



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INGENIERIA CIVIL – ESTRUCTURAS

CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO DE UN DISIPADOR DE FRICCIÓN INNOVADOR

TESIS,

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

JUAN JOSÉ GÓMEZ GARCÍA

TUTOR PRINCIPAL

DR. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, SEPTIEMBRE 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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. Roberto Gómez Martínez

1 er. Vocal: Dr. Héctor Guerrero Bobadilla

2 do. Vocal: Dr. Óscar Alberto López Bátiz

3 er. Vocal: Dr. Edgar Tapia Hernández

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. HÉCTOR GUERRERO BOBADILA

MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE 2022

DEDICATORIA

A mi padre, por el camino que creó para lograr mis metas

A mi madre, por el amor incondicional, calidez y paciencia.

A mis hermanos, por el apoyo, el cariño y los momentos inolvidables juntos.

A mis amigos, por las risas, el apoyo y el júbilo compartidos

A mis profesores, por compartir su amor al conocimiento

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por el apoyo incondicional brindado durante esta etapa de mi vida.

A mis amigos y compañeros por haber hecho de esta etapa un tiempo ameno y feliz.

Al Dr. Héctor Guerrero por su paciencia, conocimientos compartidos y sobre todo por demostrar ser un gran líder, mentor y amigo.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por abrirme las puertas para lograr este proyecto de vida y sobre todo por brindar el apoyo para la realización de pruebas experimentales.

Al Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) por abrirme las puertas de su laboratorio para realizar mis investigaciones.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría y por el apoyo financiero al proyecto FORDECyT No. 297246 “Desarrollo de capacidades nacionales para aumentar la resiliencia sísmica de edificios de concreto y mampostería con un enfoque de diseño por desempeño”.

Resumen

En este trabajo se presenta los resultados de un proyecto de investigación, enfocado en la caracterización y diseño de un disipador de fricción innovador.

Primero se presenta una descripción detallada del desarrollo del disipador, sus elementos y materiales. Después se describe una serie de pruebas experimentales enfocadas a caracterizar los parámetros que definen el comportamiento del dispositivo propuesto, particularmente el coeficiente de fricción dinámico que caracterizará la capacidad de carga del dispositivo.

Se presenta una propuesta del análisis de los datos con la intención de brindar parámetros de diseño para su uso en estructuras, principalmente a base de marcos. Por medio de la caracterización se realiza una modelación numérica del dispositivo en un programa de análisis estructural comercial.

Abstract

This paper presents the results of a research project, focused on the characterization and design of an innovative friction dissipator.

First, a detailed description of the development of the damper, its elements and materials are presented. Then a series of experimental tests aimed at characterizing the parameters that define the behavior of the proposed device are described, particularly the dynamic friction coefficient that will characterize the load capacity of the device.

A proposal for the analysis of the data is presented with the intention of providing design parameters for its use in structures, mainly based on frames. Through the characterization, a numerical modeling of the device is carried out in a commercial structural analysis program.

ÍNDICE

1. Introducción.....	8
1.1. Sistemas de protección sísmica.....	8
1.2 Planteamiento del problema.....	9
1.3 Objetivos.....	10
2. Justificación.....	11
3. Antecedentes.....	12
4. Descripción de prototipos.....	23
4.1 Geometría.....	28
4.2 Materiales.....	35
5. Pruebas experimentales.....	37
5.1 Protocolos de pruebas experimentales.....	37
5.2 Configuración del experimento.....	40
5.3 Instrumentación.....	43
6. Resultados experimentales.....	50
6.1 Prototipo DFB-01.....	50
6.2 Prototipo DFC-01.....	52
6.3 Prototipo DFC-02.....	55
6.4 Prototipo DFC-03.....	57
6.5. Prototipo DFC-04.....	59
7. Modelación numérica.....	61
7.1 Prototipo DFB-01.....	61
7.1 Prototipo DFC-01.....	63
7.2 Prototipo DFC-02.....	64
7.3 Prototipo DFC-03.....	66
7.4 Prototipo DFC-04.....	68
8. Conclusiones y recomendaciones.....	69
8.1 Conclusiones.....	69
8.2. Recomendaciones.....	71
Referencias.....	72

Índice de figuras

Figura 1. Disipador pionero de fricción Pall y Marsh (adaptada de Jara, 1993).	13
Figura 2. Disipador de fricción uniaxial de Nims y Col (adaptada de Jara, 1993).	13
Figura 3. Diagrama esquemático de una conexión atornillada con ranuras (adaptada de Grigorian y Popov, 1993).	14
Figura 4. Disipador Shapia (adaptada de Kar et al., 1998).	14
Figura 5. Componente del FDD, (adaptada de Imad, et al., 2002).	15
Figura 6. Funcionamiento del sistema (adaptada de Imat, et al., 2002).	15
Figura 7. Arreglo experimental del dispositivo (adaptada de Morgen et al., 2004).	16
Figura 8. Componentes del dispositivo (adaptada de Morgen et al., 2004).	16
Figura 9. Disipador propuesto por Wei y Chang (adaptada de Wei y Chang, 2010).	17
Figura 10. Disipador de fricción (adaptada de Zhao et al., 2010).	18
Figura 11. Configuración del dispositivo de fricción de rigidez variable (adaptada de Wang et al., 2011).	19
Figura 12. Dispositivo armado final (adaptada de Mirtaheri, 2011).	19
Figura 13. Dispositivo de carga axial para los anillos (adaptada de Martínez, 2017).	20
Figura 14. Vista esquemática. (a) disipador de pared de fricción, (b) dispositivo de fricción (adaptada de Petkovski, 2017).	20
Figura 15. Disipador de fricción Ten-Co ® (adaptada de Quaketek, 2018).	21
Figura 16. Esquema del prototipo DFB-01.	23
Figura 17. Vista lateral de perfil canal con balatas del disipador DFB-01.	24
Figura 18. Imagen de disipador prototipo para prueba de laboratorio.	24
Figura 19. a) Marco equipado con disipador; b) Detalle de vista superior del dispositivo.	25
Figura 20. Placa tipo del disipador de fricción.	27
Figura 21. Esquema de placa tipo de prototipos DFC-02, DFC-03 y DFC-04, dimensiones en cm.	27
Figura 22. Placas tipo de prototipos DFC-02, DFC-03 y DFC-04.	28
Figura 23. Arreglo de prototipo DFB-01.	29
Figura 24. Geometría de la sección C del prototipo DFB-01 (dimensiones en cm).	29
Figura 25. Geometría de la sección I, prototipo DFB-01 (dimensiones en cm).	29
Figura 26. Fotografías del prototipo DFB-01 durante el proceso de fabricación.	30
Figura 27. Dimensiones en cm, del prototipo DFC-01.	31
Figura 28. Vista en planta y lateral del prototipo (dimensiones en cm).	31
Figura 29. Fotografías del prototipo DFC-01 durante su fabricación.	32
Figura 30. Placa de concreto del prototipo DFC-02 y DFC-03 (dimensiones en cm).	33
Figura 31. Ensamble de los prototipos DFC-02 y DFC-03 (dimensiones en cm).	33
Figura 32. Fotografía del prototipo DFC-02 ensamblado.	34
Figura 33. Preparación para la colocación de placas de aluminio en el prototipo de concreto DFC-04.	34
Figura 34. Prototipo DFC-04 con placas de aluminio colocadas.	35
Figura 35. Fotografía del proceso de fabricación del prototipo DFC-04.	36
Figura 36. Protocolo de desplazamientos para las pruebas para prototipo DFC-01	39
Figura 37. Configuración del experimento para el prototipo DFC-01.	41
Figura 38. Configuración general para prototipos DFB-01 DFC-02, DFC-03 y DFC-04.	42
Figura 39. Instrumentación de pernos A325. a) Colocación de galga en el perno; b) Sistema de adquisición de datos TDS; c) Colocación de los pernos instrumentados.	44
Figura 40. Disipador DFB-01 montado e instrumentado.	45
Figura 41. Instrumentación para pruebas con el prototipo DFC-01.	46

Figura 42. Ubicación de transductores de control para las pruenas del prototipo DFC-01.	47
Figura 43. Ubicación de celdas para las pruebas del prototipo DFC-01.	47
Figura 44. Instrumentación de dispositivos DFC-02, DFC-03 y DFC-04.	48
Figura 45. Fotografía de la instrumentación para las pruebas de los prototipos DFC-02, DFC-03 y DFC-04.	49
Figura 46. Curvas hiteréticas del prototipo DFB-01.	51
Figura 47. Curvas carga desplazamiento del sistema estructural con y sin el dispositivo DFC-01.	53
Figura 48. Curvas carga desplazamiento del dispositivo DFC-01.	53
Figura 49. Gráfica desplazamiento vs FA/FN.	54
Figura 50. Curvas hiteréticas del prototipo DFC-02.	56
Figura 51. Curvas hiteréticas del dispositivo DFC-03.	58
Figura 52. Curvas de histéresis del protitipo DFC-04.	60
Figura 53. Modelación prueba del prototipo DFB-01	62
Figura 54. Modelación prueba del prototipo DFC-01	63
Figura 55. Modelación numérica de la prueba para el prototipo DFC-02.	65
Figura 56. Modelación numérica de la prueba para el prototipo DFC-03.	67
Figura 57. Modelación numérica de la prueba para el prototipo DFC-04.	68

Índice de tablas

Tabla 1. Descripción de los prototipos de concreto	26
Tabla 2. Protocolo de pruebas del dispositivo DFB-01.	38
Tabla 3. Protocolo de pruebas para el prototipo DFC-02.	39
Tabla 4. Protocolo de pruebas para el prototipo DFC-03.	40
Tabla 5. Protocolo de pruebas para el prototipo DFC-04.	40
Tabla 6. Resultados promedio de fuerza de activación y coeficiente de fricción.	52
Tabla 7. Relaciones FA /FN en las rampas de incrementos de desplazamiento.	54
Tabla 8. Coeficiente de fricción de pruebas en dispositivo DFC-02.	57
Tabla 9. Coeficiente de fricción de pruebas en dispositivo DFC-03.	59
Tabla 10. Coeficiente de fricción de pruebas en dispositivo DFC-04.	60

1. Introducción

1.1. Sistemas de protección sísmica

Las nuevas filosofías de diseño requieren que las estructuras tengan una gran capacidad dúctil, característica que las estructuras convencionales pueden lograr, pero en la mayoría de las veces generando daño severo en los elementos estructurales y no estructurales. Los sistemas de protección sísmica brindan una solución eficaz a este problema, pues están diseñados específicamente para acomodar grandes demandas de ductilidad, concentrando en su estructura particular esas demandas durante un sismo. Esa característica los hace muy efectivos para reducir desplazamientos y, en consecuencia, daño en las estructuras.

Principalmente existen dos tipos de sistemas: aisladores y amortiguadores. Los primeros, como su nombre lo indica, aíslan a la estructura del terreno desacoplando los periodos de vibrar del suelo y la estructura, aumentando el periodo de esta última con la intención de obligarla a moverse como cuerpo rígido. Los segundos son sistemas que, por medio de las propiedades de sus materiales constitutivos o el principio de su funcionamiento, se acoplan a la estructura para disipar energía sísmica por medio de la histéresis. Los disipadores de energía, a diferencia de los aisladores sísmicos, no evitan que las fuerzas y movimientos sísmicos se transfieran desde el suelo a la estructura. Por el contrario, estos dispositivos son diseñados para disipar la energía entrada producida por sismos, viento fuerte u otras sollicitaciones de origen dinámico, protegiendo y reduciendo los daños en elementos estructurales y no estructurales. Estos dispositivos permiten aumentar el nivel de amortiguamiento de la estructura. Los amortiguadores, ubicados en puntos estratégicos de las estructuras, permiten reducir la respuesta estructural. Al igual que los sistemas de aislación sísmica de base, los dispositivos de disipación de energía han sido ampliamente utilizados a nivel mundial en el diseño de estructuras nuevas y en el refuerzo de estructuras

existentes. Los más comunes son los sistemas pasivos, los cuales no modifican sus propiedades en función de la respuesta.

Existen diversos sistemas pasivos de control sísmico. En este trabajo se van abordar los sistemas pasivos que disipan de energía sísmica mediante la fricción de dos o más superficies en contacto. Los disipadores de fricción se activan solamente cuando se alcanza un determinado nivel de carga en el dispositivo.

1.2 Planteamiento del problema

El comportamiento estructural óptimo, ante cargas laterales como lo son las producidas durante un evento sísmico, es una de las principales metas de la ingeniería civil, sobre todo en zonas con alta sismicidad como lo es gran parte del territorio de nuestro país. Por ello, es importante desarrollar más y mejores tecnologías de seguridad sísmica. Con esto, se podrán alcanzar las expectativas del ingeniero civil y de nuestra sociedad en general.

En el mundo, cada día está aumentando el uso de estas tecnologías. Por esta razón, el incremento en la investigación y desarrollo de estos sistemas, se vuelve una directriz importante de investigación en ingeniería estructural con el fin de garantizar el uso correcto y el funcionamiento apropiado de las edificaciones.

A pesar de esto, en México el desarrollo de nuevos sistemas de protección sísmica se ha visto rezagado en comparación con otros países con alta actividad sísmica y otros que, a pesar de no estar ubicadas en zonas con alta sismicidad, se han dado la tarea de generar y producir tecnologías de protección para su comercialización en países como el nuestro.

Bajo esta premisa, este trabajo de investigación busca implementar el desarrollo de un disipador de fricción de fabricación totalmente mexicana y de bajo costo, con la intención de que pueda ser asequible para su uso en la industria de la construcción cuando las características de las estructuras así lo permitan, determinando por medio de pruebas experimentales sus características y parámetros de diseño.

1.3 Objetivos

El objetivo general de esta tesis es desarrollar un disipador de energía sísmica a base de fricción de bajo costo para su uso en estructuras sismorresistentes en México.

Adicionalmente se plantean tres objetivos particulares.

- Realizar pruebas experimentales con el dispositivo instalado en una estructura común aplicando cargas cíclicas reversibles para observar el comportamiento histérico del sistema.
- Realizar pruebas variando la carga normal en el dispositivo, con la intención de caracterizar sus propiedades de fricción y verificar la capacidad de éste.
- Con la caracterización de las propiedades físicas del dispositivo, proponer mejoras y metodologías de diseño, así como parámetros de modelación matemática.
- Incrementar la resiliencia sísmica de México.

2. Justificación

El desarrollo de nuevas tecnologías de protección se ha vuelto una pieza fundamental para el futuro de la ingeniería estructural, por ello la investigación se vuelve una de las principales herramientas para lograr avances, en términos de resiliencia sísmica.

Es necesario innovar en la creación y desarrollo nuevos dispositivos que puedan cumplir las expectativas del mercado y de la sociedad moderna. Por esa razón, el estudio y desarrollo de estas tecnologías innovadoras por medio de pruebas experimentales, que puedan garantizar su correcto funcionamiento o en su defecto, evidenciar mejoras, se vuelve esencial.

Para aminorar el rezago tecnológico que tiene México en comparación a otros países con alta sismicidad, se propone un dispositivo innovador y con características diferenciadoras, tales como costo, capacidad y otras. En este trabajo se presenta un disipador de fricción, ya que estos tienen la característica de ser muy estables en sus ciclos histeréticos, además de tener la capacidad de soportar altas demandas de ductilidad, en comparación con otros sistemas de disipación.

Este trabajo busca, por medio de pruebas experimentales de carga cíclica reversible, verificar el funcionamiento del disipador propuesto, caracterizando sus propiedades físicas y proponiendo una metodología de diseño.

3. Antecedentes

Dentro de los disipadores más utilizados se encuentran los de tipo pasivo, que son aquellos que no modifican sus propiedades en función de la respuesta, si no que utilizan sus propiedades físicas intrínsecas, para disipar energía sísmica. Los más comunes en los mercados son los disipadores de fricción y los disipadores metálicos, teniendo algunas ventajas los primeros contra los segundos.

Para un disipador de energía sísmica del tipo metálico los parámetros de diseño de interés son el nivel de fluencia del dispositivo, la rigidez del disipador y la rigidez del brazo de conexión (en su caso). Mientras que, para un dispositivo de fricción, los parámetros son el nivel de carga de deslizamiento y la rigidez del brazo de conexión. La fluencia no es un inconveniente para su uso. Por esta razón, estos se vuelven atractivos para proteger las estructuras. Por ello, este trabajo se basa en el estudio de disipadores de fricción.

El principio con el que funcionan los dispositivos de fricción consiste en colocar dos elementos cuyas superficies estén en contacto, interactuando entre sí mismas bajo una presión constante. La tecnología hace una analogía de los frenos de los automóviles.

Los dispositivos de fricción tienen dos tipos de fases de trabajo: 1) antes del deslizamiento, es decir, cuando las superficies permanecen atascadas hasta que existe una fuerza de activación; y 2) Fase disipativa, que es cuando por medio el rozamiento de las superficies provoca la desaceleración del movimiento sísmico, que está relacionado con la fuerza axial y el coeficiente de fricción de los materiales. Es común adoptar el modelo de bilineal para el cálculo numérico de una simulación de este estilo.

Los primeros trabajos sobre disipadores de fricción fueron aquellos de Pall y Marsh (1982), en donde se conectan dos barras al marco y éstas por medio de fricción disipaban la energía

sísmica. Posteriormente se realizaron más estudios y nuevos avances de estos dispositivos, como aquellos de Filiatrault y Cherry (1988 y 1990), quienes aportaron una metodología simplificada de diseño sísmico de estructuras equipadas con disipadores de fricción. En la Figura 1 se muestra un prototipo.

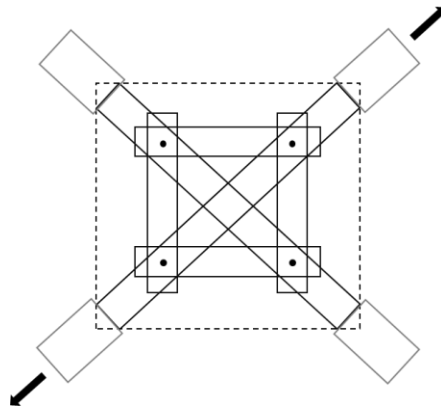


Figura 1. Disipador pionero de fricción Pall y Marsh (adaptada de Jara, 1993).

Scholl (1984) estudió otro dispositivo a base de hule y de contravientos, donde optimizó el funcionamiento y amortiguamiento del sistema. Sin embargo, el costo de este dispositivo fue mayor en comparación con aquel de otros sistemas disponibles.

Nims y Col (1993) midieron la respuesta experimental de un marco de seis niveles con escala 1 a 3. La fuerza de fricción que se obtuvo fue proporcional al desplazamiento relativo entre los extremos del dispositivo. La forma del disipador era un cilindro de acero que interiormente contenía unos resortes de bronce como se muestra en la Figura 2. Los desplazamientos del marco con el disipador se redujeron a casi la mitad en comparación con el marco solo, sin embargo, los cortantes fueron iguales en ambos experimentos, concluyendo que el dispositivo era eficaz.

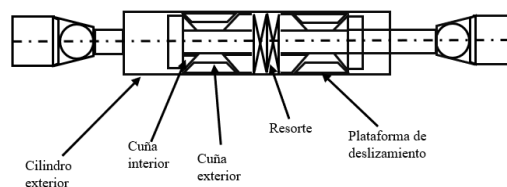


Figura 2. Disipador de fricción uniaxial de Nims y Col (adaptada de Jara, 1993).

