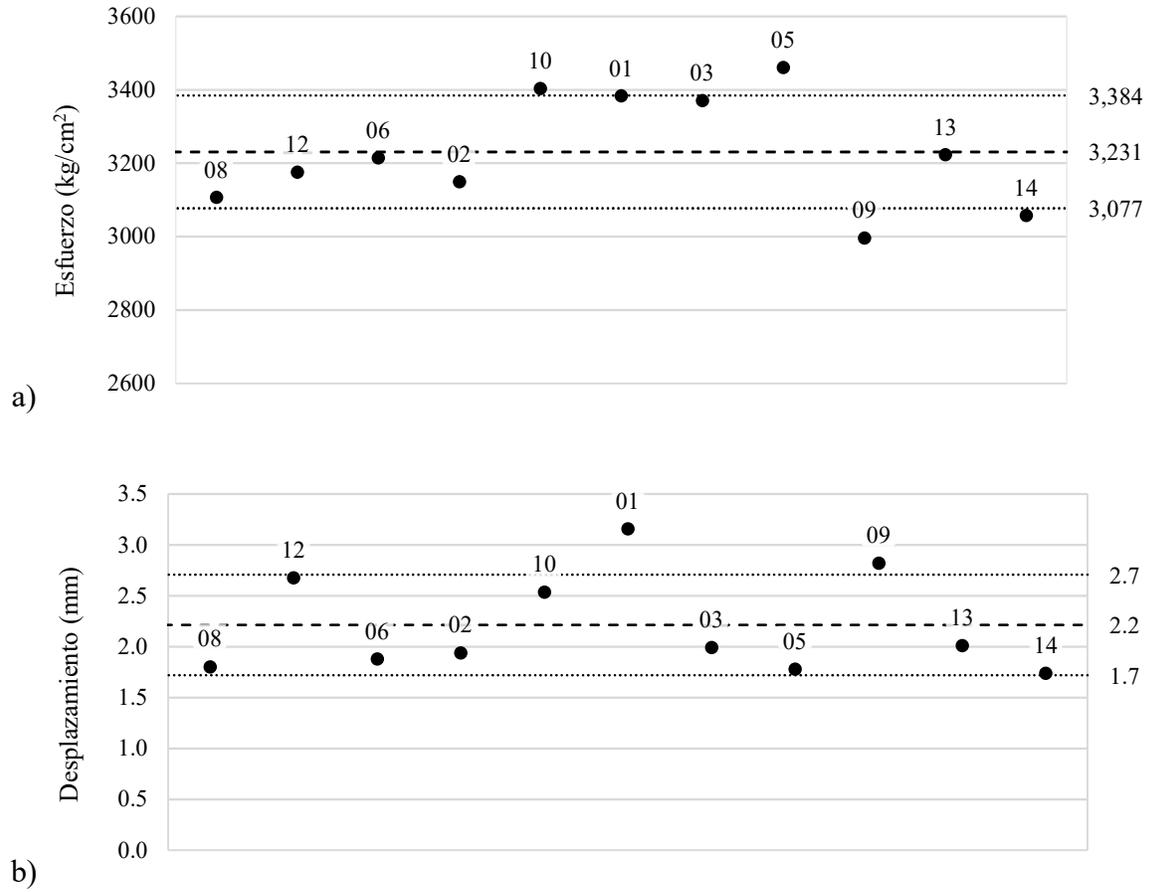


Figura 32. Esfuerzo y desplazamiento de fluencia en tensión por cada disipador

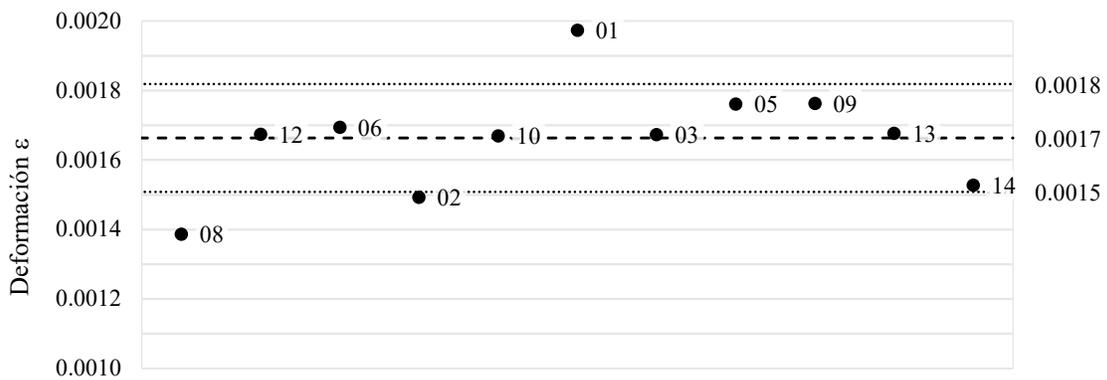


Figura 33. Deformación unitaria de fluencia por cada disipador

4.3.6. Factores de sobre resistencia a tensión y compresión

Para realizar diseños estructurales que incluyan disipadores de energía sísmica, como los estudiados en esta investigación, es necesario conocer dos parámetros importantes: el factor de ajuste para la resistencia a tensión (ω) y el factor de ajuste para la resistencia a la compresión (β). Estos parámetros nos permitirán conocer el nivel de resistencia última esperada en el disipador para un nivel de ductilidad de diseño, que en el contexto de un diseño por desempeño permite garantizar la fluencia de los disipadores antes que la estructura de soporte o sus conexiones.

El factor de ajuste de resistencia a tensión, ω , de acuerdo con AISC 341 (2016) se define como el cociente entre la máxima fuerza a tensión (T_{max}) registrada en el protocolo estándar para la deformación de diseño objetivo entre la fuerza de fluencia del núcleo (P_{yrm} .)

$$\omega = \frac{T_{max}}{P_{yrm}} \quad (8)$$

Con los datos obtenidos de las pruebas de protocolo estándar se calculó el factor ω para cada ciclo de carga, considerando el valor máximo de fuerza en tensión registrado y dividiendo entre la fuerza de fluencia. Dicha fuerza de fluencia es la que se obtuvo del análisis realizado en la sección 4.3.5. Con los resultados, se construyeron gráficas de ω contra ductilidad y se ajustaron los datos a rectas antes y después del punto de fluencia, lo anterior permitió determinar el valor de ω para niveles de ductilidad específicos.

En la Figura 34 se presenta un ejemplo de los pasos descritos previamente. Los valores calculados de ω para cada ciclo se presentan como datos puntuales, utilizando una cruz para valores antes de la fluencia y una “x” para valores después de la fluencia. El ajuste de los datos a rectas se presenta con líneas punteadas y se identifica con líneas rojas discontinuas la determinación de ω para una ductilidad, $\eta = 4$, dicho valor de ω se utilizará posteriormente.

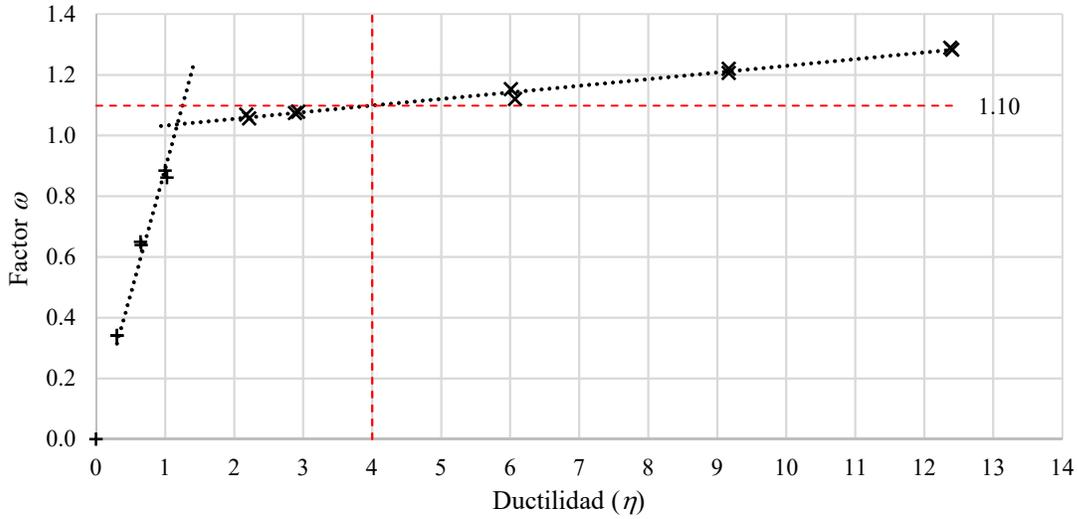


Figura 34. Ajuste de datos por disipador y determinación de ω para $\eta = 4$

Se analizaron los datos obtenidos de todos los disipadores de forma global para revisar su comportamiento y determinar una recta que represente la variación del factor para ductilidades mayores a 2, este análisis se presenta en la Figura 35 en la cual se puede observar una clara tendencia de comportamiento en todos los disipadores, con una dispersión baja en la zona de comportamiento elástico que se incrementa a medida que crece la ductilidad.

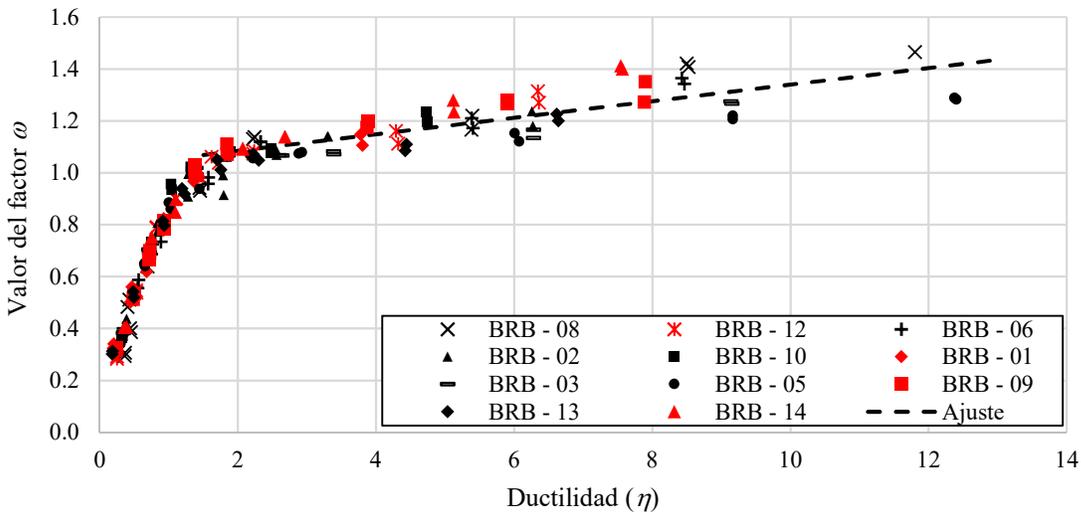


Figura 35. Datos del factor ω para todos los disipadores y ajuste de resultados

La ecuación (9) corresponde a la recta ajustada por mínimos cuadrados que se mostró en la Figura 35, con esta ecuación es posible obtener el valor de ω para cualquier ductilidad de diseño propuesta.

$$\omega = 0.032 * \eta + 1.02 \quad (9)$$

En particular, se calcularon los valores de ω para $\eta = 4$ para todos los disipadores (ver Figura 36). Los valores mostrados corresponden al ajuste de curva realizado de forma individual para los disipadores con el método descrito previamente. Se puede observar que el valor promedio de ω es 1.14 que es muy similar al que se obtiene utilizando la ecuación (9). El valor de ductilidad seleccionado para la construcción de la gráfica se relaciona con el mayor valor de ductilidad que es común a todos los disipadores y se considera útil para fines comparativos.

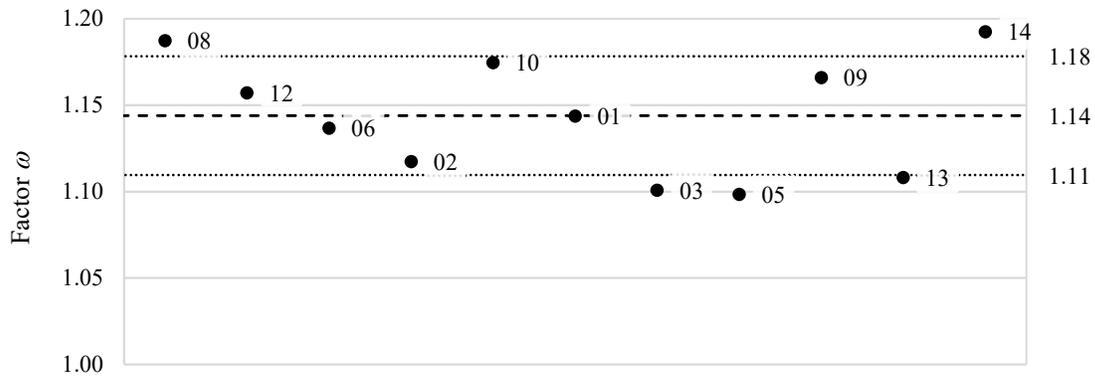


Figura 36. Valor del factor de sobre resistencia a tensión, ω para $\eta=4$, por cada disipador

El factor de ajuste de resistencia a compresión, β , de acuerdo con AISC 341 (2016) se define como el cociente entre la máxima fuerza a compresión (P_{max}) entre la máxima fuerza a tensión (T_{max}), ambas registradas en el protocolo estándar para la misma deformación de diseño.

$$\beta = \frac{P_{max}}{T_{max}} \quad (10)$$

Revisando los resultados experimentales se pudo comprobar que, en algunas pruebas, los ciclos de carga no alcanzaron la misma magnitud de desplazamiento para tensión que para compresión. Dado lo anterior, se generaban valores inconsistentes del factor β si se utilizaba la información de los ciclos de carga sin procesar. Por lo tanto, se adoptó un método de cálculo que consistió en utilizar las curvas envolventes de los ciclos calculadas en la sección 4.3.4 y realizar interpolaciones lineales para los desplazamientos en tensión que lo requieran. El método se aplicó para todos los desplazamientos en tensión de los ciclos de carga en el protocolo estándar.

