



Vigilada Mineducación

DESEMPEÑO SÍSMICO DE UN PÓRTICO DE CONCRETO ARMADO
EQUIPADO CON DISIPADORES POR FRICCIÓN, UBICADO EN ZONA DE
AMENAZA SÍSMICA ALTA EN COLOMBIA

Seismic performance of a reinforced concrete portal frame equipped with friction
heatsinks located in a high seismic hazard zone in Colombia

CLÍMACO ANDRÉS HERNÁNDEZ MONTES

Tesis de maestría

Director:

Juan Diego Jaramillo Fernández, PhD

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2023

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
2. OBJETIVOS.....	10
2.1. GENERAL	10
2.2. ESPECÍFICOS	10
3. ESTADO DEL ARTE.....	11
4. MARCO TEÓRICO	12
4.1. DISPOSITIVOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA	12
4.2. SISTEMAS PASIVOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	12
4.3. AMORTIGUADORES POR FRICCIÓN	12
4.4. ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL PUSH-OVER	13
4.5. DAÑO SÍSMICO EN ESTRUCTURAS	13
4.5.1. Clasificación de los indicadores de daño sísmico	13
4.5.2. Indicador de daño.....	14
5. DISEÑO METODOLÓGICO.....	15
5.1. ESTRUCTURA OBJETO DE ESTUDIO.....	15
5.2. MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	16
5.2.1. No linealidad de los materiales	16
5.2.2. Comportamiento no lineal del pórtico	17
5.2.3. Curvaturas y rotaciones en vigas	19
5.2.4. Curvaturas y rotaciones en columnas	20
5.2.5. Disipadores por fricción.....	22
5.3. DEFINICIÓN DE LA DEMANDA SÍSMICA.....	25
5.4. OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL.....	25
5.5. ESCENARIOS DE ANÁLISIS, DISIPACIÓN DE ENERGÍA E INDICES DE DAÑO.....	25
5.5.1. Pórtico de concreto armado sin disipadores por fricción	26
5.5.2. Pórtico de concreto armado con disipadores por fricción	26
5.5.3. Análisis estático no lineal push-over	26
6. RESULTADOS.....	27

6.1. CARGA ÓPTIMA DE DESLIZAMIENTO DE LOS DISIPADORES POR FRICCIÓN	27
6.2. CURVA DE CAPACIDAD DE LA ESTRUCTURA	29
6.3. PRIMER ESCENARIO: PÓRTICO SIN DISIPADORES POR FRICCIÓN...	29
6.4. SEGUNDO ESCENARIO: PÓRTICO CON DISIPADORES POR FRICCIÓN	31
7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	33
8. CONCLUSIONES	37
9. REFERENCIAS	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Configuraciones de los disipadores por fricción (izquierda: disipador por tracción y compresión; derecha, disipador a solo a tracción) – Fuente: Adaptado de Pall, A., Pall [3].....	13
Figura 2. Diagrama de esfuerzo vs. deformación de (a) concreto confinado (b) acero de refuerzo A-615 Gr60 – Fuente: Elaboración propia	17
Figura 3. Rótula plástica de una viga definida en el programa SAP2000® – Fuente: Elaboración propia	17
Figura 4. Rótula plástica de una columna definida en el programa SAP2000® - Fuente: Elaboración propia.....	18
Figura 5. Diagrama P-M3 de columnas del pórtico. – Fuente: Elaboración propia	18
Figura 6. Cargas axiales para diagramas de Momento-Rotación en columnas. – Fuente: Elaboración propia.....	19
Figura 7. Diagramas de P-M-Ø de columnas del pórtico.	21
Figura 8. Diagramas de P-M-θ de columnas del pórtico.	21
Figura 9. Propiedades para la modelación disipador por fricción. – Fuente: Quaketek [9].....	22
Figura 10. Configuración de disipadores en el pórtico– Fuente: Elaboración propia	23
Figura 11. Respuesta vs carga de deslizamiento – Fuente: Elaboración propia ...	24
Figura 12. Modelo SDOF de fricción de Columb. – Fuente: Elaboración propia....	24
Figura 13. Espectro de aceleraciones para un 5% de amortiguamiento - E1 a E14 (g/G). – Fuente: Elaboración propia.....	25
Figura 14. Curva de capacidad de la estructura. – Fuente: Elaboración propia	29
Figura 15. Comparación del índice de disipación de energía en vigas [E] – Fuente: Elaboración propia	33
Figura 16. Comparación de demandas de ductilidad global – Fuente: Elaboración propia.....	34

Figura 17. Comparación de demandas de ductilidad en vigas – Fuente: Elaboración propia.....35

Figura 18. Comparación de demandas de ductilidad en columnas – Fuente: Elaboración propia35

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de los materiales.....	15
Tabla 2. Propiedades geométricas y refuerzos en columnas y vigas del pórtico...15	15
Tabla 3. Cargas actuantes en la estructura.	16
Tabla 4. Curvaturas y rotaciones de las vigas del pórtico.....	20
Tabla 5. Propiedades generales de los disipadores por fricción.....	23
Tabla 6. Sets de cargas de deslizamiento de disipadores de energía.....	27
Tabla 7. Sets de cargas de deslizamiento óptimas por señal de los disipadores de energía.....	28
Tabla 8. Demanda de ductilidad en la estructura sin disipadores.....	30
Tabla 9. Demanda de ductilidad en columnas. Estructura sin disipadores.....	30
Tabla 10. Índice de energía disipada en vigas y demanda de ductilidad en la estructura con disipadores.....	31
Tabla 11. Demanda de ductilidad en columnas. Estructura con disipadores.....	31

RESUMEN

Los disipadores por fricción son dispositivos de control de respuesta sísmica que disipan la energía que le imprime un sismo a una estructura mediante la fricción de dos superficies sólidas. En el presente trabajo se evalúa el desempeño sísmico de un pórtico de concreto reforzado ubicado en zona de amenaza sísmica alta en Colombia en dos escenarios concretos: En el primer escenario el pórtico es analizado sin disipadores y en el segundo el pórtico es analizado con disipadores por fricción; la estructura se diseñó previamente de acuerdo con el código colombiano de la construcción sismo resistente (NSR-10). La evaluación se realizó en términos de las máximas demandas de ductilidad a nivel global cuando hablamos del pórtico y a nivel local en vigas y columnas.