En este mismo año, Grigorian y Popov (1993) realizaron experimentos con dos tipos de dispositivos. Uno de ellos contaba con superficies de fricción a base acero con acero y el otro acero con latón. Las pruebas fueron exitosas y se obtuvieron ciclos estables con forma rectangular. En la Figura 3 se observa la conexión propuesta. La conexión atornillada con ranuras (CAR) es similar a un contraviento tipo Chevron.

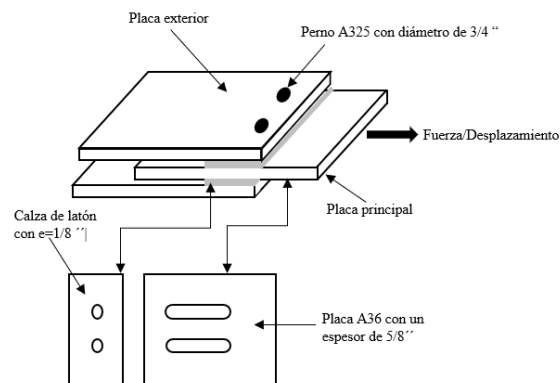


Figura 3. Diagrama esquemático de una conexión atornillada con ranuras (adaptada de Grigorian y Popov, 1993).

Tiempo después, Kar et al. (1996) propusieron un disipador a base de deslizamiento entre anillos interiores y exteriores. El deslizamiento aumentaba proporcionalmente la presión en la superficie de contacto. En la Figura 4 se observa un diagrama del dispositivo.

El dispositivo presento un comportamiento estable ante cargas cíclicas reversibles con la ventaja de ser auto entrante, permitiendo tener bajas deformaciones residuales en sistemas estructurales.

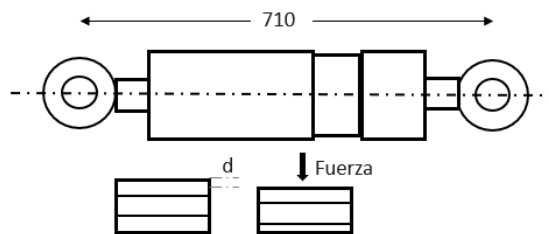


Figura 4. Disipador Shapia (adaptada de Kar et al., 1998).

Imad y Borislav (2002) presentan un estudio sobre la respuesta dinámica de marcos de acero de una sola planta equipados con un novedoso dispositivo amortiguador de fricción. Se realizaron pruebas para evaluar el material de la superficie de fricción.

Un perno pretensado conectaba las tres placas del amortiguador entre sí. Este perno ajustable se utilizaba para controlar la fuerza de compresión aplicada en las interfaces de los discos de la superficie de fricción y las placas de acero. Para mantener una fuerza de sujeción constante, se utilizaron varias arandelas de resorte de disco (arandelas Belleville). En la Figura 5 se muestra un esquema del dispositivo propuesto.

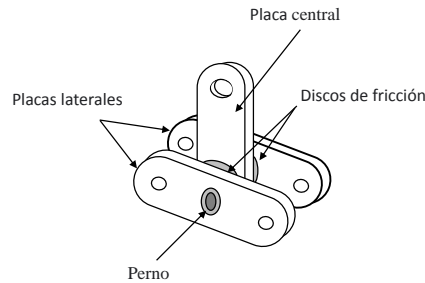


Figura 5. Componente del FDD, (adaptada de Imad, et al., 2002).

El sistema funciona ante cargas cíclicas reversibles como observa en la Figura 6. En las pruebas experimentales los desplazamientos se aplicaron con un control armónico a distintas frecuencias, y se midió el momento contra el desplazamiento angular. Con los resultados se concluyó que el sistema era efectivo para la disminución de los desplazamientos en el marco y se observaba una un comportamiento estable de las curvas de histéresis.

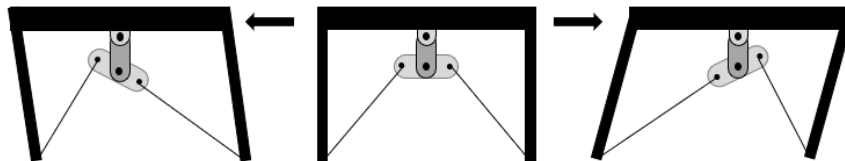


Figura 6. Funcionamiento del sistema (adaptada de Imad, et al., 2002).

Morgen y Kurama (2004) realizaron un experimento de un disipador de fricción diseñado para conexiones de concreto prefabricado. Los amortiguadores propuestos utilizaban la fricción desarrollada entre superficies metálicas adyacentes a medida que los espacios se abrían y cerraban en las interfaces viga-columna en un marco prefabricado postensado. En las figuras 7 y 8 se pueden observar tanto el arreglo del dispositivo, como la configuración del experimento realizado.

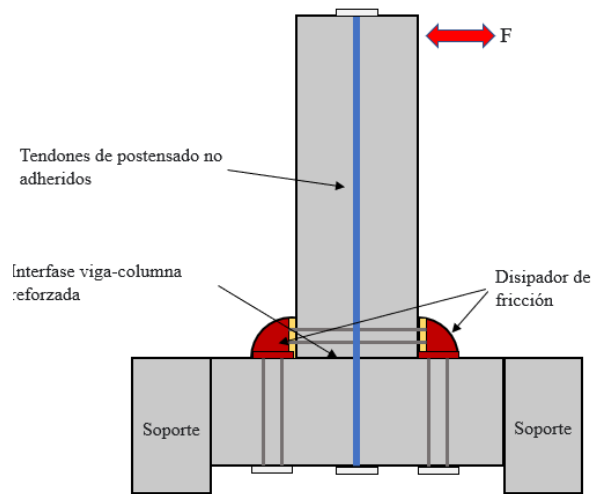


Figura 7. Arreglo experimental del dispositivo (adaptada de Morgen et al., 2004).

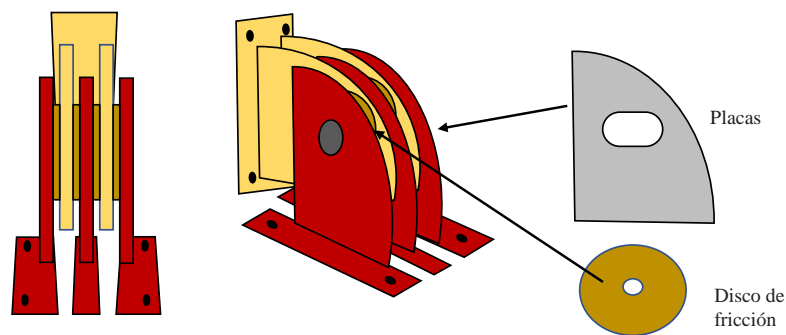


Figura 8. Componentes del dispositivo (adaptada de Morgen et al., 2004).

Se realizaron varias pruebas, con el disipador asilado y en el conjunto estructural. Se obtuvieron resultados del arreglo estructural con y sin disipadores con curvas de histéresis de momento contra rotación. En éstas se puo observar que la capacidad de disipación aumentaba considerablemente, lo que se tradujo en un buen comportamiento del dispositivo.

Años después Byoung-Wook, Min y Lee (2008) presentaron un estudio en el que se probó un sistema de amortiguador de fricción denominado SBC que utilizaba placas de latón y acero que inducían fuerzas de fricción. Se aplicaron cargas cíclicas con un actuador hidráulico a distintos niveles de desplazamiento y carga. Se obtuvieron las curvas histeréticas correspondientes, las cuales fueron comparadas con un modelo numérico de fricción de Coulumb y se observó que representaba muy bien el comportamiento experimental.

Por otro lado, Wei y Chang (2010) presentaron un disipador de fricción constante con un pistón y una camisa tubular recta. El amortiguador de fricción estaba compuesto por un tubo exterior de acero, un eje de acero, una cuña de fricción de bronce, una cuña de presión de acero, un resorte helicoidal y una tapa. El dispositivo se podía ajustar convenientemente a una magnitud deseada de fricción. En la Figura 9 se observa el arreglo del dispositivo propuesto.

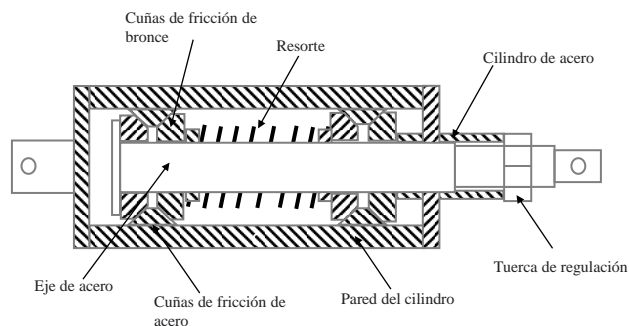


Figura 9. Disipador propuesto por Wei y Chang (adaptada de Wei y Chang, 2010).

De acuerdo con los resultados obtenidos los investigadores concluyeron que el dispositivo era efectivo, pues los ciclos histeréticos resultaron estables, además de que la fuerza reactiva de fricción tenía una relación directa con la fuerza ejercida por el resorte y ésta se podía ajustar a la demanda que necesitara el dispositivo.

En ese mismo año Zhao et al., (2010), presentan un disipador de fricción de rodillos. Este sistema constaba de un pistón dentro de una camisa de acero, el pistón tenía colocada una almohadilla de caucho, la cual tenía una pendiente. Entre el caucho y la camisa exterior se encontraba un rodillo, como se muestra en la Figura 10, que, al pasar de la zona más grande a la más pequeña por un movimiento axial del rodillo, este generaba una fricción con la camisa interior. La fuerza normal era transmitida por la deformación de la almohadilla de caucho.

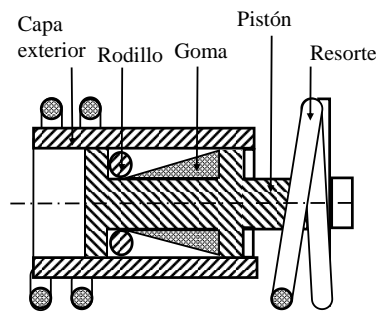


Figura 10. Disipador de fricción (adaptada de Zhao et al., 2010).

Wang et al. (2011) propusieron un amortiguador de fricción de rigidez variable con el deslizamiento, lo que permitía un aumento en la fuerza reactiva con la acumulación de desplazamiento en el dispositivo, pudiendo ajustar las fuerzas a las demandas en los elementos y a los requerimientos de desempeño del diseño. El sistema consistía en una camisa de tubular, un pistón, un resorte de goma y un conjunto de deslizadores, como se muestra en la Figura 11.

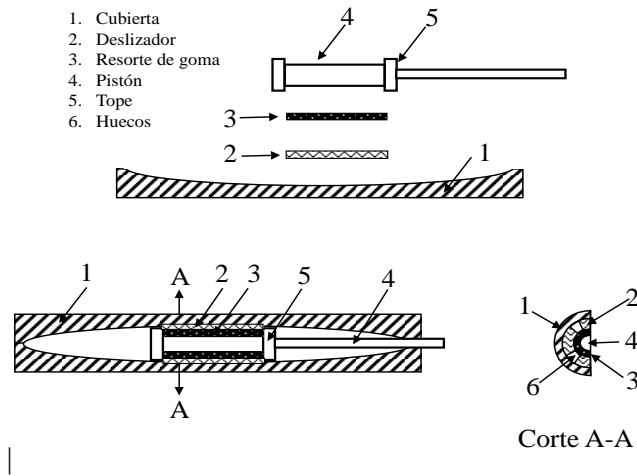


Figura 11. Configuración del dispositivo de fricción de rigidez variable (adaptada de Wang et al., 2011).

Un prototipo parecido, propuesto por Mirtaheeri (2011), constaba de dos partes principales: un cilindro interior y un cilindro exterior. Las dimensiones y propiedades de las partes principales se definen en función de la demanda sísmica de la estructura. Las dos partes se ensamblan de tal suerte que uno se encaja por contracción dentro del otro.

Su comportamiento histerético se estudió mediante métodos experimentales y numéricos. En la Figura 12 se observa un esquema del dispositivo.

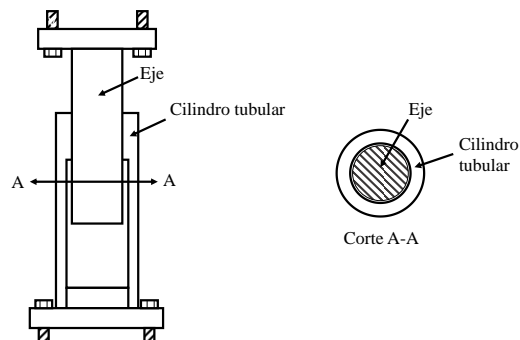


Figura 12. Dispositivo armado final (adaptada de Mirtaheeri, 2011).

También, en diversas partes de Latinoamérica, se han propuesto diversas configuraciones. Unos colegas argentinos propusieron un sistema llamado Multiple Friction Damper (MFD), el cual consistía en abrazar las columnas con una serie de anillos que transmiten el

desplazamiento y lo disipan por medio de placas. En la Figura 13 se observa el croquis de un marco rígido de concreto con las conexiones y preparaciones necesarias. Una ventaja es que no se coloca en diagonal como la mayoría de los dispositivos de disipación (Martínez, 2017).

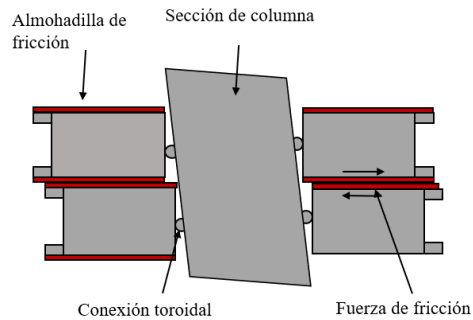


Figura 13. Dispositivo de carga axial para los anillos (adaptada de Martínez, 2017).

En la Figura 14 se observa otra propuesta de Petkovski (2017), que consistía en un montaje tipo del disipador de pared. Las conexiones ayudan a disipar energía por fricción.

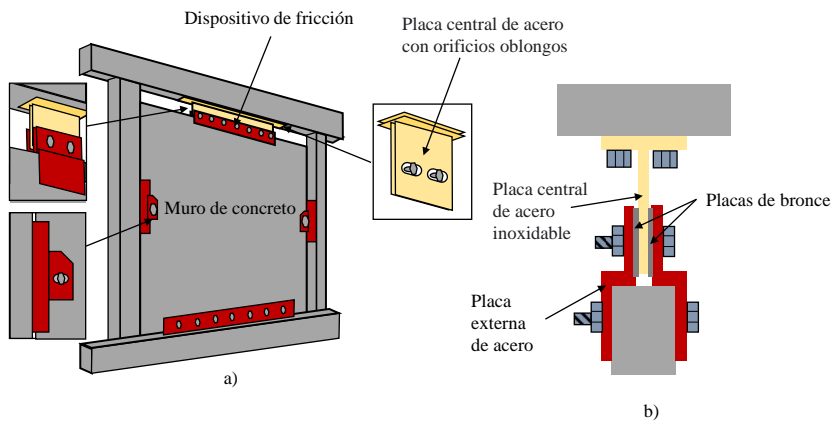


Figura 14. Vista esquemática. (a) disipador de pared de fricción, (b) dispositivo de fricción (adaptada de Petkovski, 2017).

Ramhormozian et al., (2018) desarrollaron una investigación con un modelo de disipador en conexiones viga columna, Tipo SHJ (*Sliding Hinge Joint with Asymmetric Friction Connectors*). Este dispositivo consiste en una junta semirrígida resistente a momentos que se coloca entre las vigas y columnas de un marco de acero resistente a momentos y también en la base de las columnas.

El funcionamiento físico es simple, pues se genera una superficie de fricción entre dos placas una de acero dulce y aluminio. Al generarse rotaciones en las uniones de un marco, provocadas por momentos, se generan fuerzas de fricción, que disminuyen los desplazamientos angulares y con ellos los traslacionales de la estructura.

Para finalizar la figura 15 muestra el dispositivo conocido como Ten-Co®. Se le da este nombre porque tanto la tensión como la compresión, forman un ciclo de histéresis rectangular. Los parámetros de diseño para diseñarlos son la fuerza de accionamiento y el desplazamiento axial.

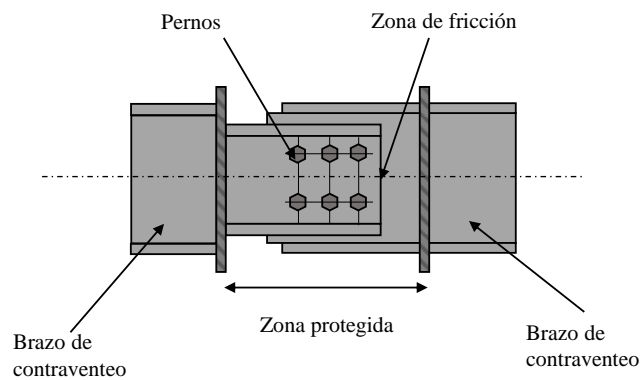


Figura 15. Disipador de fricción Ten-Co® (adaptada de Quaketek, 2018).

En general existen diversos tipos y arreglos que se han investigado y detallado en pruebas experimentales y ecuaciones de diseño. Para este proyecto de investigación se busca caracterizar el material de fricción y posterior a ello buscar el mejor arreglo posible e incluso proponer diferentes formas si los recursos lo permiten. En la mayoría de la literatura se sugiere lo siguiente:

- 1) Se deben utilizar materiales de alta dureza para que los detalles de la conexión logren estabilidad.

- 2) Los pernos deben tensarse hasta su carga de prueba para fomentar un comportamiento estable.
- 3) La colocación de contravientos o riostras son componentes fácilmente reemplazables y bajo costo.

4. Descripción de prototipos

Con base en los resultados descritos en la literatura, se propusieron ideas para la creación de un dispositivo de disipación por fricción; pues como se ha observado, éstos tienen una gran estabilidad en sus ciclos de histéresis y a diferencia de otros dispositivos pasivos histeréticos, no presentan gran degradación en sus curvas histeréticas cuando se somete a ciclos de fatiga.

En una primera etapa se desarrolló un prototipo de disipador de fricción (Figura 17), el cual imitaba el funcionamiento de un freno de disco de automóvil. Se utilizó un perfil tipo IR, al cual se le colocó un perfil canal en cada lado del alma que funcionó como mordaza. Entre las almas de los perfiles se colocan pastillas de frenado conocidas como balatas. Las almas se perforaron con agujeros oblongos para colocar pernos que le dieron la presión necesaria para generar una fuerza de fricción en función de la fuerza normal. Este disipador se denominó como DFB-01.

El funcionamiento del sistema estuvo gobernado por el deslizamiento de los perfiles canal con respecto al perfil I y por la oposición de la fuerza de fricción provocada por las balatas y el alma del perfil I. El desplazamiento máximo del sistema estuvo limitado por la longitud de los agujeros, sobre los cuales se deslizaban el perno. En las figuras 16 y 17 se pueden observar esquemas del prototipo del disipador y, en la Figura 18, una imagen del disipador real montado para su ensaye en laboratorio.