El primer paso del método consistió en identificar el valor de desplazamiento a tensión y buscar entre los desplazamientos a compresión un intervalo donde se pueda interpolar. Posteriormente, se realizó una interpolación lineal entre los datos para obtener el valor de fuerza de compresión que correspondería al desplazamiento identificado y, finalmente, se obtiene el factor β como se indica en la ecuación (10).

En la Figura 37 se esquematiza el procedimiento descrito, en la cual se muestran líneas para ejemplificar el análisis realizado a un punto de desplazamiento en tensión. Se observa que se utiliza la misma magnitud de desplazamiento en la zona de compresión y se proyecta una línea hacia la envolvente. Posteriormente se identifican los valores de desplazamiento cercanos y se interpola linealmente entre ellos para obtener la fuerza correspondiente.

Los resultados obtenidos para todos los disipadores con todos los niveles de ductilidad que le corresponde a cada uno se presentan en la Figura 38, en la cual se aprecia que existe una gran dispersión entre los resultados del factor y que es difícil identificar tendencias claras. Sin embargo, si se analizan las regiones a ambos lados de la ductilidad igual a 2.0 se pueden definir dos tendencias de comportamiento.

Cabe destacar que para ductilidades menores a 2.0 en la Figura 38 se pueden observar cinco valores menores a la unidad que en su mayoría corresponden al dissipador compuesto por tres barras cuadradas. Se infiere que estos valores son consecuencia de la interacción de las barras entre sí y con el mortero, así como una probable diferencia en la longitud actuante de cada barra por falta de precisión en la fabricación, provocando que se esfuercen de forma distinta para un mismo desplazamiento. El fenómeno expuesto es crítico en la región donde se inicia la fluencia dado que los valores previos y posteriores son similares a los otros dissipadores.

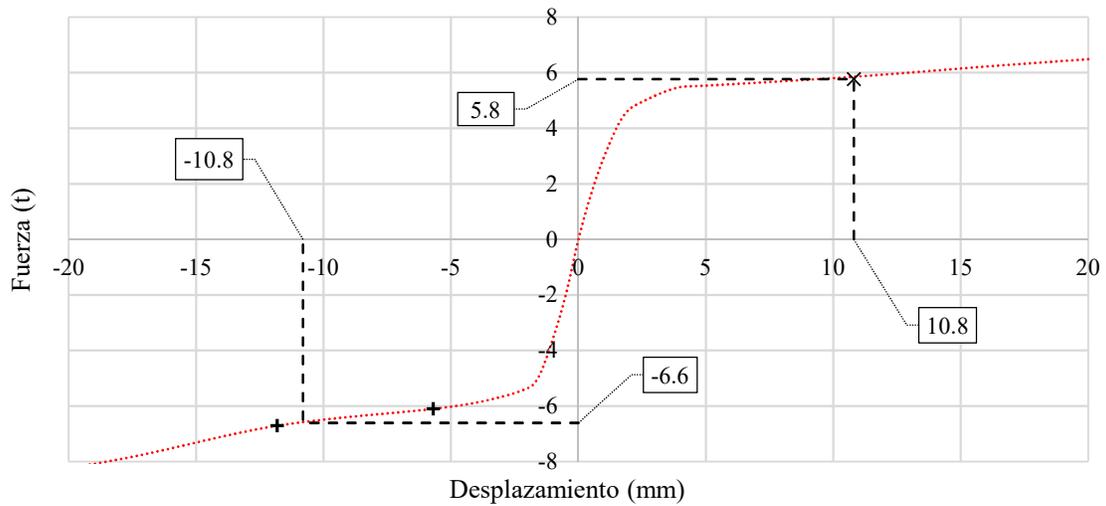


Figura 37. Ejemplo del proceso de determinación del factor β

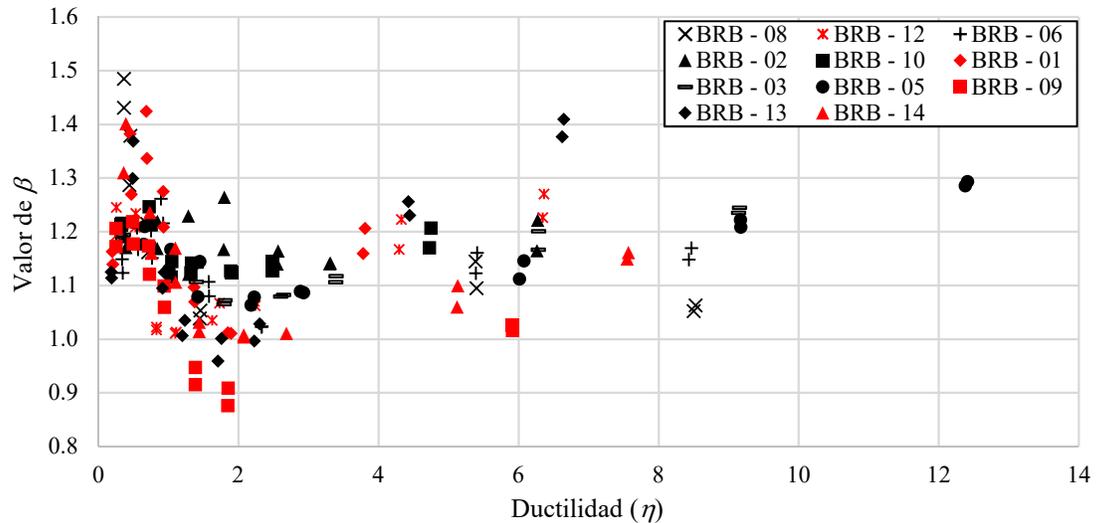


Figura 38. Factor β calculado para todos los dissipadores

Posteriormente, se realizó un análisis del factor separando los resultados de acuerdo con el material desadherente considerando valores de ductilidad mayor a 2, con estos datos separados se ajustaron los datos a rectas de tendencia, dichos ajustes se presentan en las figuras 39 y 40. Analizando las gráficas, lo primero que se destaca es la diferencia notable en la dispersión de los resultados. Mientras que con el material de polipropileno hay una gran variabilidad de los resultados; los disipadores con caucho muestran una tendencia clara de relación lineal entre el factor de sobre resistencia y la ductilidad impuesta.

Cabe mencionar que el comportamiento deseable de un disipador es que las fuerzas a compresión sean lo más parecidas a las fuerzas de tensión, esto garantiza un desempeño similar de las estructuras en cualquier dirección que sea demandada por fuerzas sísmicas. Lo anterior significa que la magnitud del factor β debería ser lo más cercano a uno. En las figuras 39 y 40 se puede ver que los disipadores con polipropileno tienen valores muy cercanos a uno para ductilidades bajas, sin embargo, el factor se incrementa muy rápido a mayor ductilidad. Por otro lado, los disipadores con caucho inician con un valor cercano a 1.1 pero la tendencia de crecimiento es mucho menor, mejorando así el comportamiento del disipador.

Se infiere que la diferencia de comportamiento entre materiales se relaciona principalmente con la densidad y el grosor de cada material. El polipropileno utilizado al estar espumado presenta una gran cantidad de vacíos lo que le permite ser muy compresible, además tiene un grosor nominal de 3 mm lo cual incrementa la distancia entre la barra y el mortero de confinamiento. Por su parte, el caucho utilizado es más denso, pero con una gran capacidad de deformación elástica, además, tiene un grosor mucho menor y cuenta con una mayor resistencia al desgaste.

Una posible explicación a los fenómenos observados es que las deformaciones provocadas por los pandeos en modos superiores, al interior del confinamiento contra pando, fueron más grandes en los disipadores con polipropileno. Lo anterior, provoca un mayor comportamiento de puntal de la barra deformada contra el mortero generando un desgaste rápido del material desadherente. Se puede inferir que utilizar materiales más densos, pero altamente deformables, mejora el desempeño en compresión del disipador a pesar de tener un mayor coeficiente de fricción entre el caucho y el acero. Una posible mejora sería reducir este coeficiente con lubricantes adicionales.

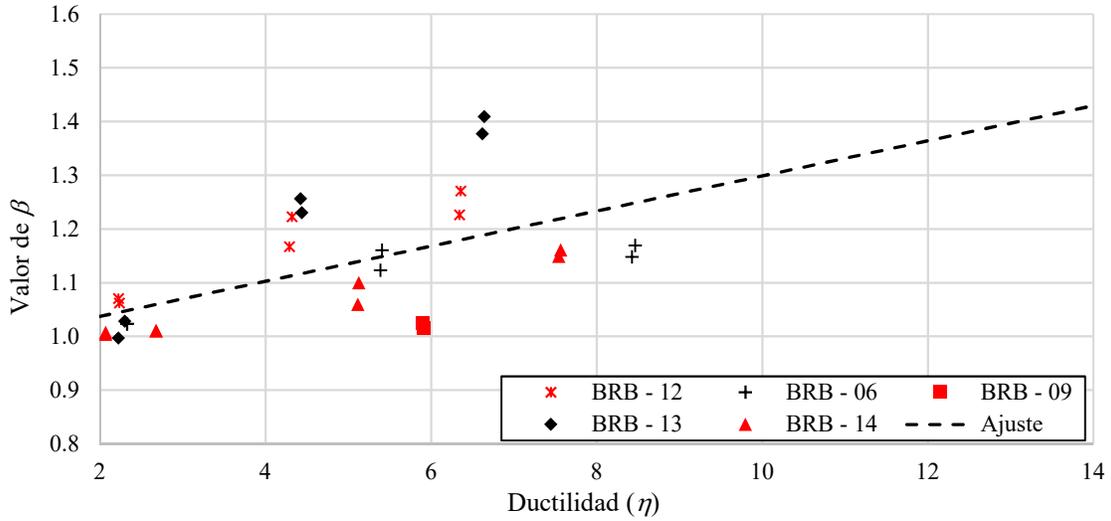


Figura 39. Factor β para disipadores con material de polipropileno como desadherente

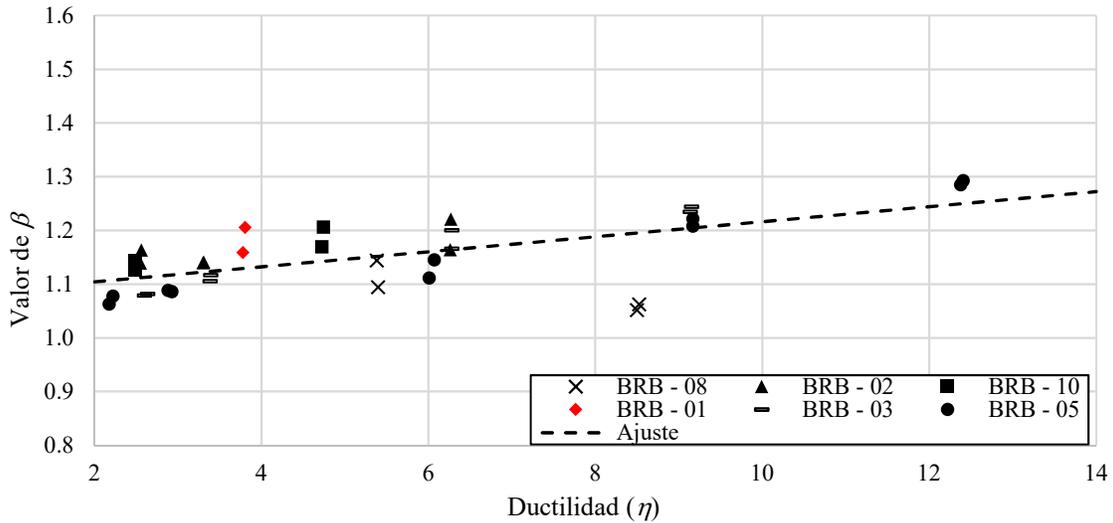


Figura 40. Factor β para disipadores con material de caucho como desadherente

A continuación se presentan las ecuaciones (11) y (12) que corresponden a las rectas ajustadas por mínimos cuadrados que se mostraron en las figuras 39 y 40, respectivamente, con estas ecuaciones es posible obtener el valor de β para cualquier ductilidad de diseño propuesta.

$$\beta = 0.033 * \eta + 0.97 \tag{11}$$

$$\beta = 0.014 * \eta + 1.076 \tag{12}$$

4.3.7. Cálculo de energía histerética

Para el cálculo de la energía histerética desarrollada por los dispositivos se realizó la integral numérica de las curvas fuerza - desplazamiento experimentales, calculando el área inscrita en los ciclos de carga. El cálculo se realizó usando la ecuación (13), considerando todos los incrementos de desplazamiento registrados durante la prueba, con esto se obtuvieron curvas continuas con pendiente positiva con respecto al tiempo. La magnitud de la pendiente depende de la velocidad de la prueba y la cantidad de energía disipada. Y esta última es función de la ductilidad máxima impuesta y del área del núcleo.

$$E = \sum \frac{(F_i + F_{i-1})}{2} * (u_i - u_{i-1}) \quad (13)$$

Los datos del sistema de adquisición se convirtieron al sistema internacional de unidades para determinar la energía en Joules y se dividió la energía con respecto al área del núcleo para hacer comparables los resultados entre disipadores. En la Figura 41 se presentan las curvas de energía acumulada de cada disipador hasta la falla de todas las barras en el núcleo.

Se puede observar que, al inicio del protocolo estándar, la tendencia en las curvas es muy similar en todos los disipadores. Posteriormente se aprecia una dispersión en las pendientes de las curvas provocado por la variación de los desplazamientos de fluencia, la magnitud de los deslizamientos aparentes comentados en la sección 4.3.1 y los desplazamientos efectivamente impuestos que dependen del arreglo experimental.

Por otro lado, en la mayoría de las curvas es posible observar un cambio brusco de pendiente que corresponde a la aplicación del protocolo de fatiga, el cual se efectuó diez veces más rápido que el protocolo estándar. El lugar donde cambia la pendiente está relacionado con la ductilidad máxima que se impuso en el protocolo estándar a partir del cual inició el protocolo de fatiga. La magnitud de las pendientes es función del desempeño de cada disipador y los desplazamientos impuestos, estos últimos corresponden a un nivel de fatiga objetivo.

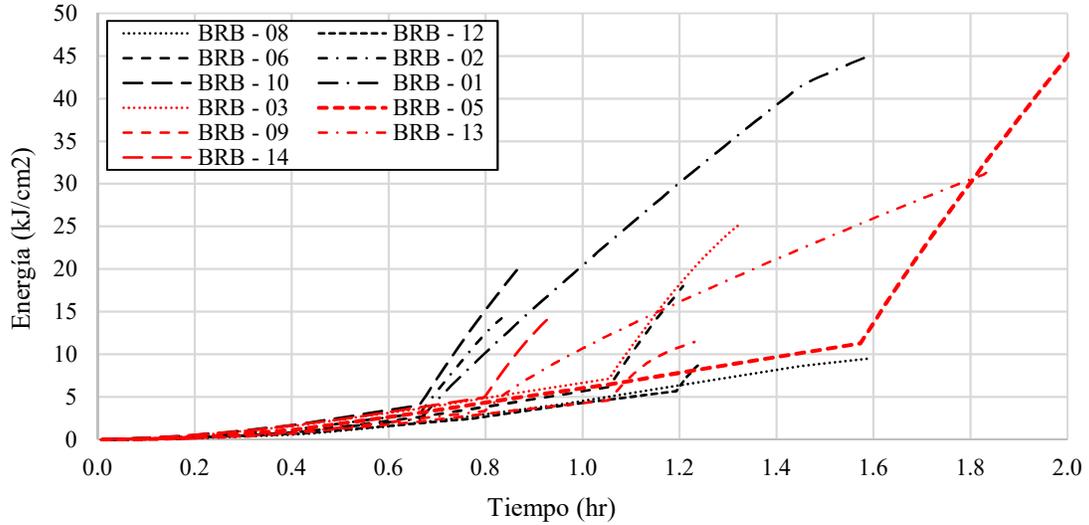


Figura 41. Energía histerética acumulada con respecto al tiempo por cada disipador

La energía total disipada es un parámetro que permite caracterizar el diseño del disipador en términos de durabilidad, así como realizar comparaciones entre dispositivos con respecto a su resistencia última y al desempeño durante la prueba. La Figura 42 presenta los resultados de energía máxima disipada por dispositivo y el valor promedio más menos una desviación estándar. En la gráfica se puede observar con mayor claridad que la energía total disipada es muy dispersa con respecto a la media. Al calcular la desviación estándar se observa que su valor corresponde casi al 50% de la media. Al relacionar los resultados con las características físicas de los disipadores, se puede inferir que la energía máxima disipada por unidad de área es independiente del número de barras en el núcleo y de la longitud del disipador.

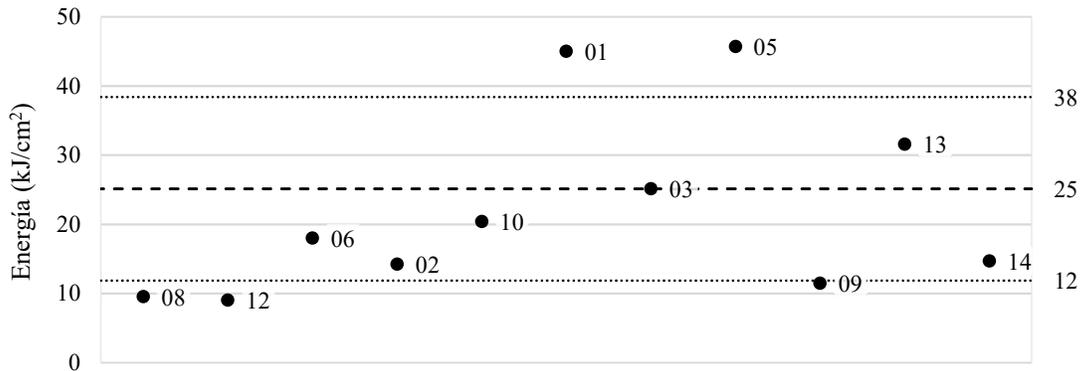


Figura 42. Energía total disipada por cada dispositivo

Un fenómeno que sí se puede relacionar con la capacidad de disipación es el pandeo localizado de la barra, el cual se presentó en el espacio sin restricción identificado en la Figura 3 como D1, el cual está relleno con poliestireno expandido. En las revisiones realizadas al finalizar las pruebas se observó el pandeo en el mismo lugar en todos los disipadores a excepción de uno, dicho pandeo se evidenciaba por la superficie de la falla y el estado final de la barra.

El fenómeno de pandeo depende en principio de la separación D1, pero se incrementa por un mecanismo que inicia con la fractura del mortero en la interfaz con el poliestireno provocada por desplazamiento lateral de la barra, la pérdida de mortero reduce la restricción e incrementa la longitud libre de la barra, promoviendo un desplazamiento lateral mayor que fractura otra sección de mortero hasta que la barra pandeo localmente y reduce la fuerza lateral hacia el mortero. El mecanismo descrito promueve una falla prematura a la que se obtendría por fatiga de la barra ante cargas axiales o derivada de los pandeos en modos superiores. En la Figura 43 se presentan fotografías de barras con pandeo local, en la separación D1, y el daño en la superficie del mortero al finalizar las pruebas.



Figura 43. Fotografías de barras al finalizar las pruebas

4.3.8. Análisis de ductilidad acumulada

La demanda de ductilidad acumulada es un parámetro útil para determinar la capacidad de un disipador, su ventaja es que es adimensional y se relaciona con desplazamientos demandados a los disipadores. Los resultados de análisis dinámicos paso a paso se pueden comparar con la capacidad del disipador y así evaluar su seguridad. El parámetro se calcula sumando las deformaciones plásticas desarrolladas en los ciclos de histéresis. En la presente investigación se utilizó la metodología descrita en Merritt et al. (2003) la cual parte de un análisis geométrico de los ciclos de histéresis que permite calcular la deformación plástica a partir de la energía desarrollada.

Para ejemplificar el método se debe considerar el i -ésimo ciclo de histéresis que se presenta en la Figura 44, en la cual se presenta la respuesta idealizada del ciclo de histéresis como curvas bilineales que forman una figura cuadrangular. Tomando la zona de cargas de tensión de dicha idealización, se puede obtener la deformación axial inelástica acumulada, Δ_{pi}^+ , si se considera que la energía del semi-ciclo, E_{hi}^+ , que corresponde al área, se puede aproximar como $E_{hi}^+ = \Delta_{pi}^+ * P_y^+$, siendo la última variable la fuerza efectiva de fluencia en el ciclo.

El análisis se repite en la zona de fuerzas a compresión y se suman los resultados para obtener la deformación inelástica total del ciclo, la cual también se puede obtener de forma aproximada considerando el área total del ciclo, E_{hi} , y dividiéndola entre P_y^* que es el valor promedio de las fuerzas efectivas de fluencia a tensión y compresión durante las pruebas.

Este análisis se condensa en la ecuación (14) y es válida para todos los ciclos de histéresis, para obtener la ductilidad acumulada total que desarrolla el disipador, es necesario realizar una sumatoria como se indica en la ecuación (15), en la cual, se incluye una última simplificación del cálculo de ductilidad acumulada que implica dividir el área total de todos los ciclos de histéresis entre la fuerza efectiva de fluencia promedio.

Finalmente, el valor de la deformación acumulada total se puede normalizar con el desplazamiento de fluencia calculado en la sección 4.3.5 para tener el resultado en términos de ductilidad como se muestra en la ecuación (16).

$$\Delta_{pi} = \Delta_{pi}^+ + \Delta_{pi}^- = \frac{E_{hi}^+}{P_y^+} + \frac{E_{hi}^-}{P_y^-} \approx \frac{E_{hi}}{P_y^*} \text{ con: } P_y^* = \omega^* P_{yn} \quad (14)$$

$$\Delta_p = \sum \Delta_{pi} = \sum \frac{E_{hi}}{P_y^*} = \frac{E_h}{P_y^*} \quad (15)$$

donde Δ_{pi} es la deformación axial acumulada, P_y^+ y P_y^- son las fuerzas efectivas de fluencia en tensión y compresión, E_{hi} es la energía histerética disipada, P_y^* es la fuerza efectiva de fluencia promedio, ω^* es el factor de sobre-resistencia a tensión para $\eta = 4$ cuyos resultados se muestran en la Figura 36 y P_{yn} es la fuerza de fluencia calculada en la sección 4.3.5, Δ_p es la deformación axial acumulada total desarrollada por el disipador y E_h la energía disipada total desarrollada por el disipador.

$$\eta = \frac{\Delta_p}{D_{by}} = \frac{E_h}{P_y^* \cdot D_{by}} \quad (16)$$

donde: η es la ductilidad acumulada total y D_{by} es el desplazamiento de fluencia del disipador.

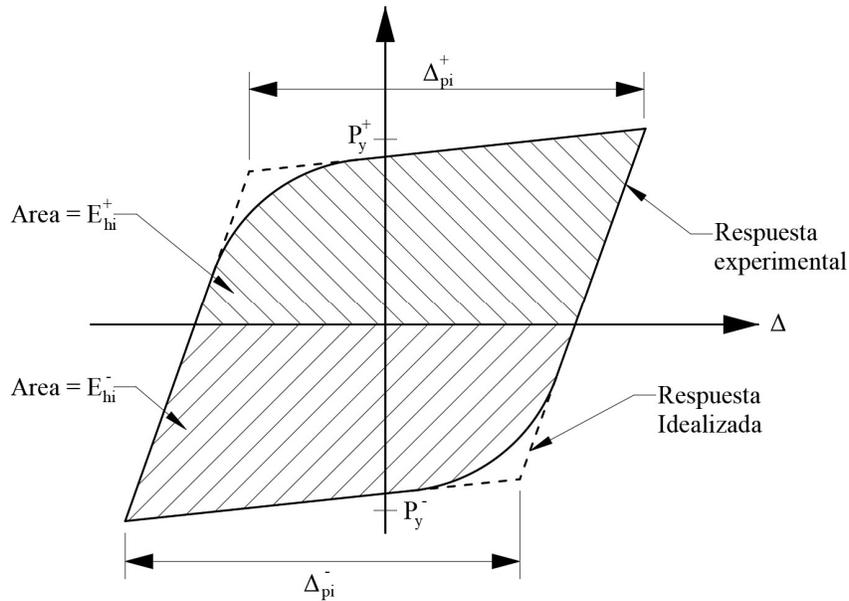


Figura 44. Análisis geométrico de deformaciones plásticas, (adaptado de Merritt, et al., 2003)

El procedimiento descrito se realizó a todos los disipadores y se construyó la gráfica de la Figura 45 donde se presentan los resultados de ductilidad acumulada de cada disipador hasta la falla de todas las barras. Una ventaja adicional de utilizar el parámetro de ductilidad acumulada es que se puede contrastar los resultados con los criterios del código AISC 341 (2016) que establece criterios para evaluar un diseño de disipador para utilizarse en estructuras reales.

En la Figura 45 se observa una tendencia similar en todos los disipadores al inicio del protocolo estándar, como se observó en el análisis de energía acumulada (ver Figura 41). Esto es congruente dada la relación directa entre los análisis de ductilidad y energía acumulada. Sin embargo, la dispersión de las pendientes se incrementa visiblemente en etapas posteriores. Dicha dispersión es resultado de incluir la variabilidad de los desplazamientos de fluencia, los factores de sobre-resistencia y las fuerzas de fluencia. El mismo efecto sucede con los resultados de los ciclos de fatiga, que en su mayoría presenta una clara variación en las pendientes.