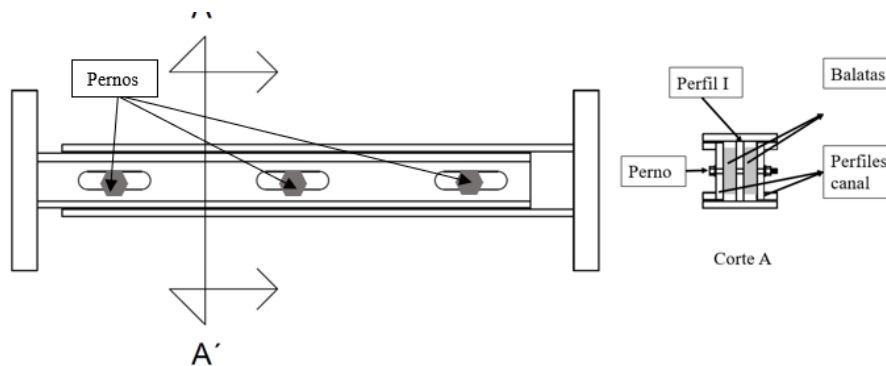


Figura 16. Esquema del prototipo DFB-01.

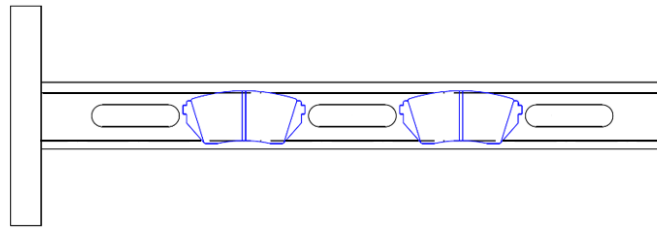


Figura 17. Vista lateral de perfil canal con balatas del disipador DFB-01.



Figura 18. Imagen de disipador prototipo para prueba de laboratorio.

Dentro de la investigación se propusieron otras opciones entre los que figuraban el uso materiales cerámicos para la superficie de fricción. Una de estas opciones fue el material llamado alúmina, formado de óxido de aluminio, que tiene gran dureza y resistencia. Sin embargo, los costos de fabricación del material se elevaban considerablemente lo que lo volvía poco sustentable al prototipo.

Otro de los materiales considerados fue el concreto, el cual tiene un buen comportamiento en compresión, facilidad de fabricación y bajo costo, en comparación a otros materiales. Considerando eso, se diseñó el prototipo de un disipador de fricción hecho de concreto, el cual consistió en tres placas de concreto que se encontraban cara a cara para generar superficies de fricción. Se propusieron agujeros oblongos para, por medio de pernos, aplicar carga normal a las placas y generar una fuerza de fricción.

El disipador fue diseñado para usarse en forma de contraventeo en marcos, al ser esta una estructura común. El sistema consta de: dos placas de concreto conectadas a uno de los nodos del marco, y la tercera conectada al nodo opuesto a la diagonal, como se muestra en la Figura 19.

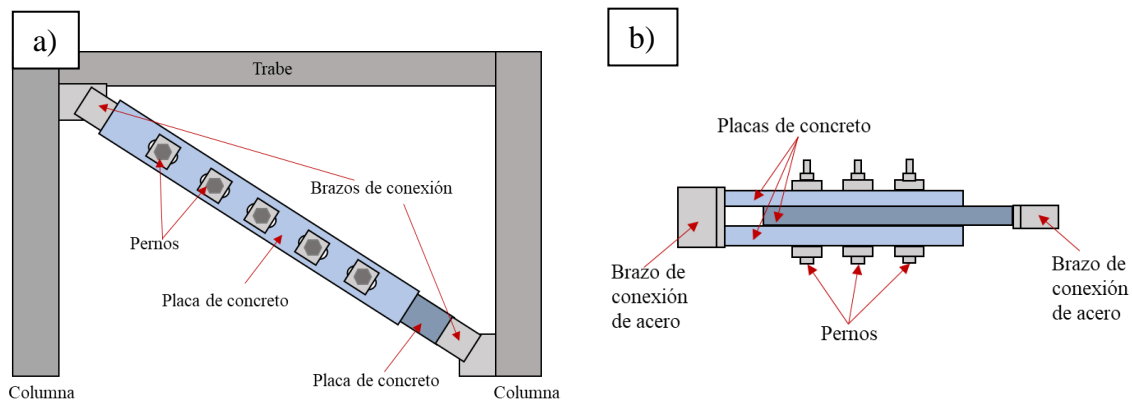


Figura 19. a) Marco equipado con disipador; b) Detalle de vista superior del dispositivo.

Se construyeron cuatro dispositivos con la misma configuración general, pero con características geométricas y en el armado distintas. En la Tabla 1, se presentan los nombres asignados a cada prototipo y su descripción. Se puede ver que, de los cuatro dispositivos, tres son iguales en su geometría, todos con 1m de longitud total y con un armado similar como se describirá más adelante. Estos dispositivos se ensayaron de manera aislada a diferencia del restante. Éste último tenía una geometría diferente a los otros tres, siendo su longitud de dos metros y un armado distinto.

Tabla 1. Descripción de los prototipos de concreto

Nombre	Descripción
DFC-01	Prototipo de tres placas de concreto, con un marco de soleras de acero como soporte de tensiones previas a la activación del dispositivo. Longitud total del dispositivo igual a 2 m. Superficie seca.
DFC-02	Prototipo de tres placas de concreto, con barras de acero embebidas como soporte de tensiones previas a la activación del dispositivo. Longitud total del dispositivo igual a 1m. Superficie seca.
DFC-03	Prototipo de tres placas de concreto, con barras de acero embebidas como soporte de tensiones previas a la activación del dispositivo. Longitud total del dispositivo igual a 1 m. Superficie lubricada.
DFC-04	Prototipo de tres placas de concreto, con barras de acero embebidas como soporte de tensiones previas a la activación del dispositivo y con armado transversal en forma de estribos. Se colocaron placas de aluminio como superficie de fricción. Longitud del dispositivo igual a 1m.

En la Figura 20 se muestra la placa tipo del prototipo DFC-01, la cual consta de conexión metálica; un bastidor de soleras tipo marco para los esfuerzos de tensión y una placa de concreto que funciona como superficie de fricción.

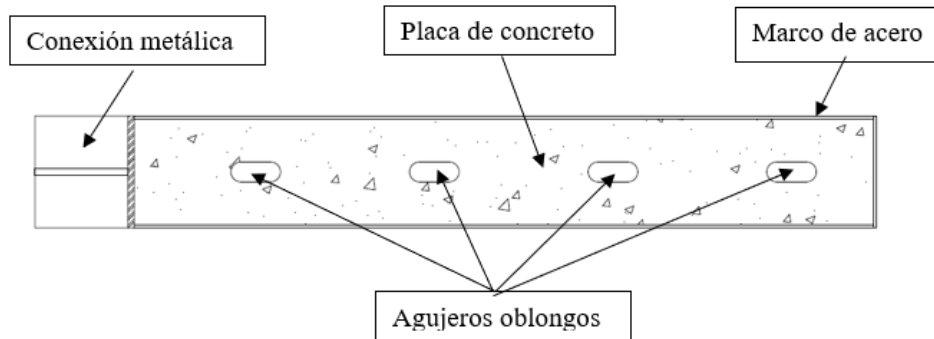


Figura 20. Placa tipo del dissipador de fricción.

Por otro lado, los tres prototipos restantes, estaban con la misma configuración, pero con diferencias en el armado de las placas de concreto. Dichas placas tenían barras roscadas de acero que funcionan como acero longitudinal y se encargaban de soportar las tensiones. En el dispositivo DFC-04 se adicionaron grapas de alambroón en forma de estribos para aumentar el confinamiento y los esfuerzos de corte. En la Figura 21 se muestra un esquema de la configuración de dispositivos y en la Figura 22 las placas que componían al dispositivo.

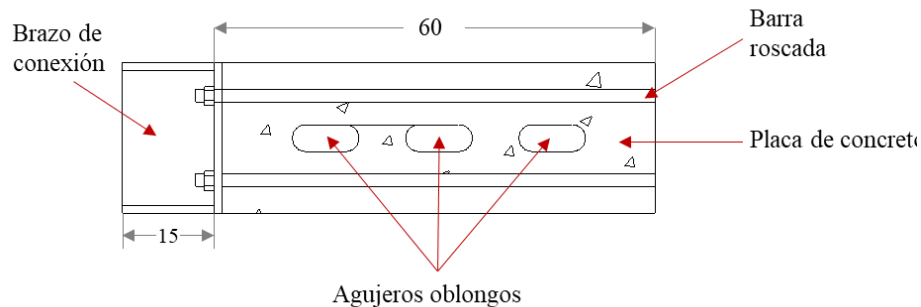


Figura 21. Esquema de placa tipo de prototipos DFC-02, DFC-03 y DFC-04, dimensiones en cm.



Figura 22. Placas tipo de prototipos DFC-02, DFC-03 y DFC-04.

4.1 Geometría.

Como ya se mencionó, se fabricaron 5 dispositivos diferentes, de los cuales 3 (DFC-02, DFC-03 y DFC-04) tienen la misma configuración geométrica; misma longitud y espesor de placas, barras roscadas embebidas en las placas de concreto, pero con algunas diferencias en el armado que se mencionaran más adelante, a diferencia del dispositivo DFC-01 que consta de soleras de acero como refuerzo a la tensión, una mayor longitud, grosor de placa y número de pernos.

El dispositivo restante fue diferente a todos los demás, al ser el único que fue fabricado totalmente de acero con placas de frenado llamadas balatas, como superficie de fricción. A continuación se describe la geometría de cada uno de ellos.

El prototipo DFB-01 estuvo formado por una sección tipo I con dos secciones cajón las cuales formaban un arreglo tipo “sándwich”, provocando que las balatas (que se representan en la figura 23) estuvieran en contacto con el alma de la sección I. La geometría de las placas y el dispositivo armado se muestra figuras 24 y 25, y en la Figura 26 se muestran fotografías del prototipo.

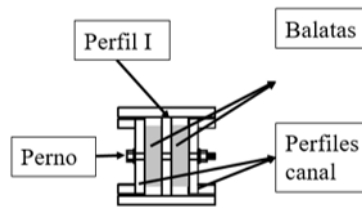


Figura 23. Arreglo de prototipo DFB-01.

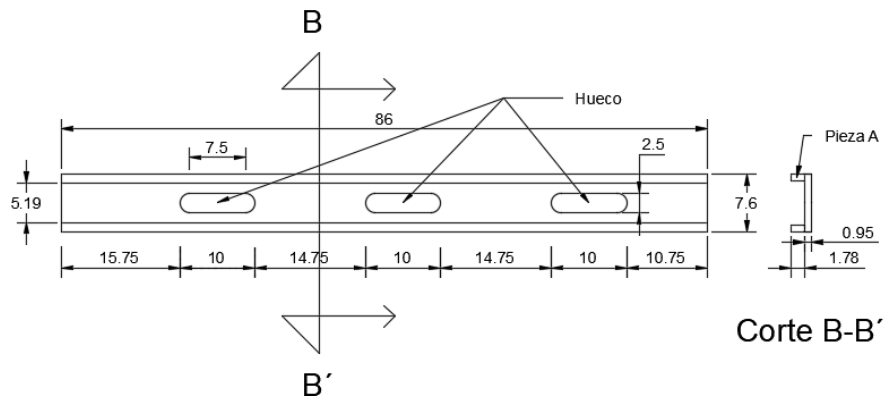


Figura 24. Geometría de la sección C del prototipo DFB-01 (dimensiones en cm).

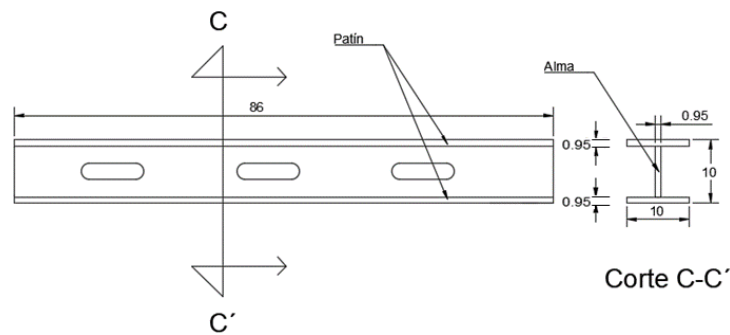


Figura 25. Geometría de la sección I, prototipo DFB-01 (dimensiones en cm).



Figura 26. Fotografías del prototipo DFB-01 durante el proceso de fabricación.

Para el prototipo DFC-01, la placa tipo de concreto tenía una longitud de 149 cm y estaba formado por un marco de soleras y una placa de concreto armado. Los agujeros oblongos tenían 10 cm en su dimensión larga, lo que representa un desplazamiento de ± 50 mm (menos la mitad del diámetro del perno) en el dispositivo.

La carga axial que dotaba al prototipo de la fuerza de fricción fue aplicada a través de pernos y por medio de placas de acero en un arreglo tipo “sándwich”. En la Figura 27 se muestra la placa con dimensiones, y en la Figura 28 el prototipo armado. La Figura 29 muestra fotografías del prototipo DFC-01 durante el proceso de fabricación.

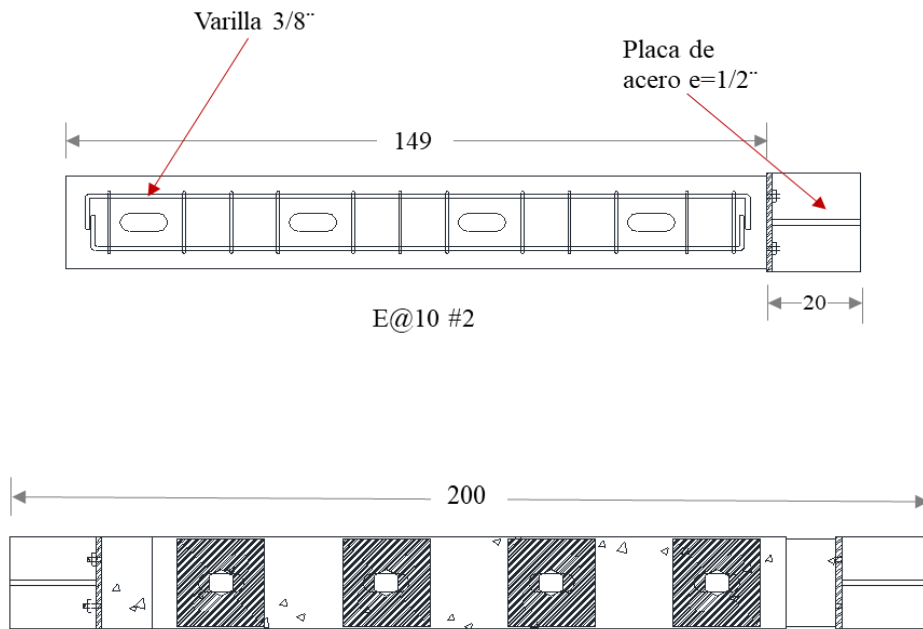


Figura 27. Dimensiones en cm, del prototipo DFC-01.

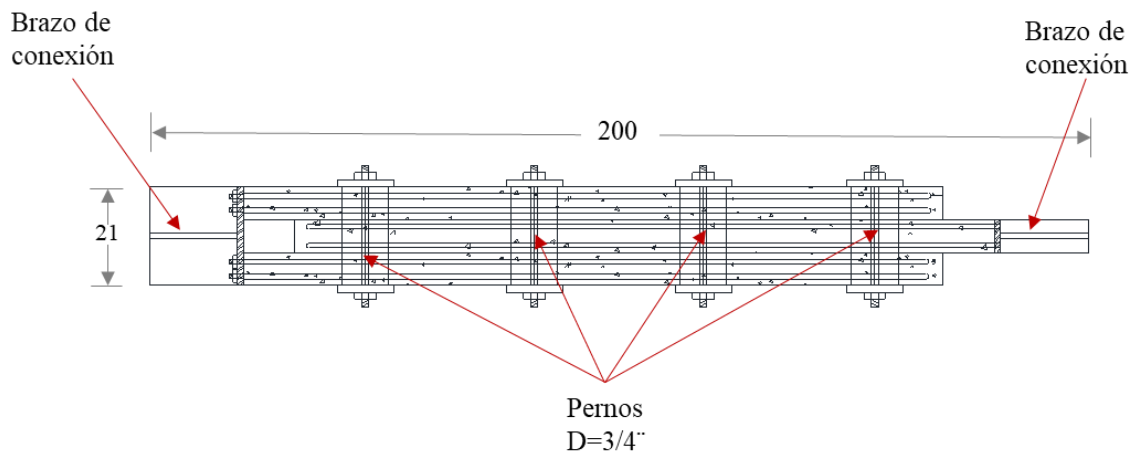


Figura 28. Vista en planta y lateral del prototipo (dimensiones en cm).



Figura 29. Fotografías del prototipo DFC-01 durante su fabricación.

Para los prototipos DFC-02 y DFC-03 la placa tipo de concreto tenía una longitud de 60 cm y está formado por dos barras roscadas embebidas en el concreto armado. Las placas tenían agujeros oblongos de 10 cm en su dimensión larga.

La carga normal que dotaba al prototipo de fuerza de fricción fue aplicada por medio de pernos y placas metálicas en un arreglo tipo “sándwich” apretado con tuercas. En la Figura 30 se muestra la placa de concreto con sus dimensiones. En la Figura 31 se presenta esquemáticamente el prototipo ensamblado, mientras que la Figura 32 muestra una fotografía.

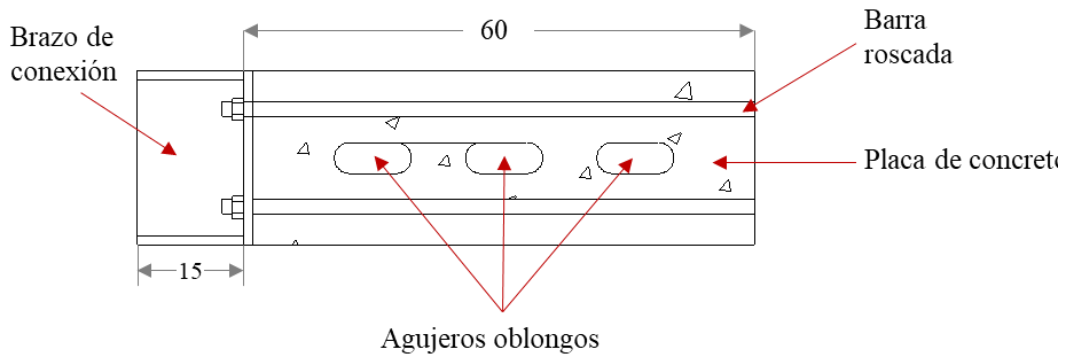


Figura 30. Placa de concreto del prototipo DFC-02 y DFC-03 (dimensiones en cm).