Otro aspecto para destacar en comparación con el análisis de energía acumulada es la posición relativa entre los valores máximos. Tomando como ejemplo los disipadores 1 y 5 se observó que disipan la misma cantidad de energía, sin embargo, la ductilidad acumulada calculada en el disipador 1 es alrededor del 50% de la calculada en el 5. Este efecto se observa en todos los disipadores con una rigidez inicial entre un 20 a 25% inferior a la media. En el caso de los dispositivos 1 y 9, con dos y tres barras respectivamente, se observó que la transición de respuesta elástica a inelástica es más suavizada que en los disipadores de una barra y por tanto se reduce su rigidez inicial. Se infiere que lo anterior es provocado por la interacción entre barras y la posible diferencia en los desplazamientos de fluencia de sus barras individuales.

Como información adicional, en la Figura 45 se incluye una recta en el valor de ductilidad acumulada de 200, el cual, es el mínimo requerido por el código AISC 341 (2016) para pruebas uniaxiales en disipadores tipo BRB, que no forman parte de un subensamble con conexiones a un marco estructural. Como se puede observar, la mayoría de los disipadores cumplen con el requisito a excepción de los disipadores 8 y 12 que tuvieron una longitud sin restringir (D1) de 5 cm y el disipador 9 que cuenta con tres barras en el núcleo, y que no tuvo un comportamiento adecuado en los ciclos de ductilidad mayor a 4.

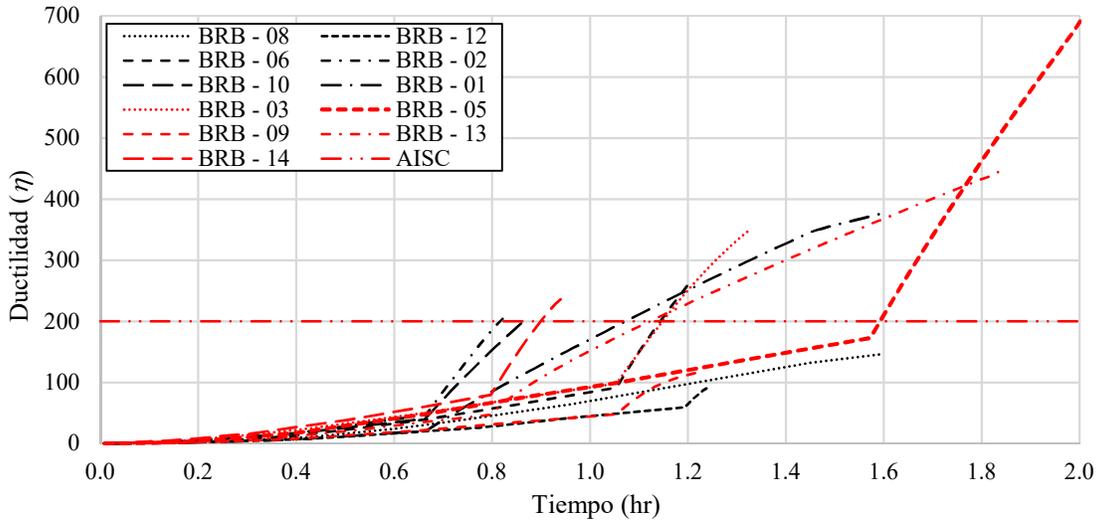


Figura 45. Curvas de ductilidad acumulada

Al igual que con la energía disipada, la ductilidad acumulada es un parámetro que sirve para evaluar el desempeño de los disipadores. En este caso, se evalúa la capacidad para admitir deformaciones inelásticas antes de presentar la falla. En la Figura 46 se presentan los resultados de ductilidad acumulada máxima por dispositivo, así como el valor promedio más menos una desviación estándar. Como se comentó previamente la capacidad mínima requerida para que un disipador sea aceptado es de 200 veces el desplazamiento de fluencia, en la gráfica se observan con claridad los tres disipadores que no cumplen el requisito (8, 12 y 9). Nuevamente se observa una gran dispersión de los resultados como sucedió con los datos de energía acumulada.

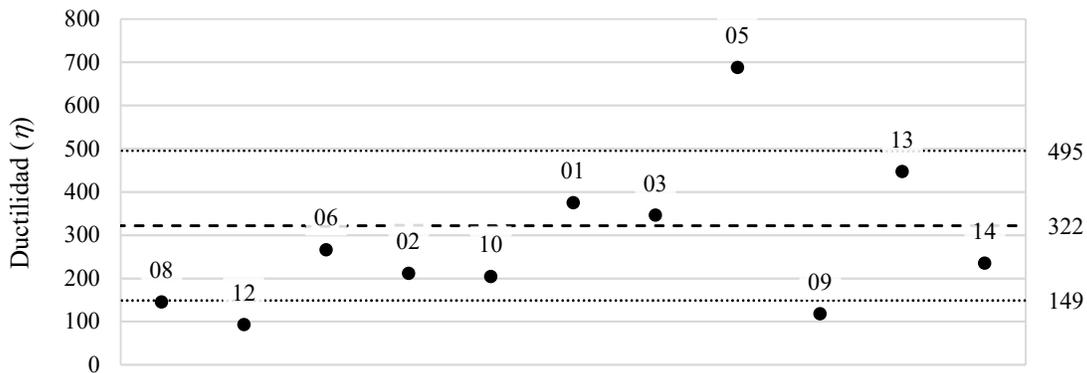


Figura 46. Ductilidad acumulada total desarrollada por cada dispositivo

En la Figura 47 se presentan los resultados del análisis de ductilidad realizado al disipador 5. Se compara la ductilidad acumulada de un ciclo de desplazamientos contra la ductilidad máxima impuesta en dicho ciclo. De la gráfica se destaca que a ductilidades menores a 8 el comportamiento es estable ante la repetición de ciclos, recordando que para cada nivel de ductilidad se aplicaron dos ciclos. En una ductilidad de 9 se presenta una variación entre ciclos probablemente por algún daño repentino que redujo la energía disipada. En la parte final de la curva se observa que la ductilidad acumulada se reduce con la repetición de ciclos de misma ductilidad, esto se debe a la degradación del dispositivo que reduce la energía disipada y, por consiguiente, la ductilidad acumulada de cada ciclo.

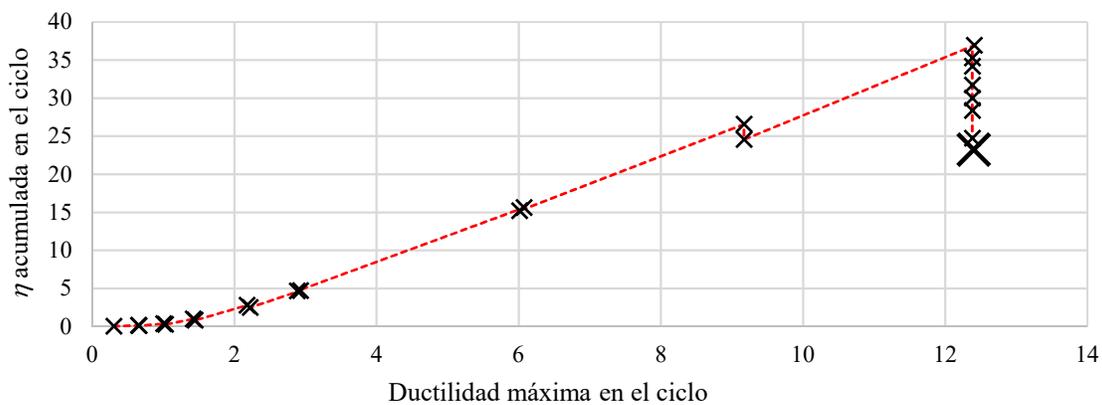


Figura 47. Ductilidad acumulada en el ciclo contra ductilidad máxima impuesta en un ciclo para el disipador 5

4.3.9. Probabilidad de falla vs ductilidad acumulada

En las secciones anteriores se observó una gran variabilidad en la capacidad de los disipadores ensayados. Esto en términos de ductilidad acumulada y energía disipada. Dado lo anterior, se decidió realizar un proceso de ajuste de resultados con una distribución de probabilidad, esto con el objetivo de tener herramientas para evaluar el riesgo de falla ante una demanda de ductilidad acumulada. Dicha demanda puede producirse por un evento sísmico intenso o por varios sismos de mediana intensidad, en ambos casos se debe evaluar la resistencia y durabilidad del disipador y, en su caso, programar el mantenimiento o la sustitución de dispositivos.

Para realizar el ajuste se exploraron algunas distribuciones de probabilidad y se compararon los resultados para varios niveles de ductilidad. También se analizó el ajuste de los datos experimentales con la distribución calculando el error cuadrático medio. Finalmente, se utilizó la distribución lognormal porque los resultados siempre son positivos y por presentar el menor error de ajuste.

Para hacer un análisis comparativo de los resultados, se crearon grupos de disipadores a partir de características comunes y se calcularon las curvas de distribución de probabilidad de cada uno. Lo anterior, con el objetivo de analizar la influencia de las condiciones de carga y las características físicas en la probabilidad de falla. Los grupos se detallan en la Tabla 9, donde se enlista una letra que identifica al grupo, los disipadores que conforman el grupo y las características que tienen en común los disipadores.

Tabla 9. Grupos de disipadores utilizados para ajustar curvas de probabilidad

Grupo	Disipadores	Características
A	1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 14	Todos los disipadores ensayados
B	1, 2, 10	Ensayados con una ductilidad máxima de 4
C	3, 6, 12, 13, 14	Ensayados con una ductilidad máxima de 6
D	5, 8, 9	Ensayados con una ductilidad máxima de 8
E	1, 2, 3, 5, 6, 10, 13, 14	Se excluyen los disipadores con menor desempeño, el 8 y 12 que tenían una distancia $D1=5$ cm y el disipador 9 que presentó pandeo en los PTR

En la Figura 48 se presentan las curvas de probabilidad de los grupos A, B, C y D, el objetivo es analizar la probabilidad de falla con respecto a la demanda máxima de ductilidad. Analizando las curvas se puede observar que a menor demanda máxima la probabilidad de

falla es menor. Sin embargo, esta relación solo es válida cuando la demanda de ductilidad acumulada es menor a 280, para valores por arriba de dicho valor la relación se invierte, es decir, a menor demanda máxima mayor probabilidad de falla.

El comportamiento descrito en el párrafo anterior se debe a que los disipadores del grupo B, ensayados con una ductilidad máxima de 4, tienen un intervalo de capacidades muy pequeño. Por su parte los disipadores del grupo D, ensayados a ductilidad máxima de 8, incluyen el valor máximo de capacidad y uno de los mínimos del total de los disipadores. También se infiere que las tendencias observadas están influenciadas por el número de datos analizados, ya que los grupos B y D solo cuentan con tres valores para ajustar la curva, por lo tanto, es deseable contar con un mayor número de pruebas para correlacionar la falla con una demanda máxima de ductilidad.

Cabe destacar que la distribución del grupo C, ensayados a ductilidad máxima de 6, es muy similar al grupo A. Se infiere que lo anterior se relaciona con el número de datos del grupo C que es más del 50% de la muestra total. En la figura también se incluye una recta que indica la demanda de ductilidad acumulada en un disipador, provocada por la acción de un sismo intenso en una estructura equipada con los disipadores estudiados. El análisis para obtener la demanda se detalla en la sección 4.3.11. Se puede observar que para todas las curvas de probabilidad la demanda presentada tiene una probabilidad de falla menor al 3%.

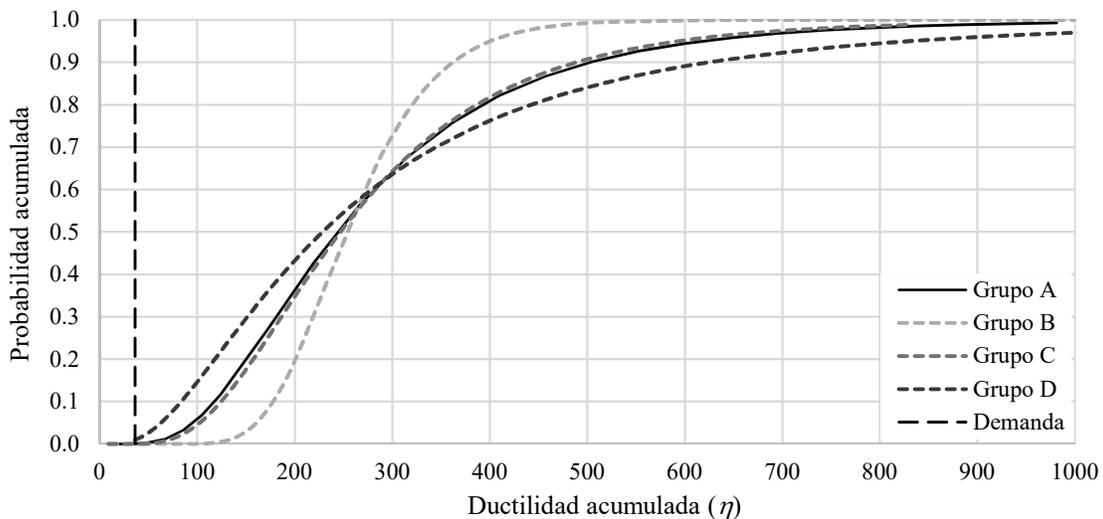


Figura 48. Distribución de probabilidad de falla contra ductilidad acumulada

En la Figura 49 se presentan las curvas de los grupos A y E, los datos experimentales de acuerdo con su frecuencia de ocurrencia y una recta con el valor mínimo de ductilidad acumulada recomendada por el AISC 341 (2016) para pruebas uniaxiales.