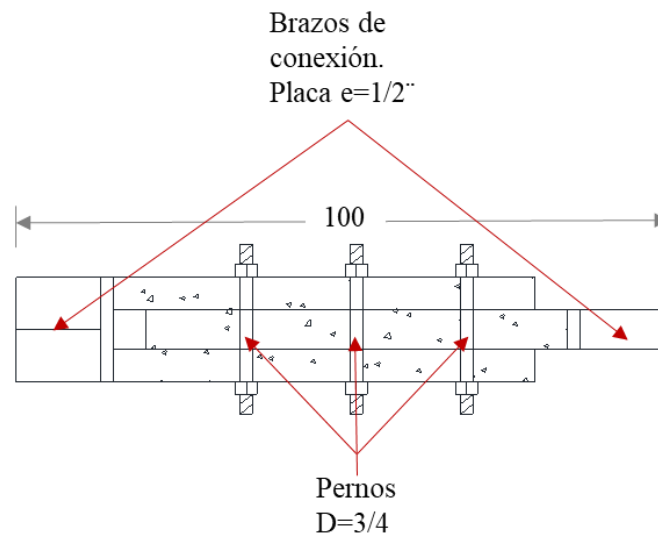


Figura 31. Ensamble de los prototipos DFC-02 y DFC-03 (dimensiones en cm).



Figura 32. Fotografía del prototipo DFC-02 ensamblado.

El prototipo DFC-04 tenía la misma configuración que los prototipos DFC-02 y DFC-03 pero se realizó la integración de placas de aluminio con resina epóxica, que fungen como superficie de fricción. En las figuras 33 y 34 se muestran fotografías con el prototipo y la colocación de placas de aluminio.



Figura 33. Preparación para la colocación de placas de aluminio en el prototipo de concreto DFC-04.



Figura 34. Prototipo DFC-04 con placas de aluminio colocadas.

4.2 Materiales

Para el prototipo DFB-01 se utilizaron placas de acero A-36 y balatas de superficie cerámica.

Para el dispositivo DFC-01 el material elegido como superficie de contacto fue el concreto, el cual fue reforzado con cuatro barras del número 3 con resistencia nominal a la fluencia de $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ y estribos a cada 10 cm.

El concreto fue dosificado para lograr una resistencia nominal de $f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$ y se reforzó con fibras de acero de la marca Sika, con una dosificación de 30 kg por metro cúbico. El refuerzo de fibras tiene la función de satisfacer la demanda de esfuerzos de tensión provocadas en el concreto por la fricción. El bastidor perimetral de las placas de concreto para tensión estuvo formado por soleras de acero ASTM-A36.

Para los dispositivos DFC-02, DFC-03 y DFC-04, las placas de fueron fabricadas de mortero (grout) con una resistencia nominal de $f'_c= 800 \text{ kg/cm}^2$, también se la agregó una dosificación

de fibras de acero de 30 kg por metro cúbico. Las barras roscadas fueron de acero ASTM A7. La Figura 35 muestra una fotografía del proceso de fabricación del prototipo DFC-04. Se observa la colocación de las fibras durante el colado del mortero.



Figura 35. Fotografía del proceso de fabricación del prototipo DFC-04.

5. Pruebas experimentales

Las pruebas experimentales se realizaron en el Laboratorio de estructuras y materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM y en Laboratorio de estructuras grandes del Centro nacional de prevención de desastres.

Se realizaron pruebas a los cinco prototipos fabricados. Se usaron dos configuraciones distintas. Mientras que el dispositivo DFC-01 se probó como contraventeo en un sistema estructural formado por un marco de concreto, al cual se la aplicaron cargas cíclicas laterales; los dispositivos DFB-01, DFC-02, DFC-03 y DFC-04, se probaron de manera aislada, en un marco de carga que aplicó únicamente carga axial a los dispositivos. Las configuraciones y protocolos se detallan en las siguientes secciones.

5.1 Protocolos de pruebas experimentales

El dispositivo DFB-01 se probó en un marco de carga montado en el laboratorio de estructuras y materiales del II-UNAM. Se realizaron siete pruebas con diferentes ciclos y amplitudes.

Tres pruebas se realizaron con una carga normal por perno de 1.25 t resultando un total de 3.75. Para las pruebas restantes se duplicó la carga axial a 7.5 t (2.5 t por perno) y se realizaron pruebas de desgaste con 50 ciclos.

La Tabla 2 muestra el protocolo de carga del dispositivo DFB-01.

Tabla 2. Protocolo de pruebas del dispositivo DFB-01.

Clave de prueba	Ciclos	Desplazamiento máximo, mm	Carga axial (3 pernos, t)	Observaciones
DFB-01-1	2	1	3.75	Rampas con amplitud 1 mm
DFB-01-2	2	3	3.75	Rampas con amplitud 2.5 mm
DFB-01-3	14	30	3.75	Protocolo con incremento en rampas
DFB-01-4	14	20	7.5	Protocolo con incremento en rampas
DFB-01-5	20	30	7.5	Protocolo sinusoidal 1 con $f=0.5$ hz
DFB-01-6	50	20	7.5	Protocolo sinusoidal 2 con $f=0.25$ hz
DFB-01-7	50	20	7.5	Protocolo sinusoidal 2 con $f=0.25$ hz

Para la prueba con el prototipo DFC-01 el sistema constó de un marco de concreto reforzado, el cual fue reforzado con un marco interno de acero. Este marco se conectó a un gato hidráulico de 100 t de capacidad, que le aplicó cargas laterales. Se consideró también la aplicación de una carga vertical de 15 t sobre el marco la cual permaneció constante durante la prueba.

El experimento constó de al menos dos pruebas. La primera de ellas contempló el ensaye del marco sin disipador, para caracterizar la estructura principal. Se realizó una segunda prueba en la que se aplicaron cargas cíclicas reversibles incrementales al marco equipado con el disipador, realizando con una carga normal de 5 t en cada uno de los pernos para llegar a 20t. Esto se hizo para poder determinar con certeza el coeficiente de fricción y su relación con la carga normal en el disipador.

En el experimento se utilizó el protocolo de desplazamientos que se presenta en la Figura 36.

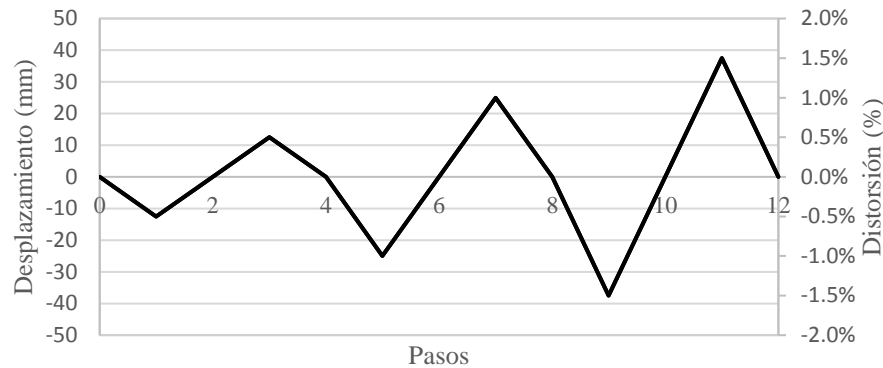


Figura 36 Protocolo de desplazamientos para las pruebas para prototipo DFC-01

Para los prototipos DFC-02, DFC-03 y DFC-04 se realizaron una serie de pruebas a diferentes frecuencias, con amplitudes de desplazamiento de 10 y 30 mm con diferentes niveles de carga normal. En las tablas 3, 4 y 5 se muestran los protocolos de carga aplicados a los especímenes.

Se puede ver que en las tablas 3, 4 y 5 las claves de cada prueba con la información correspondiente a cada una, tal como el número de ciclos, la fuerza normal del sistema, el desplazamiento objetivo y la forma del movimiento.

Tabla 3. Protocolo de pruebas para el prototipo DFC-02.

Clave de prueba	Ciclos	Desplazamiento máximo, mm	Fuerza normal (3 pernos, t)	Observaciones
DFC-02-1	2	10	4.5	Protocolo sinusoidal con $f=0.25$ hz
DFC-02-2	2	10	4.5	Protocolo sinusoidal con $f=0.25$ hz
DFC-02-3	2	10	4.5	Protocolo sinusoidal con $f=0.5$ hz
DFC-02-4	2	30	4.5	Protocolo sinusoidal con $f=0.25$ hz
DFC-02-5	2	10	4.5	$f=0.5$ Hz
DFC-02-6	30	30	4.5	Protocolo sinusoidal con $f=0.5$ hz
DFC-02-7	30	30	4.5	Protocolo sinusoidal con $f=0.5$ hz

Tabla 4. Protocolo de pruebas para el prototipo DFC-03.

Clave de prueba	Ciclos	Desplazamiento máximo, mm	Fuerza normal (3 pernos, t)	Observaciones
DFC-03-1	6	5	6	Protocolo sinusoidal con $f=0.5$ hz
DFC-03-2	6	5	6	Protocolo sinusoidal con $f=0.5$ hz
DFC-03-3	6	5	6	Protocolo sinusoidal con $f=0.5$ hz
DFC-03-4	6	5	6	Protocolo sinusoidal con $f=0.5$ hz
DFC-03-5	60	10	6	Protocolo sinusoidal con $f=0.5$ hz

Tabla 5. Protocolo de pruebas para el prototipo DFC-04.

Clave de prueba	Ciclos	Desplazamiento máximo, mm	Fuerza normal (3 pernos, t)	Observaciones
DFC-03-1	1	10	6	Carga incremental
DFC-03-2	2	20	6	Carga incremental

5.2 Configuración del experimento

Primero para las pruebas del dispositivo PFC-01 se utilizó un marco de concreto reforzado al que se le aplicaron cargas cíclicas reversibles por medio de gato hidráulico de 100 t de capacidad y una trabe metálica muy rígida. En la Figura 37 se muestra la configuración del sistema.

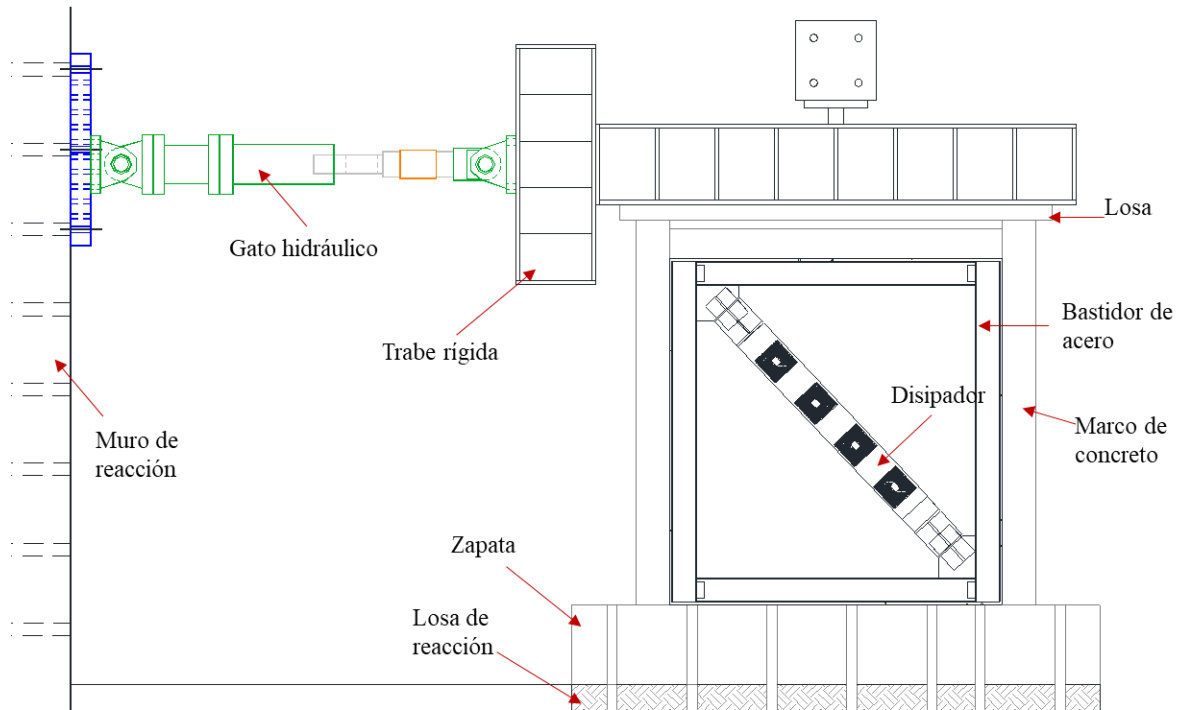


Figura 37. Configuración del experimento para el prototipo DFC-01.

Para los prototipos DFB-01, DFC-02, DFC-03 y DFC-04 se utilizó un sistema de un marco de carga conectado a un actuador servohidráulico MTS. La configuración física se muestra en la Figura 38. Se puede observar que el actuador induce una fuerza axial al prototipo la cual a su vez genera un desplazamiento relativo entre las placas de concreto al llegar la fuerza de activación. Antes de eso el comportamiento está gobernado por la rigidez de los brazos conectores.

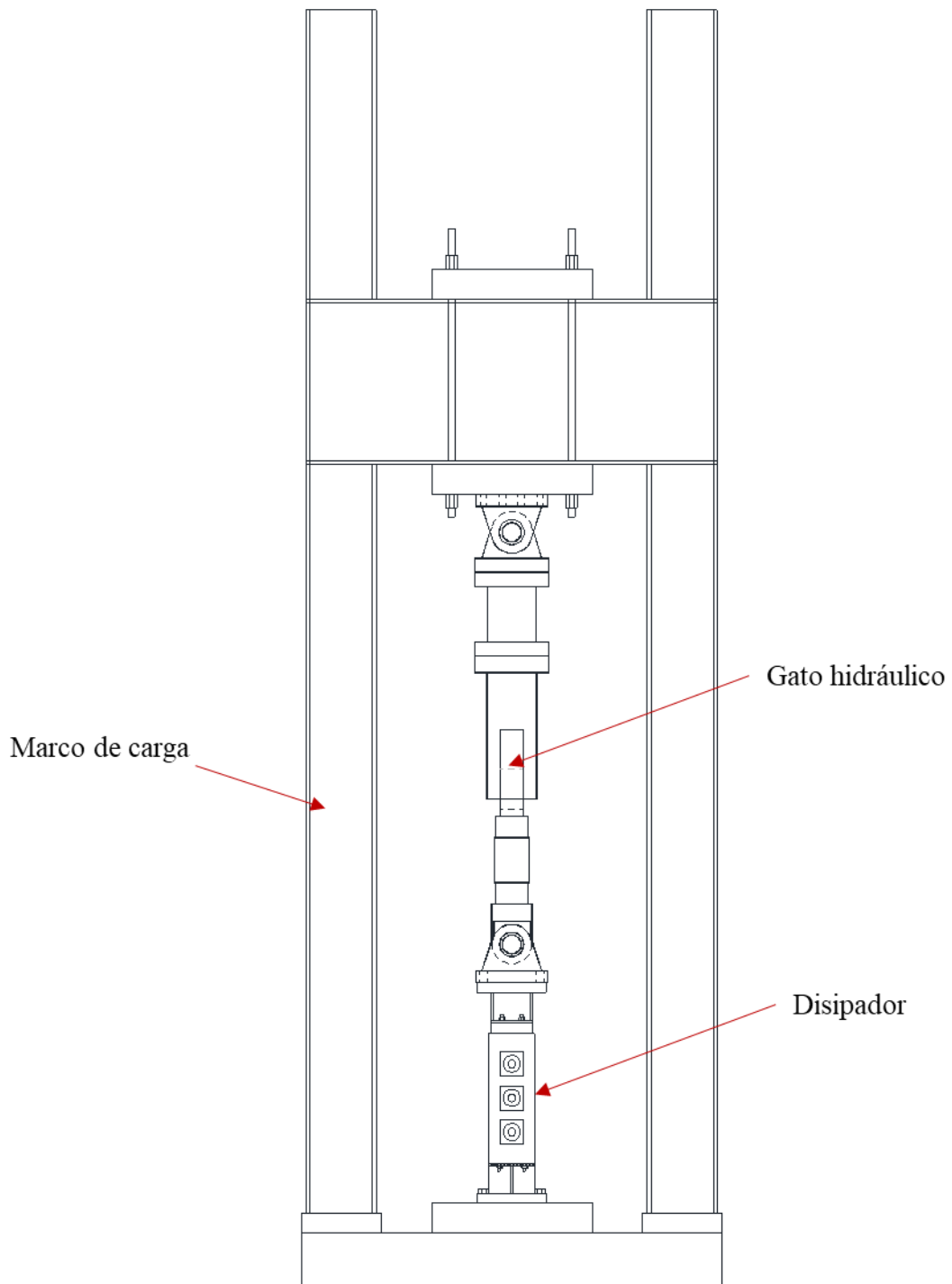


Figura 38. Configuración general para prototipos DFB-01 DFC-02, DFC-03 y DFC-04.

5.3 Instrumentación

El dispositivo DFB-01 se instrumentó con un transductor de desplazamiento LVDT colocado debajo de la placa engarzada al gato, para medir los desplazamientos axiales, como se muestra en la Figura 40. Este se conectó al sistema de adquisición de datos del actuador MTS.

Adicional a esto, se utilizaron galgas extensiométricas en los pernos del espécimen. con la intención de medir las deformaciones inducidas por la fuerza aplicada por el torquímetro y las variaciones que estas tengan durante los ciclos reversibles de carga. Se colocó una galga por perno (Ver Figura 39 a) y se conectaron a un adquisidor de datos TDS (Figura 39 b). En la Figura 40 se muestra el dispositivo montado.

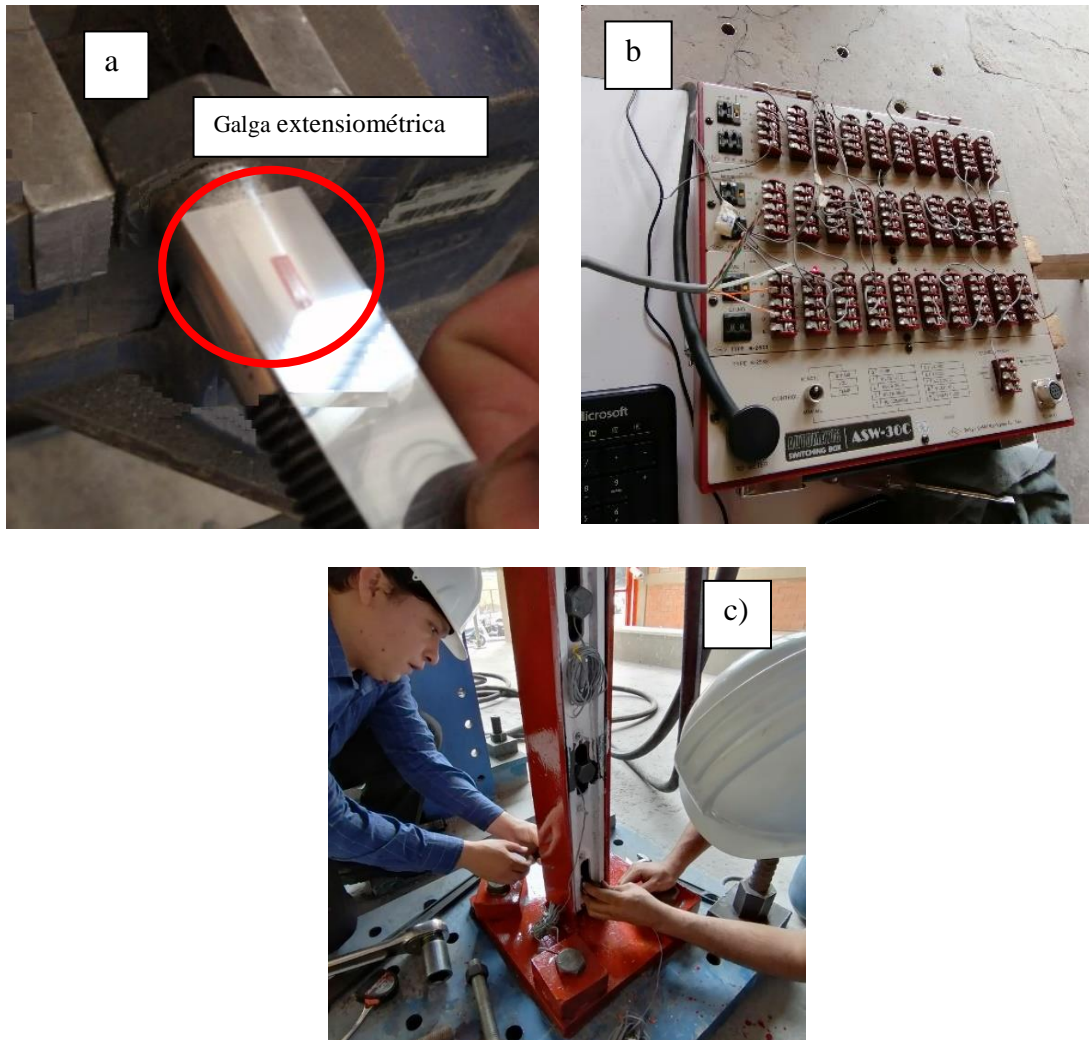


Figura 39. Instrumentación de pernos A325. a) Colocación de galga en el perno; b) Sistema de adquisición de datos TDS; c) Colocación de los pernos instrumentados.

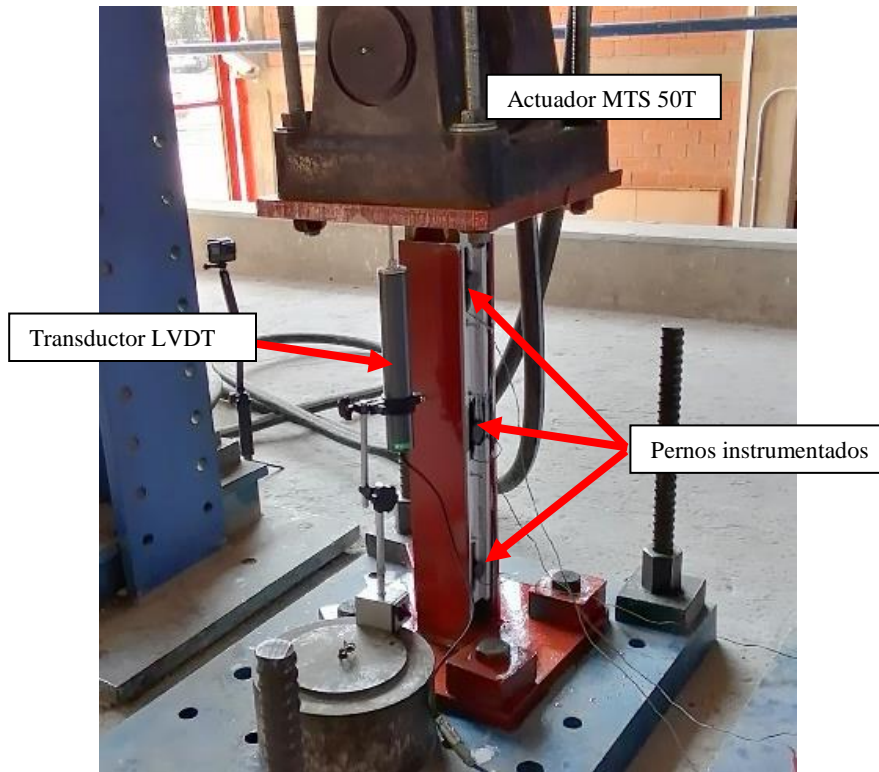


Figura 40. Disipador DFB-01 montado e instrumentado.

Para el dispositivo DFC-01, la instrumentación se conformará principalmente por dos transductores de desplazamiento tipo CDP. El CDP 1 fue el transductor de control y los CDP 7 y 8 midieron el desplazamiento relativo en el disipador, los otros CDP se colocaron por redundancia. Por otra parte, se utilizarán cinco celdas de carga, una para medir la carga vertical aplicada al marco, y las cuatro restantes midieron la fuerza normal en los pernos de presión del disipador. También se colocaron galgas extensiométricas en las conexiones del disipador al marco. En la Figura 41 se muestran de manera esquemática los instrumentos utilizados. En color azul se muestran los transductores de desplazamiento y en verde las celdas de carga. Las figuras 42 y 43 muestran fotografías del experimento.

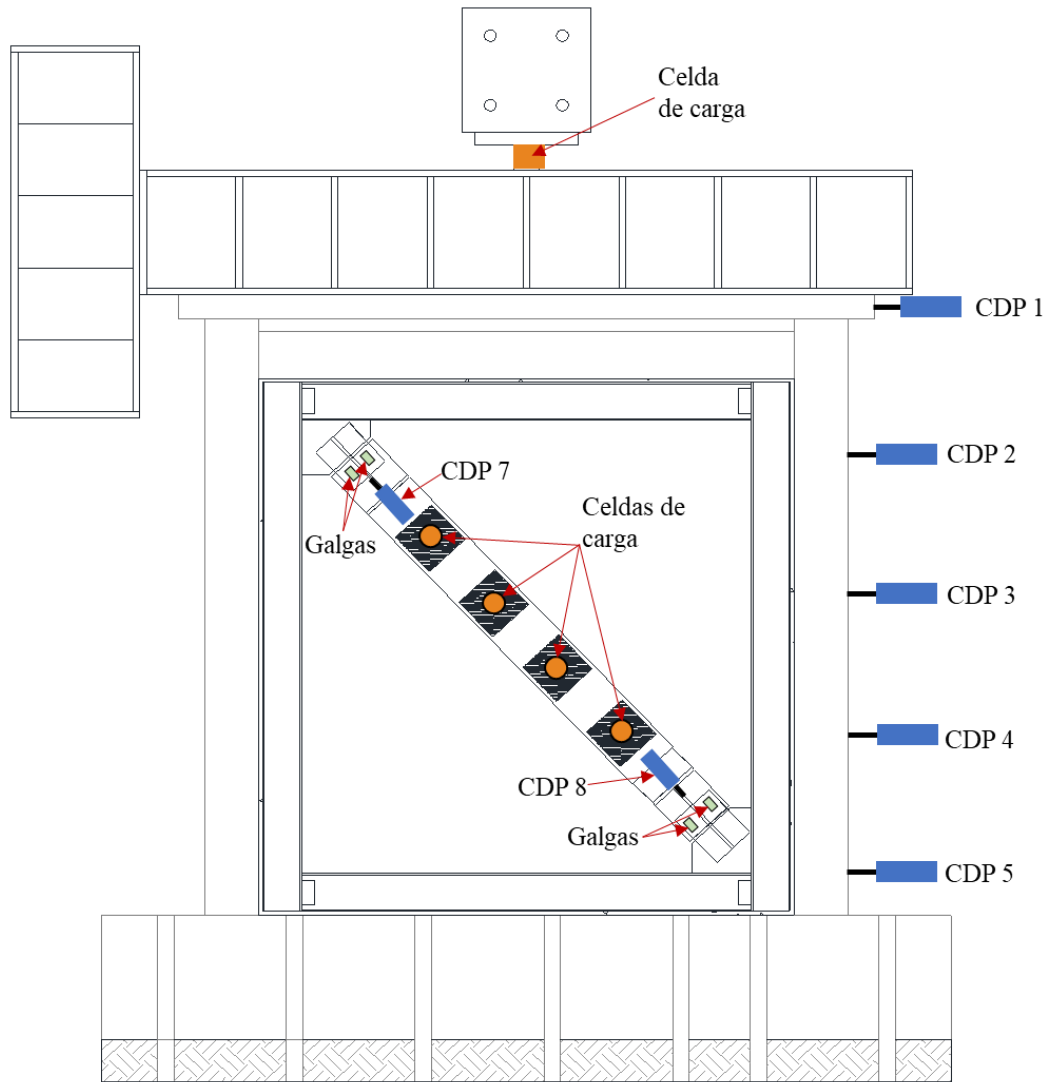


Figura 41. Instrumentación para pruebas con el prototipo DFC-01.

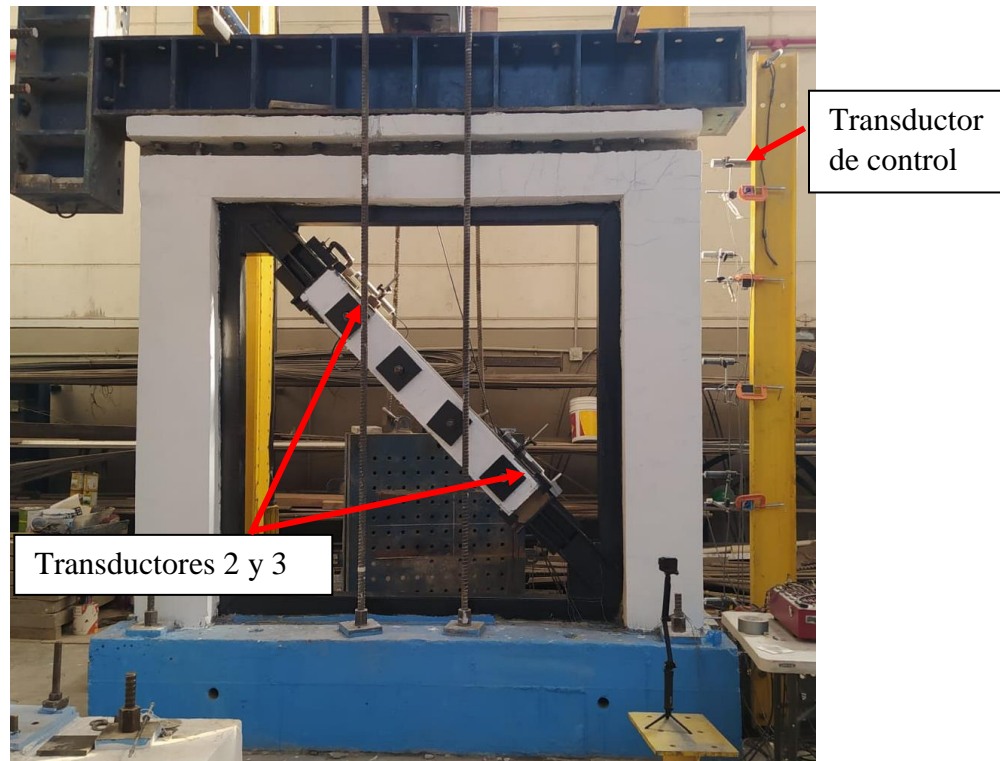


Figura 42. Ubicación de transductores de control para las pruebas del prototipo DFC-01.

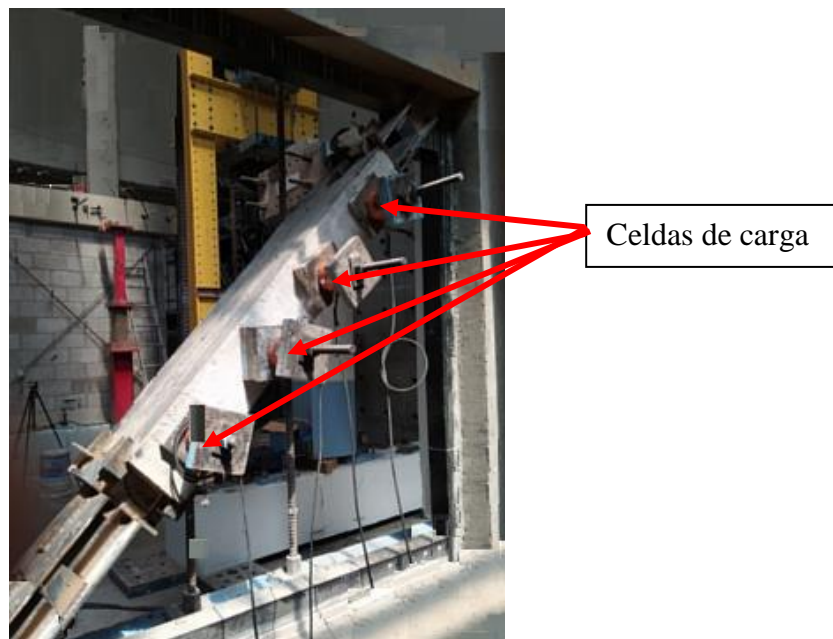


Figura 43. Ubicación de celdas para las pruebas del prototipo DFC-01.

Para las pruebas de los dispositivos DFC-02, DFC-03 y DFC-04 se utilizó únicamente el transductor de desplazamiento interno del actuador MTS y su celda de carga para la fuerza. Para la carga axial en los pernos se utilizaron celdas de carga de 50 t de capacidad. En la Figura 44 se puede observar la configuración física de los instrumentos y en la Figura 45 una fotografía con los instrumentos montados.

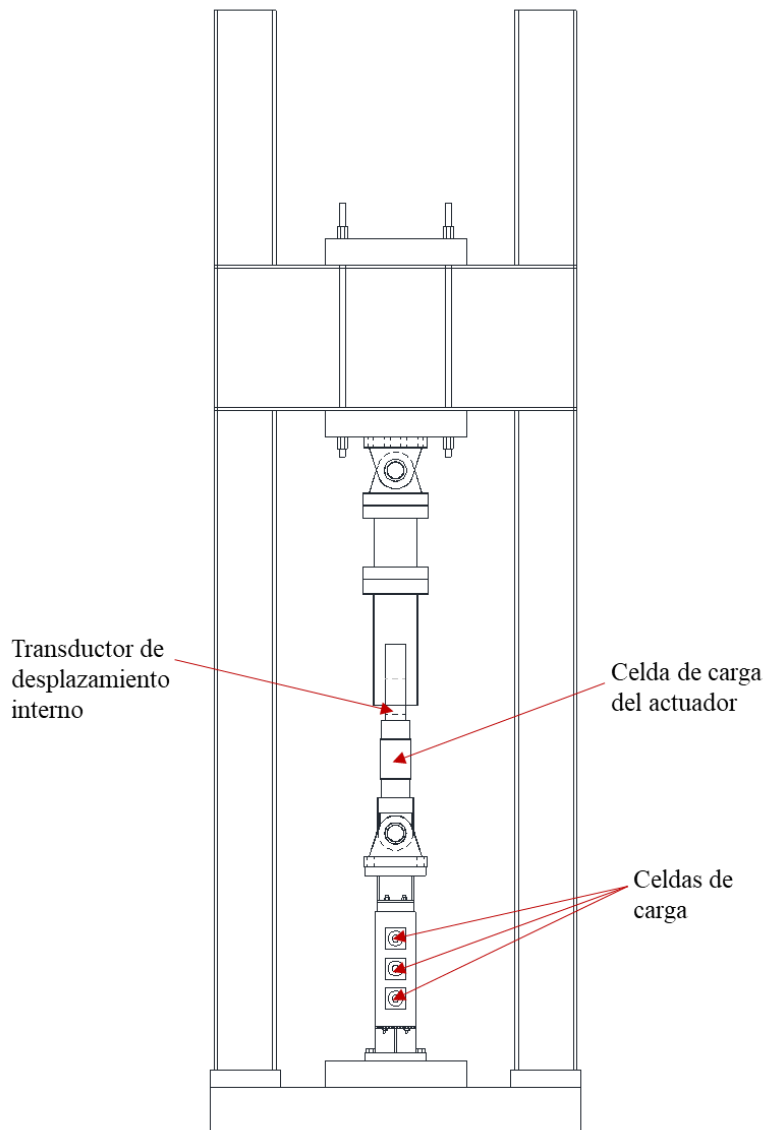


Figura 44. Instrumentación de dispositivos DFC-02, DFC-03 y DFC-04.

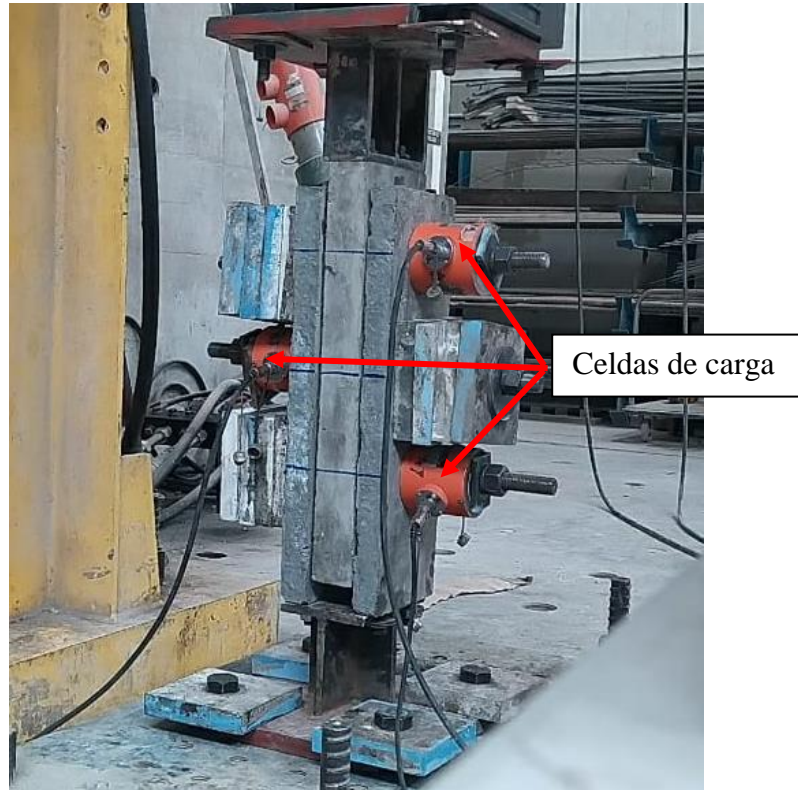


Figura 45. Fotografía de la instrumentación para las pruebas de los prototipos DFC-02, DFC-03 y DFC-04.

6. Resultados experimentales

6.1 Prototipo DFB-01

Realizadas las pruebas del protocolo, se obtuvieron las curvas carga-desplazamiento para observar el comportamiento histerético. La Figura 46 muestra dichas curvas. Se observa un comportamiento estable y rectangular típico de los sistemas de fricción.

En la prueba DFB-01-1 se observa que en la primera rampa de carga tiene un comportamiento lineal, correspondiente a la rigidez del sistema de conexión, llegando a una carga de 1.4 t justo en el punto de activación. Posteriormente se estabilizó la carga en 1.03 t, que corresponde a la fuerza de fricción con la que trabaja el prototipo. Este fenómeno se explica con el concepto de fricción estática y dinámica, donde la fricción estática tiende a ser mayor antes de romper la inercia. Todo el movimiento después de la ruptura de la inercia está gobernado por la fricción dinámica.