De la muestra del grupo A cabe destacar, que algunos disipadores tienen características adversas al desempeño como la distancia $D1 = 5$ cm (ver Figura 3) o poco recubrimiento de mortero como sucedió en el disipador 9. Estas condiciones podrían considerarse similares a los errores constructivos que pueden suceder en ambientes de fabricación no controlados. Por su parte, el grupo E excluye a los disipadores con condiciones adversas, en ese sentido dicho grupo podría considerarse similar a un proceso de fabricación con supervisión adecuada.

Las similitudes planteadas son relevantes porque en la Figura 49, al comparar las curvas, se observa que existe una reducción sustancial en la probabilidad de falla en el grupo E con respecto al grupo A. Tomando como ejemplo la recta con valor de ductilidad acumulada de 200, valor recomendado por AISC 341 (2016), se observa que la probabilidad se reduce de 38% a solo 10% mejorando considerablemente la confiabilidad en el diseño de disipador.

Lo anterior significa, que si la fabricación de los disipadores tiene un mínimo de supervisión o acompañamiento técnico se obtiene un mejor desempeño y por consecuencia un riesgo de falla menor. Sin embargo, es relevante recordar que, para demandas de ductilidad producidas por sismos intensos, como la presentada en la figura y que se analiza en la sección 4.3.11, la probabilidad de falla es menor al 1% para cualquier condición de fabricación. Cabe aclarar que la demanda mostrada puede incrementarse en diseños estructurales distintos al analizado.

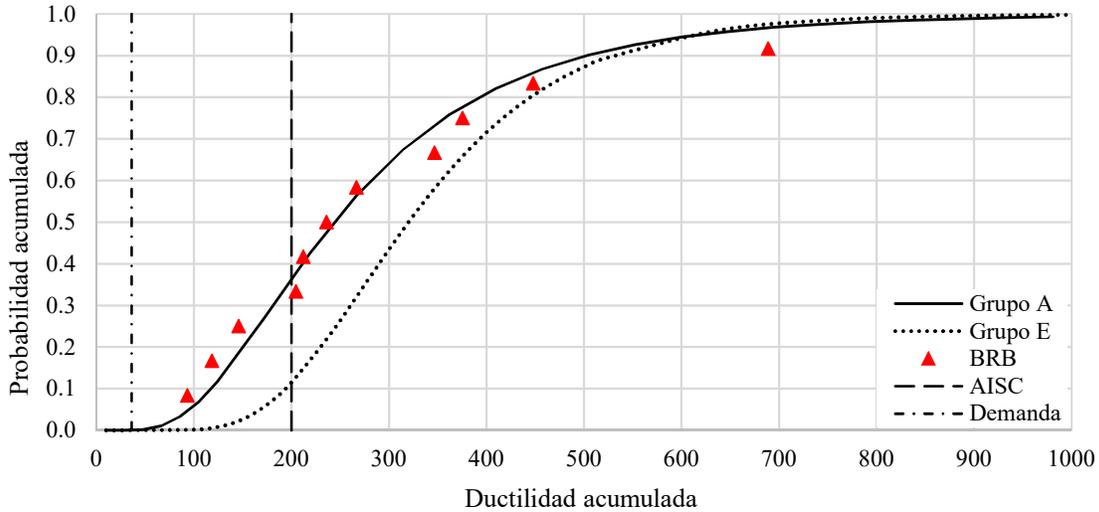


Figura 49. Distribución de probabilidad de falla contra ductilidad acumulada

Como se mencionó previamente, la Figura 49 también incluye los valores de ductilidad acumulada observados en los dispositivos experimentales, en la figura se presentan como valores puntuales en forma de triángulo. La probabilidad acumulada que se asignó a cada ductilidad observada se calculó ordenando los resultados de menor a mayor y asignándoles una frecuencia acumulada con la ecuación (17). Con el método descrito es posible representar los datos observados e inspeccionar gráficamente el ajuste con la distribución de probabilidad.

$$f_a = \frac{i}{n+1} \quad (17)$$

donde: f_a es la frecuencia acumulada, i es el número de muestra y n es el número total de muestras.

4.3.10. Calibración de modelos numéricos con experimentales

Los modelos numéricos permiten simular el desempeño de materiales simples o reforzados y sistemas estructurales ante acción es externas. Dicha simulación tiene como objetivo predecir el comportamiento de estructuras complejas a través de determinar el comportamiento de sus elementos constitutivos. Existen en la literatura una gran cantidad de modelos constitutivos con varios niveles de complejidad, tanto en su aplicación como en los parámetros requeridos. Teóricamente, entre más parámetros requiere un modelo, mejor debe ser la aproximación al comportamiento real del elemento que se modela. Sin embargo, en la misma medida que se mejora la precisión también se incrementa la demanda computacional.

Los modelos precisos tienen mayor relevancia cuando se realizan diseños por desempeño y análisis no lineales, los cuales buscan determinar la resistencia última de las estructuras o incorporar disipadores de energía sísmica. Cabe recordar que en el caso de los disipadores estudiados en este trabajo sus beneficios al desempeño estructural provienen precisamente de su comportamiento no lineal. Para la presente investigación se analiza el uso de un modelo sencillo para simular el comportamiento de los disipadores. Se utilizó el modelo plástico de Wen (1976) que puede representar materiales isotrópicos con rigidez post-fluencia y con transiciones suavizadas entre la zona elástica y la plástica. El ajuste de dichas transiciones puede simular el efecto Bauschinger presente en el acero ante cargas cíclicas. Una ventaja del modelo seleccionado es que se encuentra disponible en programas de análisis estructural comerciales.

Se realizó un análisis comparativo entre el modelo y los datos del disipador 5 por lo que se utilizaron los valores específicos de dicho disipador en lugar de los valores promedio. Para la rigidez del dispositivo se promedió la rigidez de tensión y compresión ya que el modelo sólo admite un valor, la relación de rigidez entre estado elástico y plástico fue 0.027 y la fuerza de fluencia fue de 5151 kg. El exponente de fluencia, que define la transición, se definió realizando iteraciones e inspeccionando el ajuste con las curvas de histéresis experimentales. El ajuste se verificó para las deformaciones inelásticas y el intervalo elástico. Finalmente, se definió el exponente como 0.5 y el resultado se presenta en la Figura 50. Cabe mencionar que en el modelo se utilizaron los datos de desplazamiento registrados durante la prueba en lugar del protocolo objetivo ya que existen algunas diferencias generadas por el arreglo experimental.

En la figura se puede observar que en lo general la tendencia de comportamiento es similar en ambas curvas, principalmente en las ramas de descarga donde las líneas se empalman en más del 50% de su longitud. Sin embargo, existen algunas diferencias.

La primera diferencia se observa cuando la fuerza cambia de dirección. La curva experimental presenta un deslizamiento que la separa de la teórica a pesar de que la transición es muy suave. Esto implica un incremento en la energía disipada por el modelo numérico. Otra diferencia se observa en los valores máximos de fuerza a compresión con diferencias de hasta el 20% en los desplazamientos máximos, este efecto contrasta con las fuerzas máximas a tensión donde los valores son similares para desplazamientos mayores a 5 mm. Finalmente, se observa una variación de las fuerzas máximas en los ciclos elásticos y los primeros ciclos inelásticos, tanto en tensión como en compresión.

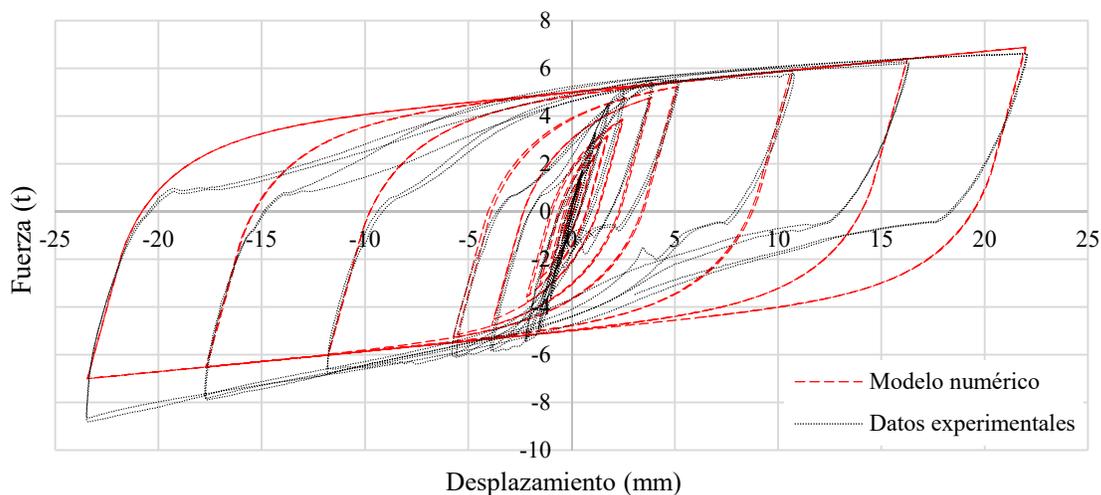


Figura 50. Curvas de histéresis experimental y numérica

Todas las variaciones expuestas pueden generar imprecisiones en el análisis de resistencia de los elementos conectados a los disipadores y en la respuesta ante cargas cíclicas, esta última afectada principalmente por la diferencia de fuerzas entre tensión y compresión que no se representan adecuadamente en el modelo numérico.

Para revisar las implicaciones de estas variaciones se realizó el análisis presentado en la Figura 51. En el cual se compara la ductilidad acumulada y se observa un comportamiento muy similar durante el protocolo estándar. La diferencia al final de dicho protocolo es de apenas el 12% pero con una capacidad de ductilidad acumulada de 200, que es muy superior

a la demanda de un sismo intenso como se presenta en la sección 4.3.11. En la zona de fatiga es más apreciable la diferencia llegando hasta un 25% en la parte final. Esto se debe principalmente a que el modelo numérico no considera la degradación del dispositivo ante ciclos continuos.

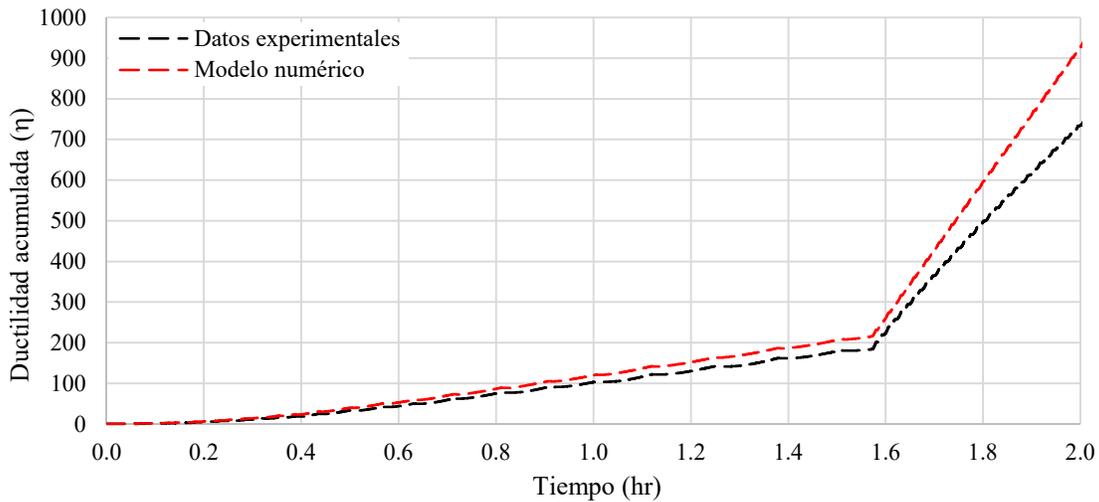


Figura 51. Ductilidad acumulada experimental y numérica

Finalmente, se puede concluir que existen ventajas en usar el modelo presentado, entre ellas: 1) su sencillez; 2) que está disponible en programas comerciales; 3) que la energía disipada es muy similar; y 4) en lo general, modela adecuadamente el comportamiento. Sin embargo, existen diferencias en fuerzas que puedan intervenir en el diseño de otros elementos estructurales, será entonces criterio del diseñador revisar el diseño de las conexiones y otros elementos estructurales ante incrementos de carga por compresión de los disipadores.