En las demás pruebas se observa un comportamiento muy estable, salvo en la prueba DFB-01-3 donde se presentó un pico en la carga del último ciclo, ocasionado por el contacto una de las placas con un perno.

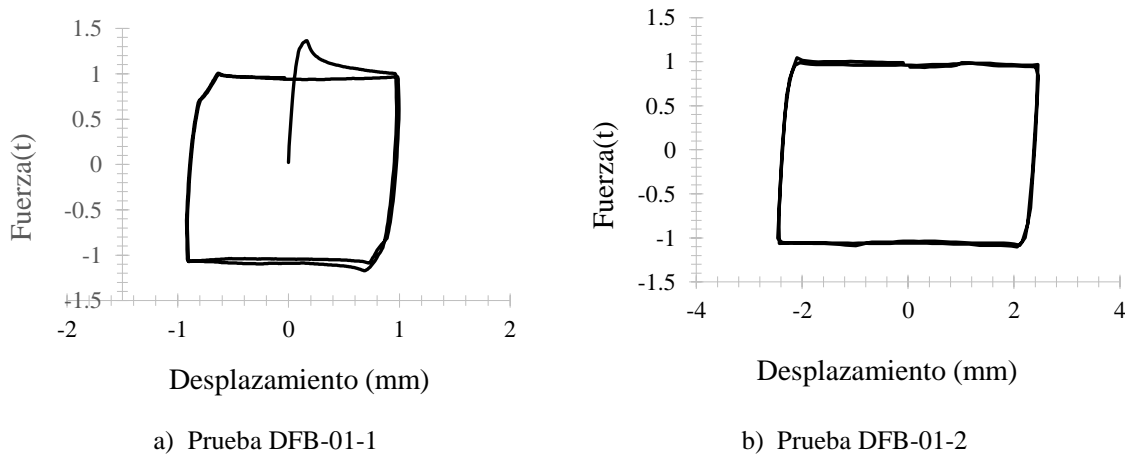
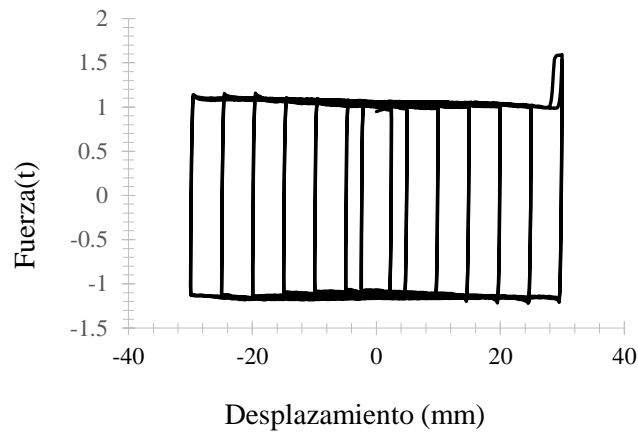
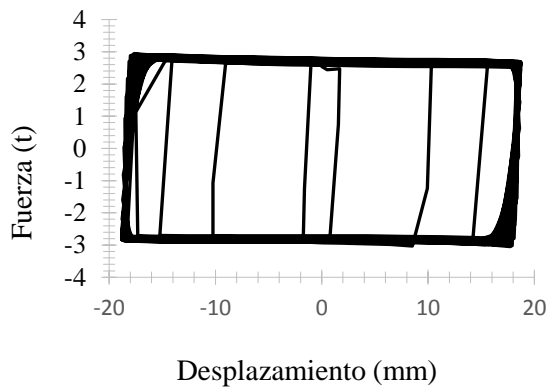


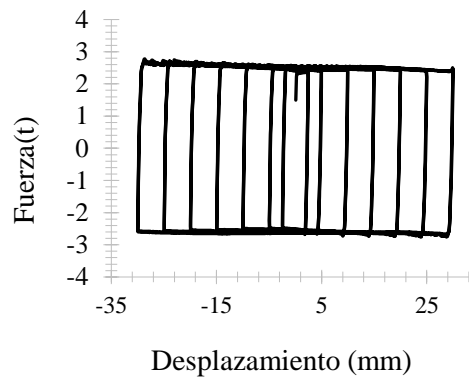
Figura 46. Curvas histeréticas del dispositivo DFB-01 (continua).



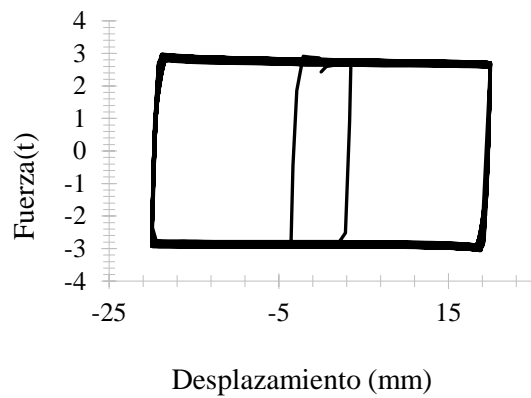
c) Prueba DFB-01-3



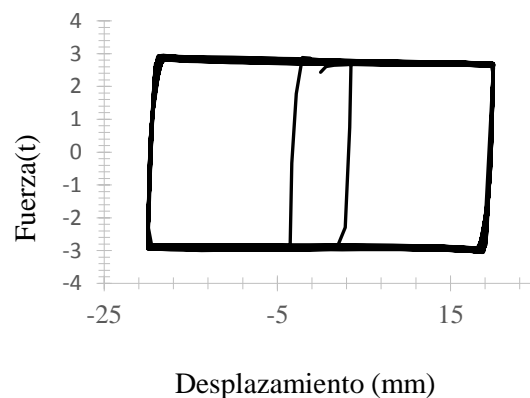
d) Prueba DFB-01-4



e) Prueba DFB-01-5



f) Prueba DFB-01-6



g) Prueba DFB-01-7

Figura 46. Curvas histeréticas del prototipo DFB-01.

Se determinó la fuerza de activación del dispositivo y se calculó su coeficiente de fricción. En la Tabla 6 se muestra el resumen de los resultados y el coeficiente promedio el cual es aproximadamente de 0.33. Se observa que el coeficiente aumentó de manera directa con la carga normal, esto se puede atribuir a que, al tener superficies con imperfecciones y aumentar la fuerza de presión entre ellas, más partículas entran en contacto entre sí generando un coeficiente más alto que con menor presión.

Tabla 6. Resultados promedio de fuerza de activación y coeficiente de fricción.

Prueba	Fuerza normal, t	Fuerza de activación promedio	Coeficiente de fricción
DFB-01-1	3.75	1.03	0.275
DFB-01-2	3.75	1.02	0.272
DFB-01-3	3.75	1.02	0.272
DFB-01-4	7.5	2.8	0.373
DFB-01-5	7.5	2.82	0.376
DFB-01-6	7.5	2.91	0.388
DFB-01-7	7.5	2.9	0.387
Promedio			0.334

6.2 Prototipo DFC-01

Se obtuvieron las curvas carga desplazamiento del sistema estructural sin el dispositivo y con este. En la Figura 47 se observan las curvas sobre puestas donde se observa la diferencia debida a la disipación de energía del dispositivo. En la Figura 48 se muestra la curva de histéresis del dispositivo determinadas con la deformación de las galgas extensiométricas que se colocaron las conexiones. En ésta se puede observar que la carga que soportó el disipador fue de alrededor 21 t.

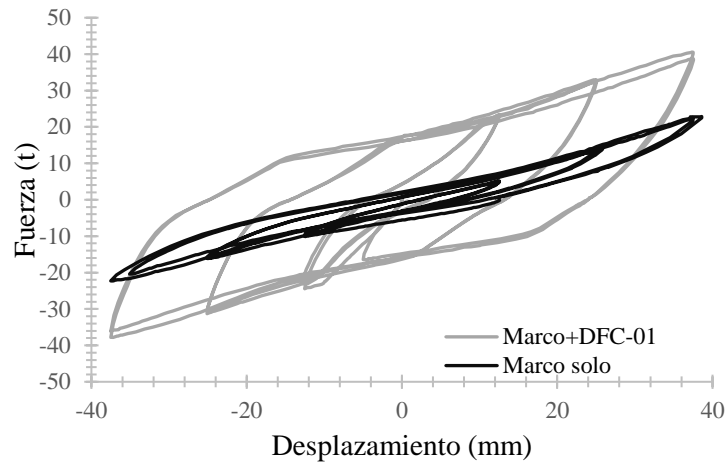


Figura 47. Curvas carga desplazamiento del sistema estructural con y sin el dispositivo DFC-01.

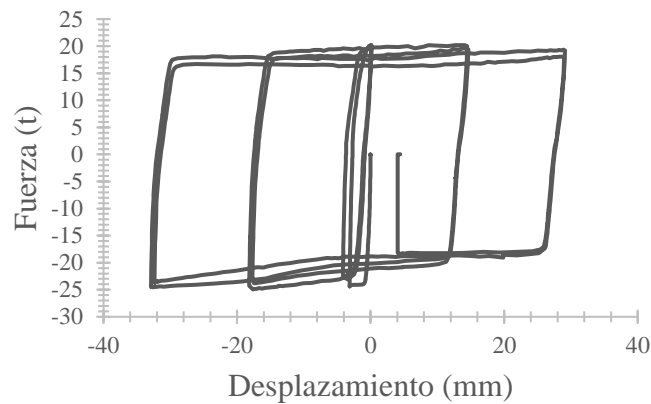


Figura 48. Curvas carga desplazamiento del dispositivo DFC-01.

Con los datos obtenidos se calculó la fuerza de fricción de una manera indirecta. Primero se determinó la diferencia de fuerza entre los valores del experimento del marco+DFC-01 y marco solo, para obtener la aportación, en términos de fuerza del prototipo, en cada intervalo de desplazamiento. A estas fuerzas la llamaremos fuerza de aportación (F.A.). Con estas fuerzas calculadas se determinó la relación entre la F.A. y la fuerza normal de los pernos (F.N.), con la finalidad de encontrar el coeficiente de fricción, cuyos resultados se presentan en la Tabla 7.

En las primeras rampas se observa que la relación FA/FN . aumenta con el desplazamiento lo que nos indica que aún no se activa la fricción, y no es hasta los desplazamientos posteriores a 12.5 mm que la relación se estabiliza alrededor de 1.2, lo que indica que la fricción se ha activado y ese es el valor del coeficiente de fricción del dispositivo. En la Figura 49 se puede observar de manera gráfica el comportamiento de la relación FA /FN con el desplazamiento.

Tabla 7. Relaciones FA /FN en las rampas de incrementos de desplazamiento.

Desplazamiento mm	Coefficiente de fricción
0	0
5	0.342
10	0.787
12.5	1.202
25	1.29257552
37	1.25931711
Promedio	1.251

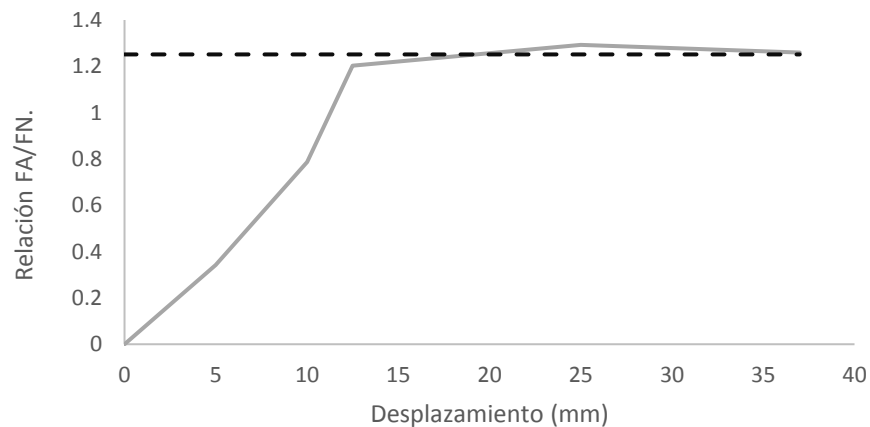


Figura 49. Gráfica desplazamiento vs FA/FN .

6.3 Prototipo DFC-02

Realizadas las pruebas del protocolo, se obtuvieron las curvas carga-desplazamiento para observar el comportamiento histerético, en el cual se observa un comportamiento estable y rectangular típico de los sistemas de fricción, pero con variaciones apreciables en la zona de fricción.

Los resultados se muestran en la Figura 50, donde se observa la forma antes mencionada y que en la mayoría de las curvas se tiene un comportamiento muy estable con pequeñas variaciones en la carga, sin embargo, es apreciable un nivel de carga promedio muy estable. Se atribuyen estas variaciones al material de contacto, que en este caso es concreto. Al ser una superficie con importantes imperfecciones, impide que el desplazamiento entre las placas sea totalmente libre, provocando aumentos y decrementos de carga durante la prueba.

Se encontraron algunas particularidades durante el experimento, como en la prueba DFC-02-4 (ver Figura 50 d) en la que se puede observar una degradación considerable en la carga, la cual fue ocasionada por el agrietamiento del concreto en la zona de conexión. Este agrietamiento fue ocasionado por momentos generados por una excentricidad en la conexión entre el prototipo y el actuador lo que producía un cabeceo. El agrietamiento fue incrementando con los ciclos a los que fue sometido el prototipo, llegando a desaparecer parte del concreto en la zona de contacto con brazo de conexión.

La desaparición del concreto en esa zona provocó que en la rama de la carga positiva las barras longitudinales pudieran tomar carga en tensión al ya no trabajar en conjunto con el concreto, generando el incremento en la carga observado en la prueba DFC-02-6 (Figura 50f).

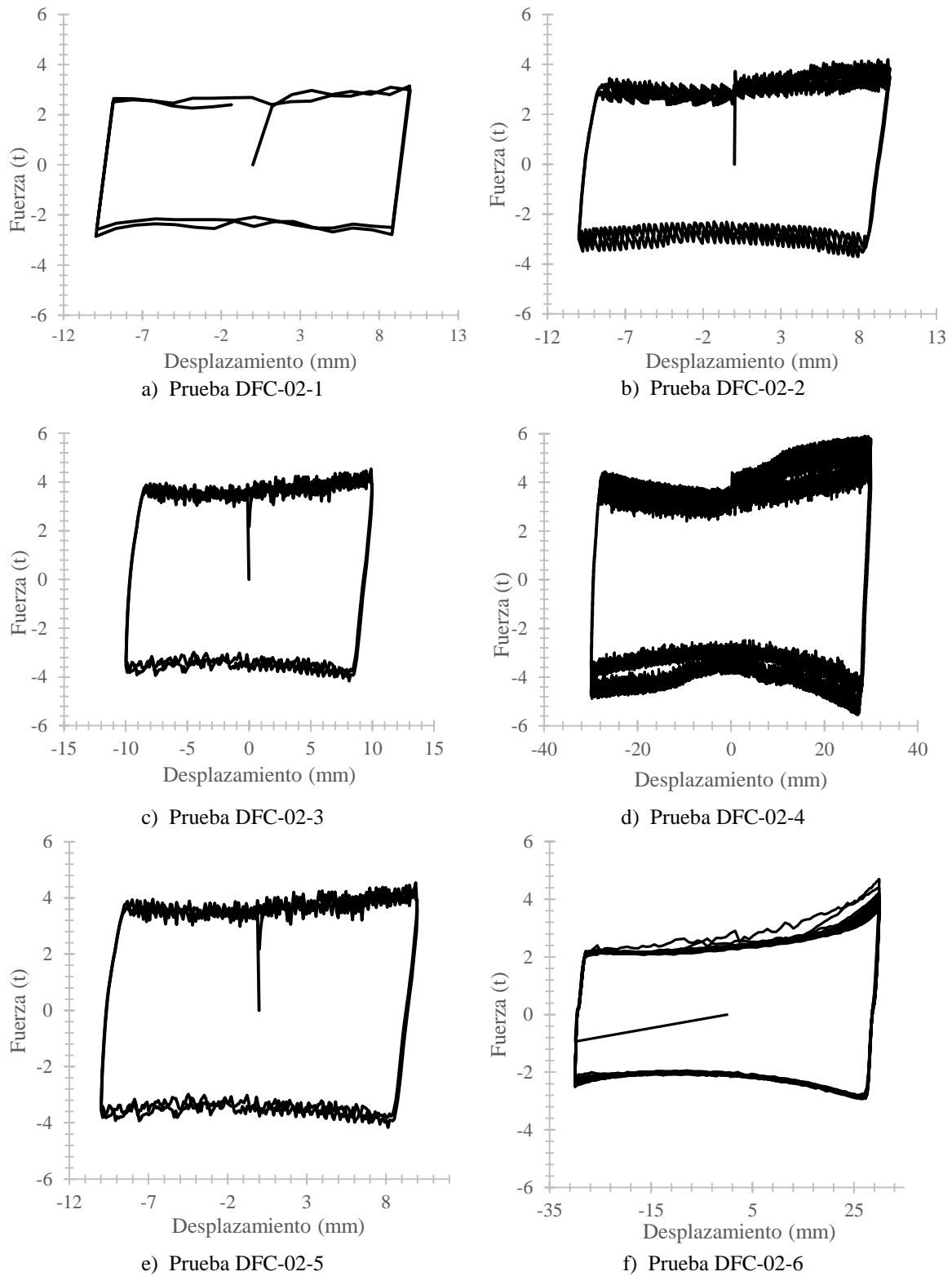


Figura 50. Curvas histeréticas del prototipo DFC-02.

Se determinó la fuerza de activación del dispositivo y se calculó su coeficiente de fricción. En la Tabla 8, se muestra el resumen de los resultados donde se observa que el coeficiente de fricción llegó a estar muy cerca de la unidad, antes de que el agrietamiento en el concreto fuera severo, siendo un coeficiente bastante eficiente en términos de disipación de energía.

Tabla 8. Coeficiente de fricción de pruebas en dispositivo DFC-02.

Prueba	Fuerza normal	Fuerza de activación promedio	Coeficiente de fricción
DFC-02-1	4.5	2.58	0.574
DFC-02-2	4.5	3.08	0.686
DFC-02-3	4.5	3.74	0.833
DFC-02-4	4.5	4.42	0.983
DFC-02-5	4.5	3.74	0.833
DFC-02-6	4.5	2.49	0.555
Coeficiente promedio			0.744

6.4 Prototipo DFC-03

Las curvas de histéresis obtenidas para el prototipo DFC-03 se muestran en la Figura 51. Se observa un comportamiento estable y rectangular típico de los sistemas de fricción. A diferencia del DFC-02, no se observan saltos en la zona de fricción.

Durante esta prueba se observaron fenómenos que en la prueba del prototipo DFC-02 no se pudieron observar debido a las variaciones en la carga. En esta prueba se puede observar en todos los casos, que en el primer incremento la carga llegó a su máximo para después estabilizarse en la zona de fricción, mismo fenómeno que se presentó en las pruebas del DFB-01 debido al cambio de régimen de fricción estática a dinámica.

Al igual que en el prototipo DFC-02, se presentó un cabeceo debido a una excentricidad en la conexión del dispositivo con el actuador, lo cual provocó el mismo fenómeno. En los últimos ciclos se observó un incremento súbito en la carga en uno de los sentidos, que se

presentó en tres de las cinco pruebas. Este incremento se asocia a la pérdida de concreto que permitió el esfuerzo en barras de acero, sin embargo, también pudo deberse al contacto de un perno con la placa central de concreto.

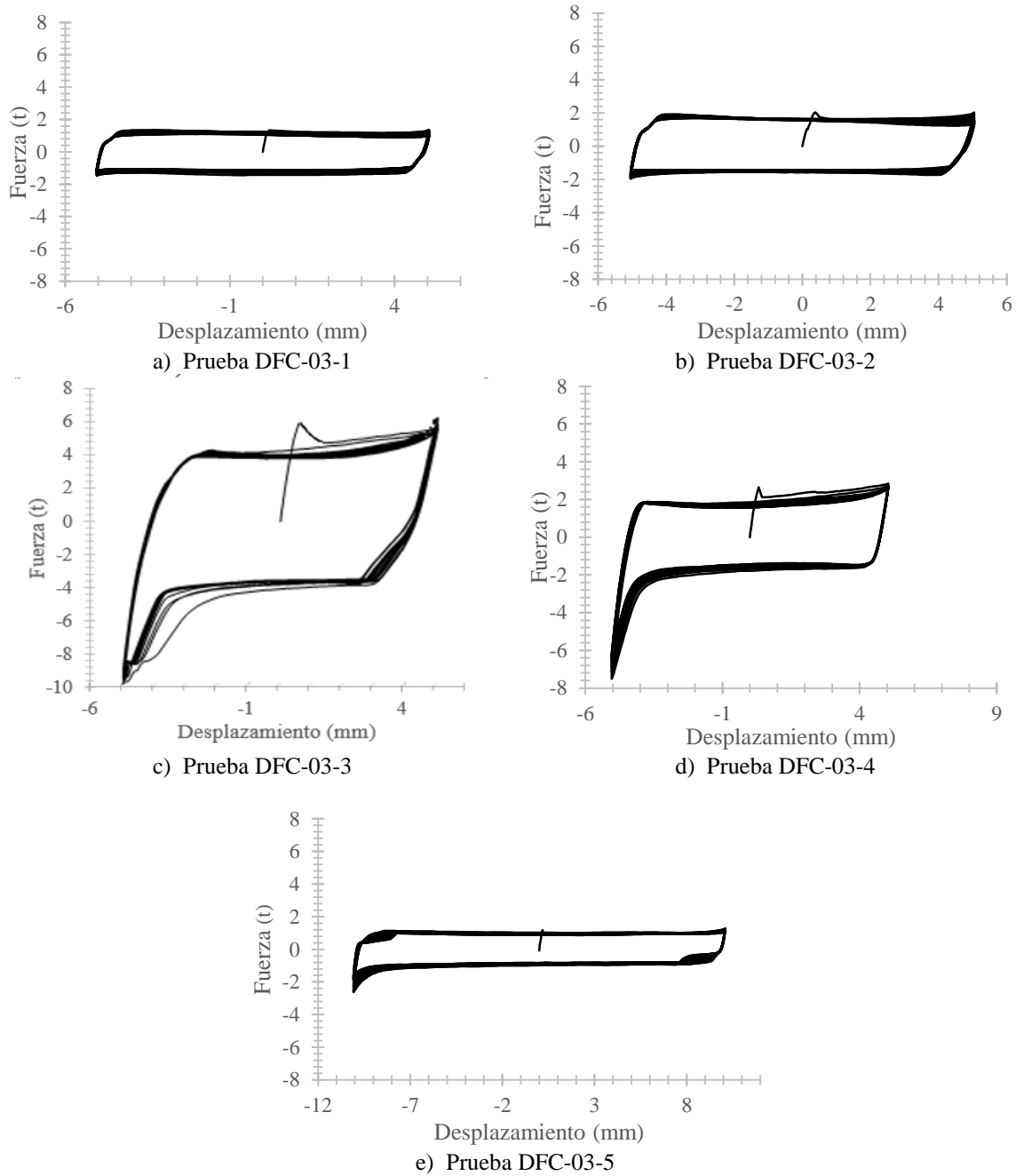


Figura 51. Curvas histeréticas del dispositivo DFC-03.

Se determinó la fuerza de activación del dispositivo y se calculó su coeficiente de fricción. En la Tabla 9 se muestra el resumen de los resultados donde se observa que los coeficientes son mucho menores que al prototipo DFC-02 que no estaba lubricado. Sin embargo, la estabilidad en la zona de fricción fue más evidente en esta prueba.

Tabla 9. Coeficiente de fricción de pruebas en dispositivo DFC-03.

Prueba	Fuerza normal	Fuerza de activación promedio	Coeficiente de fricción
DFC-03-1	6	1.25	0.208
DFC-03-2	6	1.49	0.248
DFC-03-3	6	3.95	0.658
DFC-03-4	6	1.8	0.300
DFC-03-5	6	0.98	0.163
Coeficiente promedio			0.316

6.5. Prototipo DFC-04

Las curvas carga-desplazamiento para el prototipo DFC-04 se muestran en la Figura 52 observar el comportamiento histerético. Se observa un comportamiento estable y rectangular típico de los sistemas de fricción.

En esta prueba se llegó a un nivel más alto de carga normal brindada por los pernos, lo que se reflejó en mayores fuerzas de activación, siendo el prototipo que más carga soportó. Esto nos indica que el aluminio funciona bien como superficie de fricción, no obstante, al ser un material con poca dureza, se susceptible a rayarse con facilidad.

Se observó degradación del dispositivo debido a un cabeceo en el extremo conectado al actuador, de manera similar a las pruebas en los prototipos DFC-02 y DFC-03. Esto generó una degradación en la carga, visible en las curvas histeréticas, ya que en ambas curvas se

observa que hubo una disminución de la carga en la zona de deslizamiento, en dos ciclos consecutivos.

En las curvas es apreciable que a diferencia de las pruebas previas la pendiente post-fluencia tiene un valor distinto de cero. Esto nos indica que durante el deslizamiento hay una fuerza adicional a la fricción que se opone al movimiento. Esta fuerza se puede atribuir al comportamiento de la resina epóxica con la que fueron pegados las soleras de aluminio al concreto que, en el deslizamiento, tiende a tener una rigidez diferente a que si el aluminio estuviera perfectamente adherido a las placas de concreto.

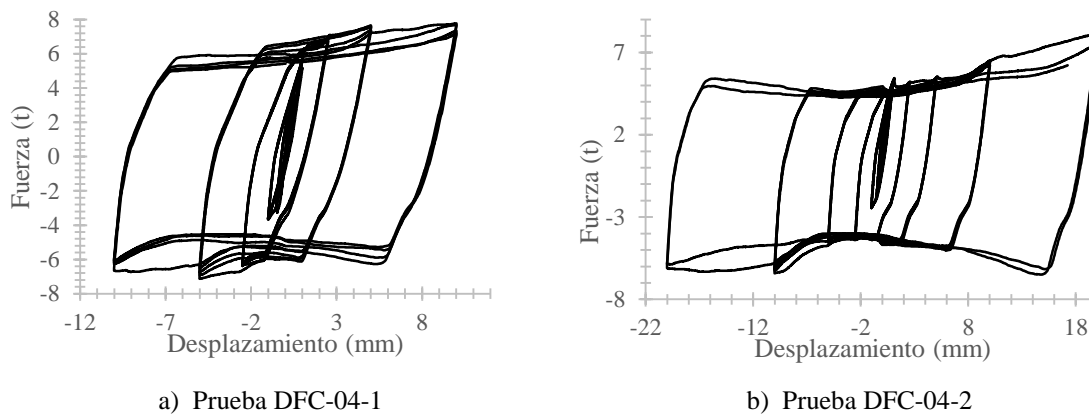


Figura 52. Curvas de histéresis del prototipo DFC-04.

Se determinó la fuerza de activación del dispositivo y se calculó su coeficiente de fricción. En la Tabla 10 se muestra el resumen de los resultados, donde se observa que el coeficiente de fricción promedio es muy cercano a la unidad, lo que nos confirma que el aluminio es un material que funciona bien como superficie de fricción, pero como ya se mencionó es susceptible a rayarse ante cargas severas.

Tabla 10. Coeficiente de fricción de pruebas en dispositivo DFC-04.

Prueba	Fuerza normal	Fuerza de activación promedio	Coeficiente de fricción
DFC-04-1	6	6.2	1.033
DFC-04-2	5.5	5.1	0.927
Coeficiente promedio			0.980

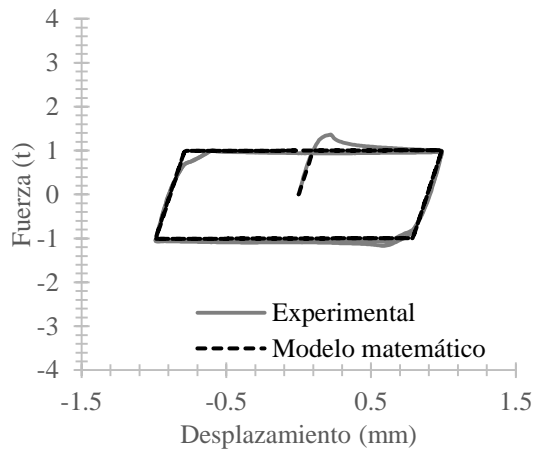
7. Modelación numérica

Para la modelación matemática se utilizó un modelo histérico bilineal simple, donde la rigidez de la rama lineal se consideró igual a la rigidez de las conexiones del sistema. La fuerza de fluencia se determinó con los resultados experimentales considerando que la fuerza de activación es igual a la fuerza de fluencia del modelo. En las siguientes secciones se muestra una comparación entre las curvas obtenidas del modelo matemático y los datos experimentales.

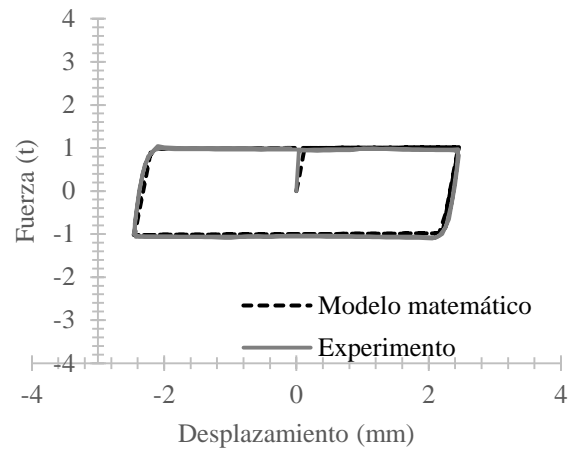
7.1 Prototipo DFB-01

Para la modelación del prototipo DFC-01 se utilizó un modelo bilineal, con relación de rigidez post-fluencia de 0.001 y la para la rigidez inicial se consideró igual a la rigidez del sistema de conexión. En la Figura 53 se muestra las comparaciones de los resultados numéricos y los resultados experimentales. Se puede observar que el modelo matemático representa de manera aceptable el comportamiento del prototipo en la mayor parte de su funcionamiento, sin embargo, el modelo no representa el pico en la carga que se presenta al comenzar el deslizamiento.

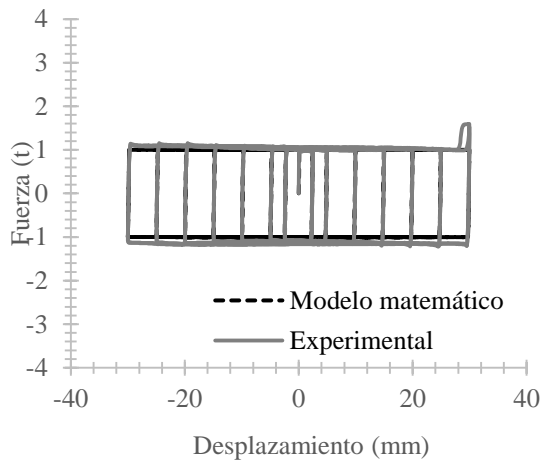
En todos los casos el modelo matemático prácticamente es idéntico a los datos experimentales, únicamente se presentan diferencias en el primer incremento de carga, que como ya se mencionó, es donde el deslizamiento inicia y se rompe la fricción estática, y como se observa en la Figura 53c, donde en el experimento se presentó un pico en la carga debido al contacto entre una placa y un perno, el modelo tampoco puede representar dicha eventualidad.



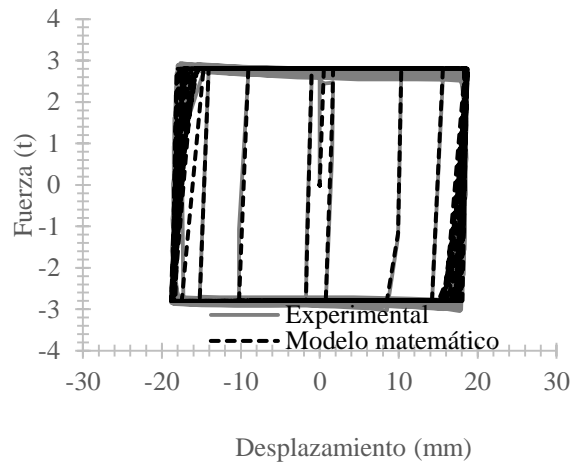
a) Modelación prueba DFB-01-1



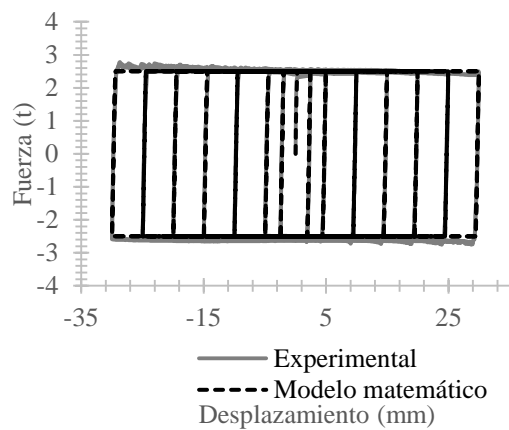
b) Modelación prueba DFB-01-2



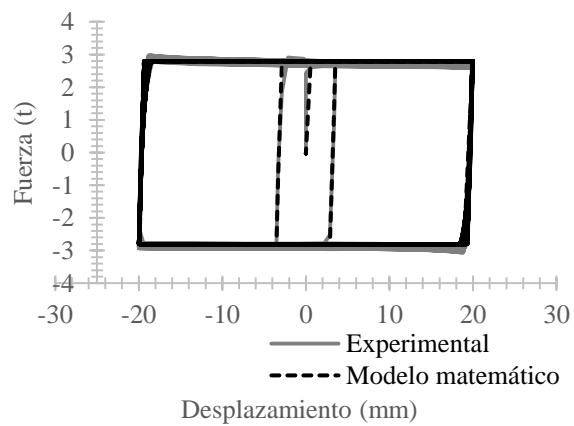
c) Modelación prueba DFB-01-3



d) Modelación prueba DFB-01-4



e) Modelación prueba DFB-01-5



f) Modelación prueba DFB-01-6

Figura 53. Modelación prueba del prototipo DFB-01

7.1 Prototipo DFC-01

Para el prototipo DFC-01 se utilizó el programa SAP2000 (2019) para la modelación del sistema estructural, formado por el marco y el disipador. Se modeló el disipador de fricción por medio de un resorte no lineal. En la Figura 54a se muestra la comparación del modelo matemático del dispositivo aislado; mientras que en la Figura 54b se muestra la comparación del modelo matemático del sistema marco-disipador. Se puede observar que el modelo matemático representa de manera aceptable el comportamiento en ambos casos, pudiendo predecir con cierto nivel de certeza las fuerzas en función de los desplazamientos.

En la Figura 55b se observan diferencias significativas entre el modelo matemático y la curva experimental. Esto se debe a que el marco se modeló con un comportamiento lineal, concentrando la no linealidad únicamente en el resorte que presenta al prototipo. Esta diferencia es apreciable sobre todo en las ramas de descarga ya que el modelo no considera la degradación ni el comportamiento no lineal que tuvo en marco en la prueba experimental.

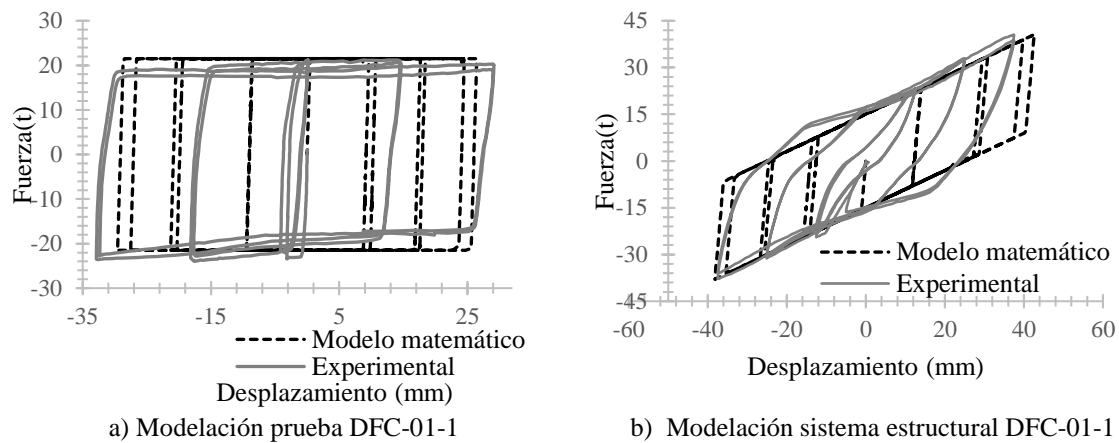
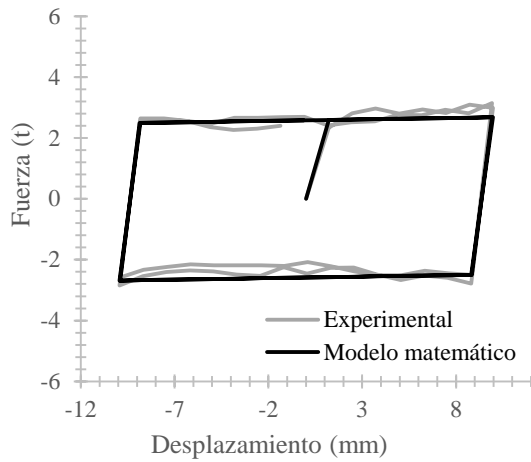


Figura 54. Modelación prueba del prototipo DFC-01

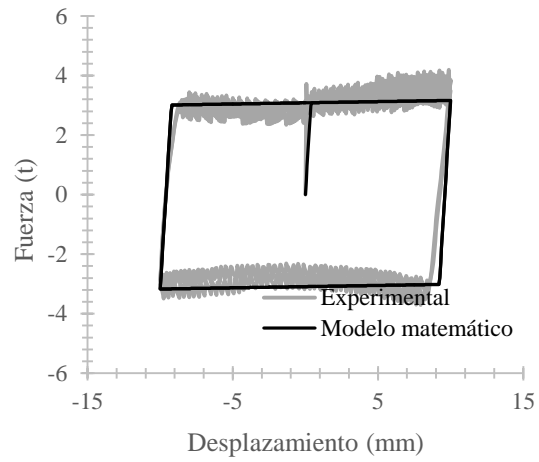
7.2 Prototipo DFC-02

Para la modelación del prototipo DFC-02 se utilizó un modelo bilineal, con relación de rigidez post-fluencia de 0.001 y la para la rigidez inicial se consideró igual a la rigidez del sistema de conexión. En la Figura 55 se muestra las comparaciones de los resultados numéricos y los resultados experimentales. Se puede observar que el modelo matemático representa de manera aceptable el comportamiento del prototipo sin tomar en cuenta las pequeñas variaciones en el deslizamiento y sobre todo cuando el prototipo no ha presentado degradación, ya que en los ciclos donde se presenta la degradación es donde se observan las mayores diferencias.