4.3.11. Resiliencia ante eventos sísmicos

Se evaluó la capacidad de los disipadores estudiados para soportar sismos intensos cuando se instalan en una estructura. La evaluación consiste en comparar las demandas de ductilidad acumulada y ductilidad máxima contra la capacidad promedio de los disipadores. Para determinar demandas de ductilidad se analizaron las curvas de histéresis desarrolladas en tres estudios, en cada estudio la estructura se sometió al registro sísmico del 19 de septiembre de 2017 de la estación Culhuacán dirección Este – Oeste.

Para el primer análisis se utilizaron los datos de carga y desplazamiento desarrollados en los disipadores durante la investigación “Simulación híbrida de una estructura equipada con disipadores tipo BRB” realizada por Sánchez Arriaga (2019) para su tesis de maestría. Un esquema general de la estructura modelada se presenta en la Figura 52 y en esta se indica la ubicación de los tres disipadores ensayados. En esta investigación el registro sísmico se utilizó con tres intensidades, 100%, 150% y 200%.

El segundo análisis se realizó con los datos de un ejercicio numérico realizado por Sánchez Arriaga (2019) en la misma estructura de la Figura 52 y con las mismas intensidades en el registro sísmico. A diferencia del primer análisis, la respuesta de los disipadores se obtuvo con un modelo numérico, el cual se calibró con los valores de rigidez equivalente y los factores de sobre-resistencia a tensión y compresión obtenidos en esta investigación. El área del núcleo en cada disipador corresponde a las necesidades de la estructura modelada.

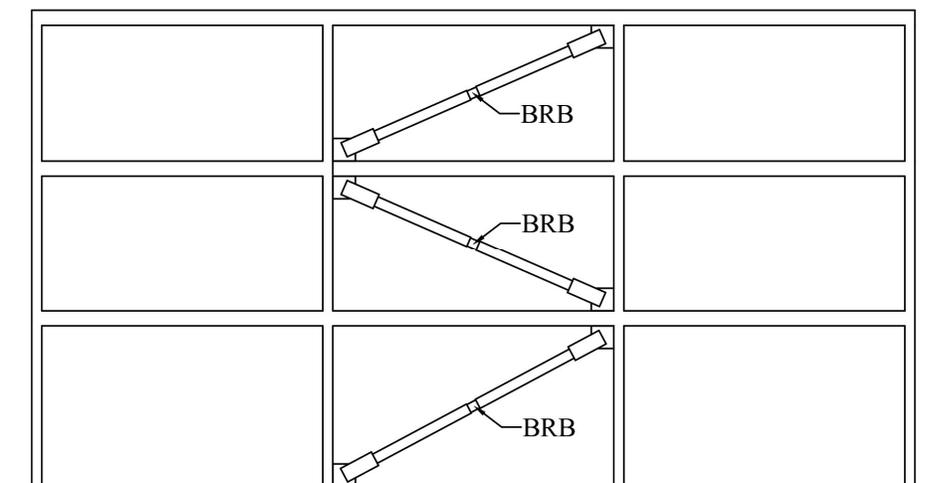


Figura 52. Esquema general de la estructura analizada con simulación híbrida

El tercer análisis se realizó a partir de un estudio numérico simplificado, el cual tuvo como objetivo determinar el cambio en la demanda de ductilidad cuando se modifica el periodo de la estructura. En la Figura 53 se muestra la estructura analizada, la cual consiste en un marco de un solo nivel, al cual se le aplicó una carga distribuida en la viga y se colocó un disipador. El disipador se modeló con las características promedio de un dispositivo con una sola barra cuadrada actuando como núcleo.

Se analizaron periodos a partir de 0.1 segundos y se incrementó la masa para modificar el periodo hasta obtener una ductilidad acumulada superior a la capacidad del disipador. Cabe mencionar que las características del disipador se mantuvieron constantes en cada paso de análisis, con esto se pudo encontrar un intervalo de periodos donde el disipador modelado es capaz de soportar las demandas del sismo.

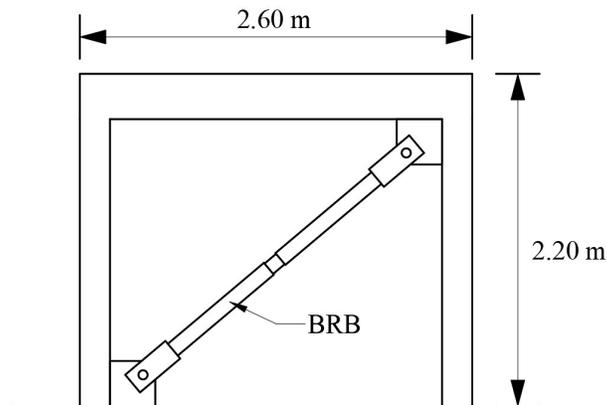


Figura 53. Modelo base para realizar el estudio numérico con variación de periodos

Para los tres análisis descritos se calculó la demanda de ductilidad acumulada y la ductilidad máxima impuesta a los disipadores. Los resultados se muestran en la Tabla 10, en la cual los dos primeros análisis sólo incluyen los resultados del disipador más demandado para cada intensidad del sismo mientras el periodo se mantiene constante, por su parte el tercer análisis mantiene la intensidad constante y se presentan tres periodos analizados.

Revisando los resultados de la Tabla 10, se observa que para los dos primeros análisis la ductilidad acumulada es muy baja en todos los escenarios, esto es especialmente evidente si se compara con la capacidad promedio de los disipadores estudiados. Inclusive con una

intensidad de 200% la demanda es menor al 40% de la capacidad del disipador con menor desempeño, por lo que difícilmente se provocaría la falla.

En cuanto a las ductilidades máximas cabe mencionar que el diseño de la estructura se orientó a reducir los desplazamientos, sin embargo, se impusieron ductilidades mayores a lo esperado, pero manteniéndose por debajo de 6, esta ductilidad máxima no implica un riesgo de falla súbita de acuerdo con las pruebas estandarizadas. Cabe mencionar que los disipadores para simulación híbrida fueron escalados en el modelo numérico, sin embargo, se puede concluir que el diseño de disipador es seguro en las condiciones analizadas e incluso podría resistir varios sismos intensos antes de presentar fallas.

En los resultados del tercer análisis, se observa un incremento en las demandas a medida que se incrementa el periodo de la estructura. Sin embargo, se aprecia que para periodos menores a 0.3 segundos el disipador modelado es suficiente para soportar el sismo del ejercicio sin fallar. Lo anterior considerando que la ductilidad acumulada es menor a la media menos una desviación estándar y la ductilidad máxima no supera la que se aplicó al disipador 5 en las pruebas estandarizadas.

Cabe mencionar que las conclusiones expuestas pueden ser más precisas con estudios numéricos que abarquen un mayor número de registros sísmicos, otras configuraciones estructurales e intervalos de periodos más amplios.

Tabla 10. Valores de demandas de ductilidad acumulada y ductilidad máxima

Número de análisis	Tipo de análisis	Intensidad sísmica	Periodo de la estructura (s)	Ductilidad acumulada	Ductilidad máxima
Primero	Simulación híbrida experimental	100 %	0.45	6.5	1.63
		150 %	0.45	16.2	2.14
		200 %	0.45	36.2	5.26
Segundo	Estudio numérico con tres niveles	100 %	0.45	1.3	1.15
		150 %	0.45	14.1	1.84
		200 %	0.45	26.9	4.07
Tercero	Estudio numérico con un nivel	100 %	0.1	0.0	0.2
		100 %	0.2	2.6	1.5
		100 %	0.3	134.4	11.06

En la Figura 54 se presentan los resultados del primer análisis, y muestra la demanda de ductilidad acumulada que tendría el dissipador del primer nivel durante el evento sísmico considerado. Lo primero que se observa es que es posible identificar la fase intensa del movimiento sísmico, caracterizada por la concentración en la demanda de ductilidad. Dicha fase puede durar unos pocos segundos, en la gráfica se presenta entre los 8 y los 18 segundos, esto implica que el dissipador es demandado con una velocidad mucho mayor que en pruebas estandarizadas, lo cual es un motivo para pensar en factores de seguridad adicionales.

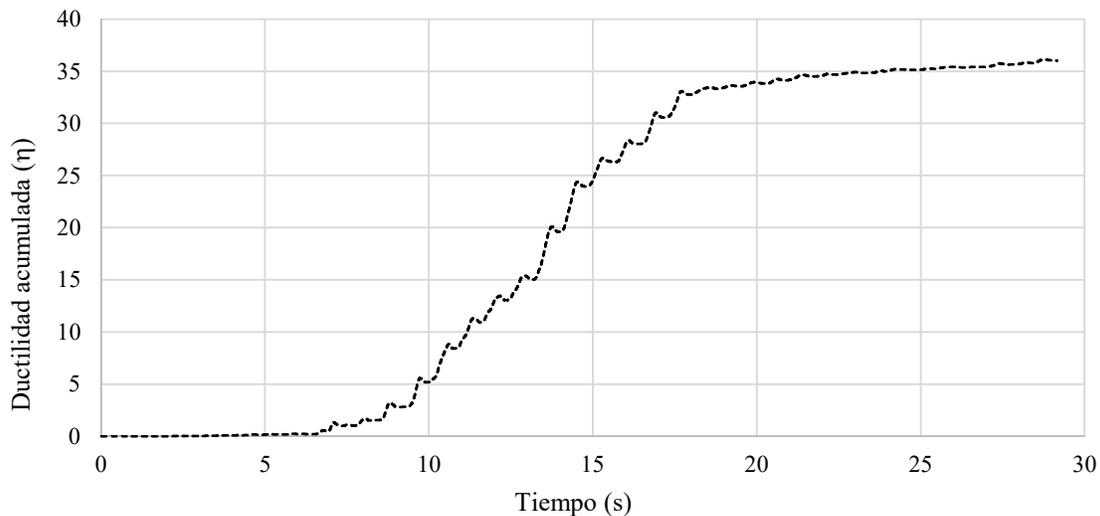


Figura 54. Curva de demanda de ductilidad acumulada en simulación híbrida

En la Figura 55 se presentan las curvas de ductilidad acumulada contra tiempo que se analizaron en la sección 4.3.8, a las cuales se anexaron rectas que representan demandas de ductilidad. El objetivo es mostrar gráficamente la diferencia entre la capacidad de los dispositivos y la demanda calculada. Se incluyen tres rectas para realizar la comparación, la primera (D1) corresponde a la demanda máxima calculada en el primer análisis. En las siguientes rectas (D2 y D3), su valor corresponde a duplicar y triplicar el valor de la demanda D1, el objetivo es simular la ductilidad acumulada que se demanda a un mismo dissipador después de varios eventos sísmicos.

Analizando la Figura 55 se observa que, a excepción del dissipador con menor desempeño, todos los dissipadores serían capaces de soportar las demandas impuestas por tres sismos intensos. Incluso, se aprecia que todos los dissipadores probados serían competentes para

soportar dos sismos de gran intensidad sin fallar. Estas conclusiones son válidas para las condiciones de la estructura del primer análisis, si se consideran otras estructuras u otros registros sísmicos los resultados cambiarían. Sin embargo, la comparación es útil como evaluación de la resistencia y durabilidad de los disipadores.

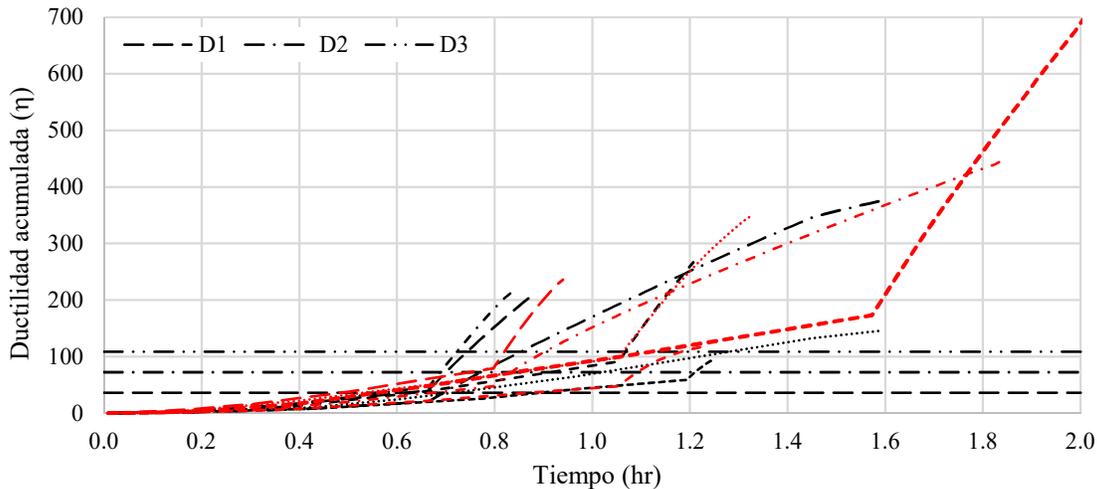


Figura 55. Curvas de ductilidad acumulada con demandas de simulación híbrida

En la Figura 56 se presenta otra comparación entre demanda y capacidad de los disipadores, ahora en términos de probabilidad de falla. Para esto se presentan dos de las curvas de probabilidad calculadas en la sección 4.3.9. La primera corresponde al Grupo A que considera todos los disipadores analizados y el Grupo E que descarta los disipadores con menor desempeño. Las rectas que representan demandas de ductilidad (D1, D2 y D3) tienen los mismos valores que las presentadas en la comparación anterior.

Del análisis de las rectas se observa que para la demanda D1, que corresponde a un sismo intenso, la probabilidad de falla es menor al 0.5% en ambas curvas. Para la demanda D2 el grupo A tiene una probabilidad de 1.6% mientras que el grupo E la probabilidad de falla es cercana al 0%. Finalmente, con la demanda D3 la probabilidad del grupo A llega a 7.7% que se aprecia como un valor adecuado para garantizar la seguridad de la estructura, por su parte el grupo E mantiene una probabilidad menor al 0.5 %, es decir que bajo las condiciones de este último grupo no se presentaría una falla inclusive después de tres sismos intensos.

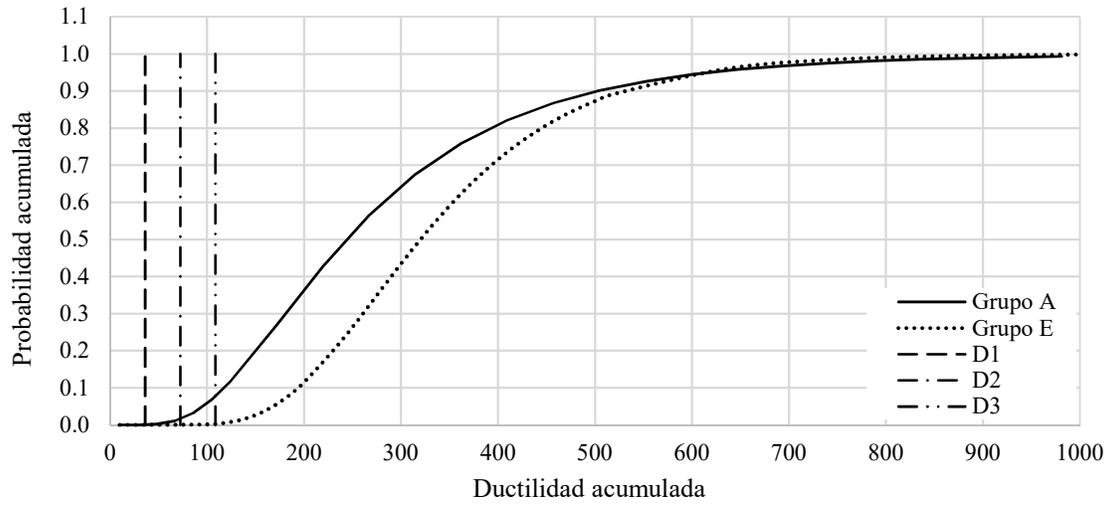


Figura 56. Curvas de probabilidad de falla con demandas de ductilidad de simulación híbrida

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta sección se presenta una síntesis y reflexiones en torno a los resultados de la caracterización experimental de los disipadores de bajo costo; así como con respecto a las características de construcción, las pruebas experimentales y los análisis realizados. Primero, se presentan las conclusiones más relevantes de la investigación ordenados en función de los objetivos descritos en la sección 1.3. Después, en congruencia con dichas conclusiones, se proponen algunas recomendaciones: mejoras de fabricación y mejora con respecto al diseño. Finalmente, se reflexiona en torno a posibles investigaciones subsecuentes.

Conclusiones

Capacidad de los dispositivos y riesgo de falla

La capacidad de disipación de energía y la ductilidad acumulada máxima de los dispositivos se puede ajustar a una distribución de probabilidad lognormal, esto ayuda a representar las diferencias de capacidad de los dispositivos ante protocolos de carga similares.

La capacidad de disipación se reduce cuando aumenta el deslizamiento de la barra, el factor de longitud y los pandeos locales en la longitud no restringida. Siendo este último un factor muy relevante en el desempeño final del dispositivo.

La ductilidad acumulada que desarrollaron la mayoría de los disipadores supera el límite mínimo recomendado por el código AISC 341 (2016), por lo tanto, se infiere que el diseño puede ser competente en pruebas de certificación.

Los dispositivos antes de fallar presentan degradación de rigidez, la cual se observa en la repetición de ciclos de fatiga. La degradación es provocada por pandeos locales en el núcleo.

Con datos de pruebas de simulación híbrida se observó que las demandas de ductilidad acumulada en los dispositivos provocadas por sismos intensos tienen una probabilidad de falla menor al 1% en la estructura estudiada.

Fabricar los disipadores siguiendo las recomendaciones de fabricación y con acompañamiento técnico puede resultar en mejoras de su desempeño, sustancialmente.

Variables de construcción

El incremento en el número de barras que conforman el núcleo incrementó efectivamente la fuerza. Sin embargo, la rigidez inicial fue menor en proporción a lo observado en dispositivos de una barra.

Incrementar el número de barras suavizó la transición del estado elástico al inelástico, como consecuencia se incrementa el desplazamiento de fluencia al idealizar la curva de capacidad.

La relación entre energía disipada y ductilidad acumulada disminuyó a la mitad en disipadores de múltiples barras comparados con los de una sola, es decir, que casi el 50% de la energía disipada por dispositivos de varias barras no se debió a la deformación plástica del acero.

El dispositivo con tres barras presentó pandeo en los PTR, reducción de su desempeño y fractura del mortero por falta de recubrimiento. Se recomienda utilizar máximo dos barras en línea o incrementar la capa de mortero entre el núcleo y el tubo de acero.

Utilizar tiras de caucho como material desadherente en el núcleo produjo un comportamiento a compresión más estable que la espuma de polipropileno.

La falla de los disipadores estuvo relacionada con pandeos locales en la longitud sin restricción D1 (ver Figura 3). Por lo tanto, reducir la distancia libre, sin comprometer la capacidad para deformarse a compresión, puede mejorar el desempeño.

Las características físicas que determinan la forma de los ciclos histeréticos (y, por tanto, la energía disipada) son la longitud de núcleo que se deforma inelásticamente y el deslizamiento de las barras en la zona de anclaje.

El cambio de longitud de los disipadores no arrojó resultados concluyentes debido a la variación observada en la longitud que se deforma plásticamente.

Parámetros para diseño

El promedio del factor de rigidez equivalente (f_k) experimental resultó 1.7 y tuvo una dispersión menor al 18%.

El factor de sobre resistencia a tensión, ω , mostró un desempeño estable y predecible con una tendencia clara de comportamiento. Es posible ajustar los datos del factor a una recta para ductilidades mayores a 2.0.

El factor de sobre resistencia a compresión β presentó también un comportamiento estable cuando el material desadherente es caucho; e inestable cuando es polipropileno. Para ambos casos se propusieron ecuaciones para calcular β .

Las curvas envolventes de ciclos histeréticos en términos de esfuerzo deformación, mostraron un comportamiento estable, y la pendiente de la recta que ajustó la zona de comportamiento elástico fue muy similar al módulo de elasticidad del acero.

Los parámetros de fluencia de los disipadores se obtuvieron con un método estandarizado. Dicho método idealiza la envolvente de ciclos histeréticos a una curva bilineal. Esta idealización es útil considerando que los disipadores estudiados son estructuras con interacciones complejas.

Los parámetros de fluencia promedio que se obtuvieron son consistentes con los resultados de pruebas monotónicas realizadas a las muestras de las barras utilizadas.

El factor longitud propuesto permite conocer de forma indirecta cuál es la proporción de la barra de acero que se deforma inelásticamente y actúa como núcleo del disipador.

Una de las diferencias principales entre el diseño estudiado y aquellos que se describen en la literatura es la dificultad de definir la longitud del núcleo, por lo tanto, es de interés contar con el factor de longitud para estimarla.

Se calibró un modelo numérico simplificado del comportamiento de los disipadores. Se logró modelar adecuadamente el comportamiento general y las fuerzas de tensión. Se comparó la ductilidad acumulada y la diferencia fue de 12% entre el modelo y los datos experimentales para una ductilidad acumulada de 200.

Comentarios finales

A lo largo de este proyecto se comprobó que el desempeño de los dispositivos fue estable en términos generales. Los dispositivos presentaron una capacidad adecuada para resistir sismos como los estudiados en los ejemplos numéricos. Por esa razón se puede considerar que los dispositivos son viables de implementar en proyectos reales una vez estudiadas las interacciones con conexiones que sean sencillas de construir.

Derivado de la participación de alumnos de la UNAM, se estudió la hipótesis de que los disipadores pueden fabricarse por personas sin conocimientos especializados en construcción de disipadores y mediante herramientas comunes, incluso con las condiciones expuestas fue posible obtener un desempeño estable y una capacidad adecuada con respecto a las demandas de sismos intensos. Esto puede sentar bases para que zonas de bajos recursos en el país tengan acceso a esta tecnología, inclusive cuando se tiene poca asesoría técnica. Sin embargo, es deseable que para la implementación se desarrollen prototipos de vivienda cuyo diseño incluya los disipadores.

Recomendaciones

Recomendaciones de fabricación

Durante el proceso de fabricación se identificaron actividades que mejoran el desarrollo de los disipadores, entre ellas:

1. Utilizar morteros con suficiente fluidez para garantizar el correcto colado al interior de los PTR y realizar un buen vibrado para asegurar la integridad de la sección en toda la longitud.
2. Utilizar plantillas para homogeneizar la geometría de todas las barras que se instalan. Esto facilita en gran medida el ensamblado final del disipador.
3. Colocar el material desadherente posterior al doblado de las barras.
4. Tomar todas las precauciones necesarias para garantizar la longitud de barra sin restringir (ver Figura 3, longitud D1). Como se ha comentado, este parámetro es fundamental para la capacidad de los dispositivos. También se observó que, durante el ensamblado, el poliestireno tiende a desplazarse, lo cual puede generar longitudes no deseadas.
5. Cuando se utiliza más de una barra en el núcleo, puede ser útil unir las mecánicamente para facilitar la fabricación del disipador.
6. Garantizar un recubrimiento de mortero entre el núcleo y el PTR al menos igual al ancho del núcleo en ambas direcciones.

Propuestas de mejora

Las tres propuestas que se presentan a continuación se identificaron durante los análisis teóricos y las pruebas experimentales realizadas en esta tesis. Dichas propuestas consisten en modificaciones al diseño de los dispositivos, las cuales se considera que tienen potencial para mejorar el desempeño general y facilitar la predicción del comportamiento.

La primera propuesta consiste en cambiar las barras lisas por varillas de acero de refuerzo corrugadas lo cual tiene las siguientes ventajas:

1. El comportamiento de varillas corrugadas ancladas en elementos de concreto ha sido muy estudiado, esto permite analizar teóricamente el desempeño.
2. La corrugación permite un anclaje mecánico que reduciría la incertidumbre sobre la longitud que se deforma inelásticamente.
3. El anclaje se podría generar sin necesidad de ganchos mediante la longitud de desarrollo.
4. El acero de refuerzo es más accesible y tiene mayor variedad de diámetros, además se pueden usar paquetes de varillas para ampliar las opciones de área en el núcleo.
5. Los esfuerzos inducidos en el mortero por desplazamiento lateral de las barras se distribuyen en un área mayor debido a la sección circular.
6. Las corrugaciones de la zona central se pueden compensar con el mismo material desadherente para evitar un anclaje no deseado.

La segunda propuesta consiste en colocar soleras metálicas en el espacio libre entre el PTR que restringe el pandeo y los laterales. En la Figura 57 se puede observar la cantidad de soleras propuestas y su ubicación. Dichas soleras se fijarían únicamente al PTR central y sus ventajas son:

1. Reducir los movimientos del dissipador fuera del eje al reducir el espacio libre entre los PTR, y con esto, se reducen las componentes transversales de las fuerzas que se aplican al núcleo.

2. Se proporciona una superficie donde se pueden deslizar libremente los PTR laterales sin agregar resistencia excesiva por fricción.
3. Se reduce el área de contacto entre elementos metálicos y se evita la interacción de las esquinas.

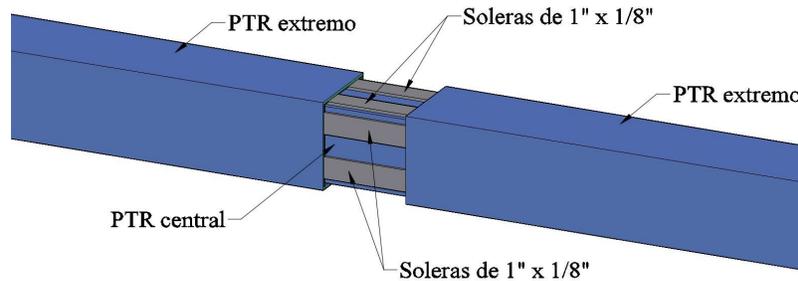


Figura 57. Instalación de soleras para reducir espacio libre

La tercera propuesta consiste en colocar un refuerzo a la barra en la interfaz, entre el mortero y el poliestireno. Con dicho refuerzo se contribuye a reducir el desplazamiento lateral de la barra, el cual promueve el pandeo local como se expone en el último párrafo de la sección 4.3.7 y se observa en la Figura 43. A continuación, se presentan tres opciones de refuerzo, las cuales se esquematizan en la Figura 58.