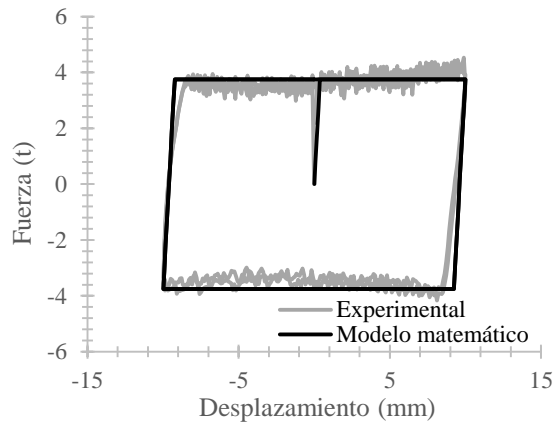
Por otro lado, en la Figura 55f, se puede observar que el incremento de carga que presentó la curva experimental tampoco puede ser representada bien por este modelo.



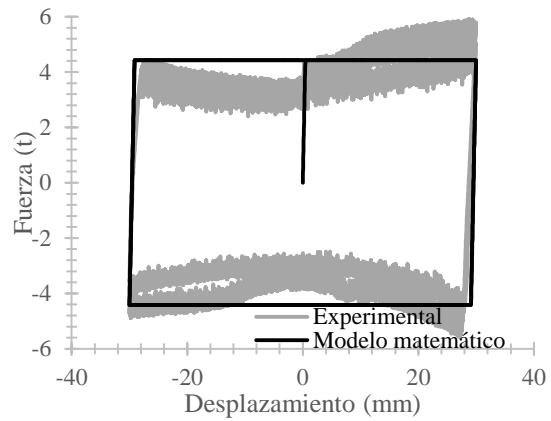
a) Modelación prueba DFC-01-1



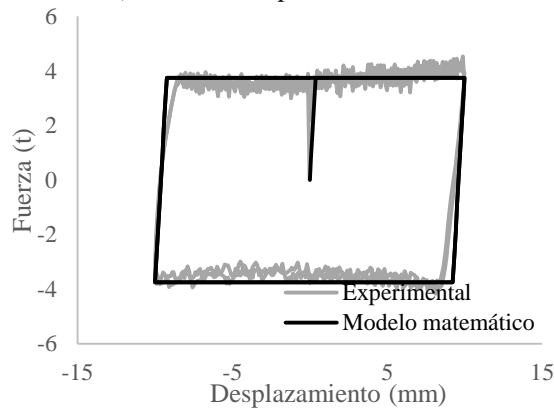
b) Modelación prueba DFC-02-2



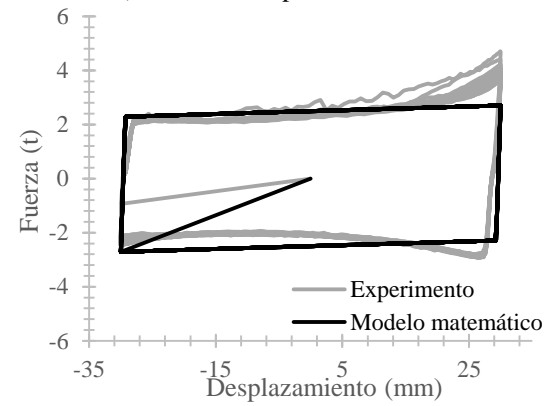
c) Modelación prueba DFC-02-3



d) Modelación prueba DFC-02-



e) Modelación prueba DFC-02-5



f) Modelación prueba DFC-02-7

Figura 55. Modelación numérica de la prueba para el prototipo DFC-02.

7.3 Prototipo DFC-03

Para la modelación del prototipo DFC-03 se utilizó un modelo bilineal, con relación de rigidez post-fluencia de 0.001 y la para la rigidez inicial se consideró igual a la rigidez del sistema de conexión. En la Figura 56 se muestra las comparaciones de los resultados numéricos y los resultados experimentales. Se puede observar que el modelo matemático representa de manera aceptable el comportamiento del prototipo en la mayor parte de su funcionamiento, sin embargo, el igual que el prototipo DFB-01, el modelo no representa el pico en la carga que se presenta al comenzar el deslizamiento.

También se observa que en las zonas donde hubo incrementos súbitos de carga debidos a contactos o participación de otros elementos, el modelo no puede representarlos y resulta evidente que en esas zonas se presentan las mayores diferencias entre la curva experimental y el modelo.

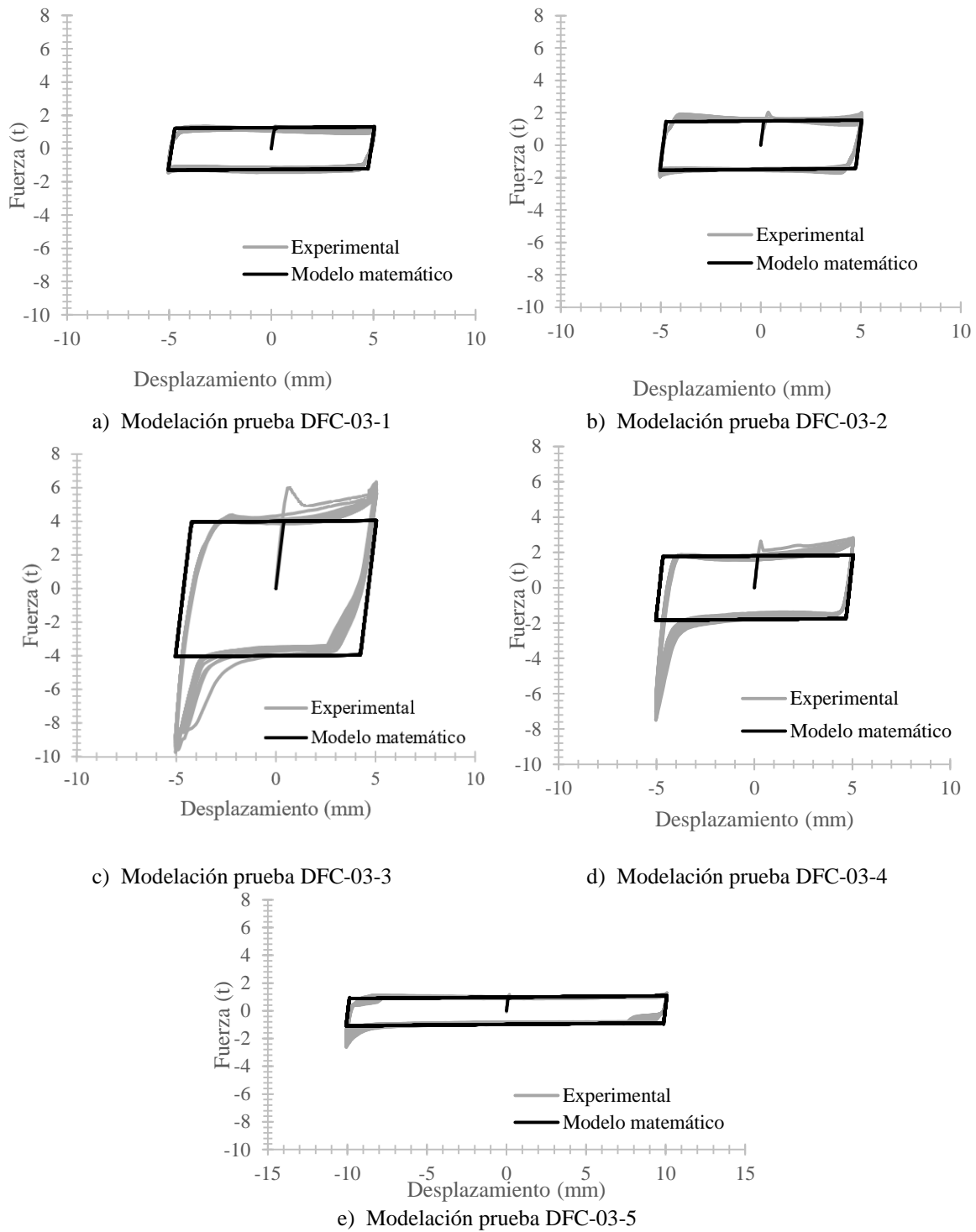


Figura 56. Modelación numérica de la prueba para el prototipo DFC-03.

7.4 Prototipo DFC-04

Para la modelación del prototipo DFC-04 se utilizó un modelo bilineal, con relación de rigidez post-fluencia de 0.001 y la para la rigidez inicial se consideró igual a la rigidez del sistema de conexión. En la Figura 57 se muestra las comparaciones de los resultados numéricos y los resultados experimentales. Se puede observar que el modelo matemático representa de manera aceptable el comportamiento del prototipo en la mayor parte de su funcionamiento, sin embargo, hay zonas en donde se presentó degradación donde existen diferencias significativas entre el modelo y los datos experimentales.

Se observa que, para este caso, el modelo tiene grandes diferencias en algunas zonas, ya que el modelo bilineal no puede representar la degradación de rigidez del concreto y además no se consideró la posible variación en la rigidez post-fluencia de la resina epóxica. No obstante, en el promedio de la fuerza de activación y en gran parte del desplazamiento, el modelo predice de manera aceptable las fuerzas en relación con los desplazamientos.

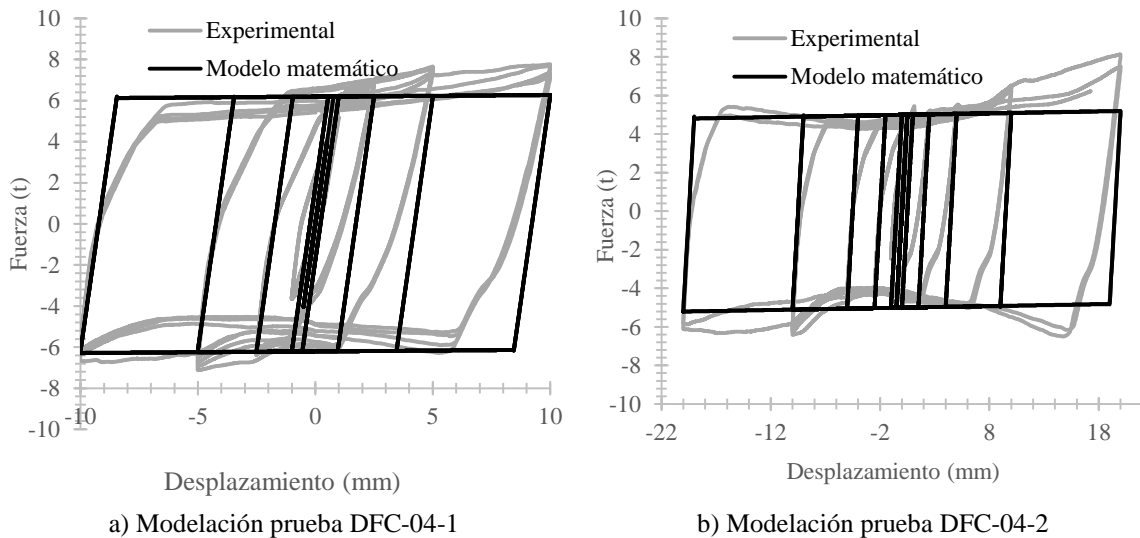


Figura 57. Modelación numérica de la prueba para el prototipo DFC-04.

8. Conclusiones y recomendaciones

Se propusieron y ensayaron experimentalmente distintos prototipos de disipadores de fricción. Se midieron sus fuerzas de activación y coeficiente de fricción. Además, se realizó un modelado numérico de éstos. Se ofrecen las siguientes conclusiones:

8.1 Conclusiones

- Se observó que en todos los prototipos tuvieron un comportamiento estable ante los ciclos de carga aplicados, lo cual indica una gran capacidad de disipación de energía sin degradación importante de la fuerza de activación (no más del 15%). Esto representa una ventaja frente a otros sistemas histeréticos.
- El prototipo DFB-01 es el que tuvo el mejor comportamiento frente a los demás dispositivos ensayados, ya que la carga de activación no presentó variaciones significativas, aun ante cargas cíclicas más severas y mayor número de repeticiones de carga. El coeficiente de fricción fue en promedio de 0.39, lo cual es considerado aceptable para obtener fuerzas de activación apropiadas para aplicaciones estructurales.
- El prototipo DFC-01 tuvo un buen comportamiento con un coeficiente de fricción de 1.2. Se concluye que el sistema es competente, aunque el dispositivo presentó degradación en su fuerza de activación durante ciclos severos de carga.
- El prototipo DFC-02, tuvo comportamiento estable con un coeficiente de fricción de 0.7, lo cual es considerado aceptable. Se observó que el dispositivo presentaba variaciones en la zona de deslizamiento asociados a la rugosidad de la superficie de fricción. Se buscó eliminar dicho comportamiento lubricando la superficie con grasa en el dispositivo DFC-03, el cual tuvo un comportamiento más estable, pero con

coeficientes de fricción bajos, con un promedio de 0.3, lo que podría representar una desventaja para alcanzar fuerzas altas de activación.

- El prototipo DFC-04 presentó comportamiento estable ante cargas incrementales, con un coeficiente de fricción promedio de 0.98, lo que hace muy competente al aluminio como superficie de fricción. Aunque se necesitan más estudios para validar ese argumento.
- Para los prototipos de concreto DFC-02, DFC-03 y DFC-04, se observó un cabeceo en el extremo superior, atribuido a la excentricidad de este en el sistema de carga, lo que generó degradaciones en el concreto. Ello generó desplazamientos fuera del plano provocando flexiones en las placas de concreto que, al no estar diseñadas para este efecto provocó fuertes agrietamiento en cargas cíclicas severas. Se concluye que estos dispositivos deben ser revisados para flexión fuera del plano, para que puedan ser competentes.
- De todas las superficies utilizadas en este trabajo, el concreto y el aluminio son los que mostraron mayor coeficiente de fricción. Sin embargo, no presentaron un comportamiento tan estable como el sistema cerámica-acero del prototipo DFB-01, por lo que se concluye que este último es el sistema ideal para continuar la investigación.
- El modelo bilineal funcionó de manera aceptable para modelar el comportamiento de los prototipos ensayados. Únicamente utilizando la rigidez de la conexión y la fuerza de activación (fuerza en función de la fuerza normal y el coeficiente de fricción) se obtuvieron resultados satisfactorios.

8.2. Recomendaciones

Con base en los resultados y experiencias que se obtuvieron a lo largo del desarrollo de este trabajo, se considera pertinente dar las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda continuar con las investigaciones con relación a los dispositivos de fricción, ya que en general los resultados fueron satisfactorios. Ello permitió, con prototipos sencillos y de bajo costo, disipar cantidades importantes de energía.
- De acuerdo con las experiencias obtenidas en las pruebas de los prototipos de concreto, se recomienda realizar un análisis más profundo para las zonas de las conexiones de las placas de concreto, ya que en todos los casos se presentó una degradación del concreto que se reflejó en las variaciones de las curvas.
- Dados los buenos resultados del prototipo DFB-01 se recomienda utilizar la configuración del dispositivo con mejoras en el diseño para continuar con las investigaciones sobre el desarrollo de este prototipo de disipador.

Referencias.

Byoung-Wook M., Kyung-Won M. y Sang-Hyun L., (2008), Design of a bracing-friction damper system for seismic retrofitting, *Smart Structures and Systems*, 4(5), 685–696.

Filiatrault A., Cherry, S. (1988). Seismic Design of Friction Damped Braced Steel Plane Frames by Energy Methods. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 116 (5), 1334-1355.

Filiatrault A., Cherry S. (1990). Seismic Design Spectra for Friction Damped Structures. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 116 (5), 1334- 1355.

Grigorian C. E., Yang T. S., y Popov E. P. (1993), Slotted Bolted Connection Energy Dissipators, *Earthquake Spectra*, 9(3), 491–504.

Imad H., Borislav B. (2002), Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation, *Engineering Structures*, 24 (3), 365-371.

Jara J. M., (1994) Estado del arte sobre dispositivos para reducir daños provocados por temblores, *Revista de Ingeniería Sísmica*, 47, 35-79.

Kar, Rainer, & Lefrançois. (1996). Dynamic Properties of a Circuit Breaker with Friction-Based Seismic Dampers. *Earthquake Spectra* , 12(2), 297-314 .

Martínez C. y Curadelli O., (2017), Testing and performance of a new friction damper for seismic vibration control, *Engineering Structures*, 24(3), 365-371.

Mirtaheri, M., Peyman, A., Sharifi, S. and Rahmani, H., (2011). Numerical and experimental study of hysteretic behavior of cylindrical friction dampers, Iran, *El Sevier, Engineering Structures*, 33, 3647-3656.

Morgen B. G., Kurama Y., (2004), A friction damper for post-tensioned precast concrete beam-to-column joints, Canada, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, Canada.

Nims DK, Richter PJ y Bachman RE, (1993), The Use of the Energy Dissipating Restraint for Seismic Hazard Mitigation, *Earthquake Spectra*, 9(3), 467-489.

Pall A. S. y Marsh C., (1980), Friction Joints for Seismic Control of Large Panel Structures, *Journal of Prestressed Concrete Institute*, 25 (6), 38- 61.

Pall A. S. y Marsh, C. (1982). Response of Friction Damped Braced Frames, *Journal of Structure Division, ASCE*, 108(ST6), 1313-1323.

Petkovski M., (2017). A Practical Method for Optimum Seismic Design of Friction all Dampers, Reino Unido, *Journal of Structural Engineering*, 1052-1034.

Quaketek, Protección Sísmica. 2020. Disipadores Sísmicos – Disipadores A Fricción - Quaketek | Protección Sísmica. Disponible en: <<https://www.quaketek.com/es/disipadores-sismicos-disipadores-a-friccion/>> [Consultado 9 julio 2020].

Ramhormozian S., Clifton G. C., MacRae G. A. y Khoo H. H. (2018). The Sliding Hinge Joint: Final Steps towards an Optimum Low Damage Seismic-Resistant Steel System. *Key Engineering Materials*, 763, 751–760.

SAP2000, C. (2019). Computers and structures Inc. Berkeley, CA, USA.

Scholl R. E., (1984), Brace dampers: An alternative structural system for improving the earthquake performance of buildings, *Proc 8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, California, pp 1015-1022.

Wang, T, Chen, X. y Teng, R., (2011), A friction damper with variable post-sliding stiffness, China, *Advanced Materials Research Vols 368-373 (2012)* pp 12-17.

Wei W. y Chen K., (2010), Design and Test on a New Pattern Friction Damper, China, *Advanced Materials Research Vols. 139-141 (2010)* pp 2720-2723.

Zhao D., Liu X. y Tan H., (2010), Research on Mechanical Characteristic of a Self-force-amplifier Damper, Advanced Materials Research, 156-157, pp 558-561.