La primera opción consiste en colocar cuatro estribos alrededor de la barra desde la interfaz con el poliestireno hasta el primer doblez, dichos estribos se anclan en el mortero y trabajan a tensión evitando el desplazamiento lateral de la barra.

La segunda opción consiste en colocar una placa metálica en forma de C con una perforación al centro para el núcleo. El objetivo es evitar los desplazamientos laterales y transmitir la fuerza hacia el PTR. Esta opción tiene dos ventajas, la primera es que se puede instalar con tornillos auto-taladrantes, y la segunda que funciona como frontera para el colado.

La tercera opción, aportada por el Dr. Héctor Guerrero (comunicación personal), consiste en colocar un tramo de tubo con sección similar al núcleo. El objetivo es reforzar el núcleo ante pandeo en la zona sin restricción, además, dentro del mortero puede distribuir los esfuerzos inducidos por desplazamientos laterales del núcleo.

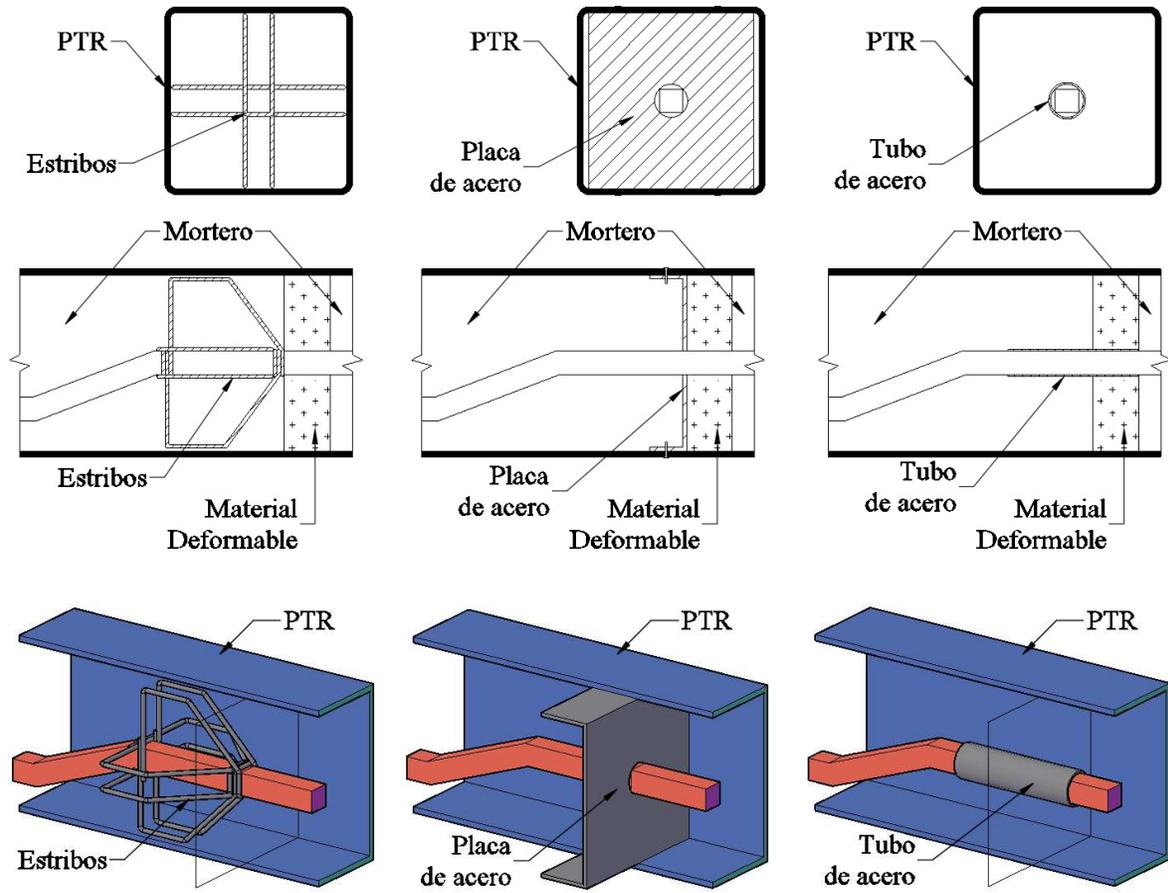


Figura 58. Refuerzo en la interfaz de mortero

Investigaciones futuras

Al realizar la tesis se pudieron identificar dos líneas principales de investigación, las cuales, pueden contribuir a complementar y enriquecer el trabajo realizado y con esto facilitar la implementación del dispositivo en construcciones reales. A continuación, se presentan las propuestas de investigaciones futuras

1. Fabricar dispositivos que busquen reducir las variaciones en la respuesta y mejorar el desempeño que se ha expuesto en la presente investigación, esto mediante la incorporación de mejoras en la fabricación o en el diseño del disipador.
2. Proponer e investigar conexiones entre los disipadores y elementos de concreto que formen parte de estructuras típicas de casa habitación, esto con el objetivo de evaluar el desempeño cuando se involucran rotaciones en el dispositivo por la interacción con la estructura.

Con respecto a la segunda línea de investigación, en la Figura 59 se presenta una propuesta de conexión, la cual consiste en anclar anillos de varilla en los nodos de unión viga columna, posteriormente, en los anillos se anclan las barras de un disipador y finalmente se cuele la conexión. El objetivo de la conexión propuesta es: reducir el uso de tornillería o soldadura en las conexiones y tener la conexión fuera del nodo, dicha conexión se puede demoler si es necesario sustituir un disipador dañado.

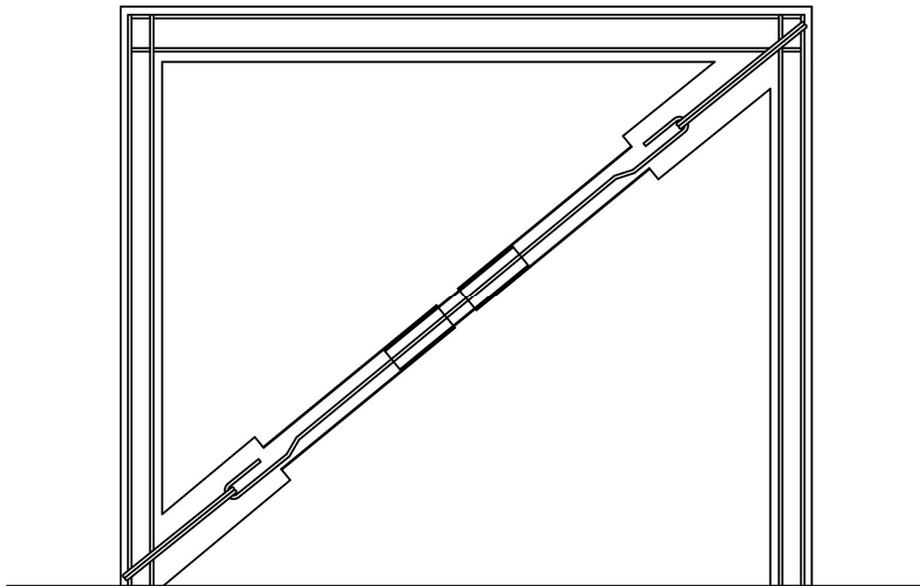


Figura 59. Propuesta de conexión con elementos de concreto

REFERENCIAS

- American Institute Of Steel Construction, AISC 341, 2016. *Seismic provisions for structural steel buildings*
- Black, C. J., Makris, N. & Aiken, I. D., 2004. Component testing, seismic evaluation and characterization of buckling-restrained braces. *Journal of Structural Engineering*, Volúmen 130, pp. 880-894.
- Budaházy, V. & Dunai, L., 2015. Numerical analysis of concrete filled Buckling Restrained Braces. *Journal of Constructional Steel Research*, Volúmen 115, pp. 92 - 105.
- Calvi, G. M., Priestley, M. J. N. & Kowalsky, M. J., 2007. *Displacement based seismic design of structures*. 1 ed. Pavia, Italia: IUSS press.
- Chen, Q., Wang, C.-L., Meng, S. & Zeng, B., 2016. Effect of the unbonding materials on the mechanic behavior of all-steel buckling-restrained braces. *Engineering Structures*, Volumen 111, pp. 478-493.
- Chou, C.-C. & Chen, S.-Y., 2010. Subassemblage tests and finite element analyses of sandwiched buckling-restrained braces. *Engineering Structures*, Volúmen 32, pp. 2108-2121.
- Christopoulos, C., Filiatrault, A. & Bertero, V. V., 2006. *Principles of passive supplemental damping and seismic isolation*. Pavia, Italia: IUSS press.
- Clark, P. et al., 1999. *Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices*. Santa Barbara, Caifornia. 68 convención SEAOC
- Dehghani, M. & Tremblay, R., 2017. *Full-Scale Experimental Assessment of Steel-Encased Buckling Restrained Braces*. Santiago, Chile. 16WCEE 2017
- FEMA 356, 2000. *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*, Federal Emergency Managment Agency, United States
- NTC Concreto, 2017. *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto*. Gobierno de la Ciudad de México
- Guerrero, H., 2016. *Seismic design and performance of hospital structures equipped with buckling-restrained braces in the lakebed zone of Mexico City*, Tesis doctoral, Universidad de Manchester.

- Guerrero, H., Escobar, J., Gómez, R. & Zamora, E., 2018a. *Propuesta de un disipador de energía sísmica de bajo costo*. En edición. SMIE.
- Guerrero, H., Ji, T., Escobar, J. A. & Teran-Gilmore, A., 2018b. Effects of Buckling-Restrained Braces on reinforced concrete precast models subjected to shaking table excitation. *Engineering Structures*, Volumen 163, pp. 294-310.
- Guo, Y.-L. et al., 2017. Theoretical and experimental studies of battened buckling-restrained braces. *Engineering Structures*, Volumen 136, pp. 312-328.
- Higashida, Y., Burk, J. D. & Lawrence, F. V., 1978. Strain-controlled fatigue behavior of ASTM A36 and A514 grade F steels and 5083-0 aluminum weld materials. *Welding Research Supplement*, Volumen 5083, pp. 334s--344s.
- Ju, Y. K., Myeong-Han, K., Jinkoo, K. & Sang-Dae, K., 2009. Component tests of buckling-restrained braces with unconstrained length. *Engineering Structures*, Volumen 31, pp. 507-516.
- Mander, J. B., 1983. Seismic Design of Bridges. Tesis doctoral, *Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Canterbury*.
- Merritt, S., Uang, C.-M. & Benzoni, G., 2003. Subassemblage testing of corebrace buckling-restrained braces. *Reporte final para CoreBrace, LLC, Departamento de Ingeniería Estructural, Universidad de California, San Diego*.
- Newell, J., 2006. Subassemblage testing of CoreBrace buckling-restrained braces (G Series). *Structural Systems Research Project*.
- Ozcelik, R. & Dikiciaşık, Y., 2015. *Buckling Restrained Braces with Different Casing Systems*. Nevşehir, Turquía, ICOCEE.
- Ozcelik, R., Dikiciaşık, Y. & K Civelek, B., 2016. *Buckling Restrained Braces with New Casing System*. Estambul, Turquía. ACE.
- Palazzo, G., López-Almansa, F., Cahís, X. & Crisafulli, F., 2009. A low-tech dissipative buckling restrained brace. Design, analysis, production and testing. *Engineering Structures*, Volumen 31, pp. 2152-2161.
- Rodríguez, M. & Botero, J. C., 1995. Comportamiento sísmico de estructuras considerando propiedades mecánicas de aceros de refuerzo mexicanos. *Revista de Ingeniería Sísmica*, Volumen 49, pp. 39-50.

- Rodríguez, M. E., Botero, J. C. & Villa, J., 1999. Cyclic stress-strain behavior of reinforcing steel including effect of buckling. *Journal of Structural Engineering*, 125(6), pp. 605-612.
- Sánchez Arriaga, D., 2019. *Simulación híbrida de una estructura equipada con disipadores tipo BRB*, México: Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- SEAOC-AISC, 2001. Recommended provisions for buckling-restrained braced frames. *SEAOC and AISC. Seismology and Structural Standards Committee*. California EUA.
- Tsai, K.-C. y otros, 2004. *Research and application of double-core buckling restrained braces in Taiwan*. Vancouver, Canada. 13 WCEE
- Uang, C.-M. & Nakashima, M., 2004. *Steel buckling-restrained braced frames*. CRC Press Boca Raton, FA, EUA.
- Wang, C.-L., Chen, Q., Zeng, B. & Meng, S., 2017. A novel brace with partial buckling restraint: An experimental and numerical investigation. *Engineering Structures*, Volumen 150, pp. 190-202.
- Wang, J., Li, B., Chou, C. & Chen, L., 2018. Cyclic experimental and analytical studies of buckling-restrained braces with various gusset connections. *Engineering Structures*, Volumen 163, pp. 38-50.
- Wen, X. Y., 1976. Method for random vibration of hysteretic system. *Journal of the engineering mechanics division*, 102(2), pp. 249-263.
- Zhao, J. & Sritharan, S., 2007. Modeling of Strain Penetration Effects in Fiber-Based Analysis of Reinforced Concrete Structures. *Aci Structural Journal*, Volumen 104, pp. 133-141.