Para esto se llevaron a cabo análisis no lineales tiempo-historia de un conjunto de 14 registros sísmicos representativos de la amenaza sísmica y se encontró que el desempeño sísmico del pórtico mejoró considerablemente cuando se incorporaron los disipadores a la estructura propuesta para el estudio al absorber al menos el 50% de la energía sísmica. Como consecuencia de esto, la demanda de ductilidad global de la estructura se redujo en promedio un 52.8% y las demandas de ductilidad en las vigas y columnas se redujeron en un 54.1% y 21.1% respectivamente

Palabras clave: disipadores por fricción, desempeño sísmico, estructuras de concreto reforzado, amenaza sísmica alta.

ABSTRACT

Friction dampers are seismic response control devices that dissipate the energy imparted by an earthquake to a structure through the friction between two solid surfaces. In this study, the seismic performance of a reinforced concrete frame located in a high seismic hazard zone in Colombia is evaluated under two specific scenarios: In the first scenario, the frame is analyzed without dampers, and in the second scenario, the frame is analyzed with friction dampers. The structure was previously designed according to the Colombian seismic-resistant construction code (NSR-10). The evaluation is performed in terms of the maximum demands of ductility at the global level for the frame and the local level for beams and columns.

To accomplish this, nonlinear time-history analyses of a set of 14 seismic records representative of the seismic hazard were conducted, and it was found that the seismic performance of the frame significantly improved when the dampers were incorporated into the proposed structure for the study, absorbing at least 50% of the seismic energy. As a result, the global ductility demand of the structure decreased by an average of 52.8%, and the ductility demands in the beams and columns decreased by 54.1% and 25.1%, respectively.

Keywords: friction dampers, seismic performance, reinforced concrete structures, high seismic hazard.

1. INTRODUCCIÓN

El mejoramiento del desempeño sísmico de estructuras reviste importancia porque conlleva a la protección de la vida humana, protege el patrimonio de las personas y preserva la infraestructura de un país ante eventos altamente aleatorios y potencialmente catastróficos como son los sismos. Este trabajo pretende evaluar los efectos de los disipadores de energía por fricción en el desempeño de estructuras de concreto armado en zonas de alto riesgo sísmico en Colombia.

El capítulo 2 establece el objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo. El capítulo 3 enseña el marco de referencia en el que se enmarca y se desarrolla la investigación. El capítulo 4 presenta los parámetros geométricos y las propiedades lineales y no lineales de los materiales y elementos constitutivos del pórtico en concreto armado analizado; así mismo se muestra la definición de las propiedades de rigidez de los disipadores por fricción teniendo en cuenta su sección transversal, longitud y material de la riostra; también se habla de su funcionamiento y el objetivo que se persigue con su implementación en la estructura; finalmente se establece la demanda sísmica con la cual se analizará la edificación. En el capítulo 5 se presenta la obtención de la carga óptima de deslizamiento de los disipadores dentro de la estructura mediante un proceso iterativo, minimizando la energía disipada por las vigas; se muestra la curva de capacidad de la estructura. Finalmente, se muestran los resultados de su desempeño sísmico frente a 14 acelerogramas en dos escenarios: el primero corresponde al pórtico típico sin disipadores y el segundo escenario es el pórtico con disipadores por fricción cuya carga óptima ha sido determinada previamente.

La investigación se fundamenta y se desarrolla sobre la teoría de la respuesta de estructuras ante excitaciones dinámicas y el comportamiento elástico e inelástico de materiales ante cargas dinámicas; así mismo parte de criterios, conceptos, metodologías y parámetros que han sido demostrados o comprobados experimentalmente, lo cual forma parte del cuerpo teórico de este estudio. Al final del estudio se comparan algunas respuestas de la estructura como energía disipada por las vigas, relaciones de ductilidad por rotación en vigas y columnas y relaciones de ductilidad global de la estructura.

Los resultados muestran que los disipadores tienen un efecto positivo considerable en la respuesta sísmica del pórtico, disminuyendo el índice de energía disipada por las vigas en un 73.50%, la demanda de ductilidad por rotación en vigas en un 65.65% y en columnas en un 25.1% y finalmente, la demanda de ductilidad global de desplazamiento en la estructura se redujo en un 53.70%.

Esta indagación implica verificar los resultados de este trabajo mediante modelos a escala real de los dispositivos de disipación de energía y de la estructura objeto de estudio.

2. OBJETIVOS

Con el fin de resolver apropiadamente la pregunta de investigación, se desarrollan los siguientes objetivos.

2.1. GENERAL

Comparar el desempeño sísmico de una edificación de concreto reforzado equipada con disipadores por fricción frente a su desempeño en condiciones de un diseño convencional en una zona con amenaza sísmica alta, mediante la obtención del daño que sufren ambas estructuras ante un evento sísmico de gran magnitud.

2.2. ESPECÍFICOS

- Calcular la carga óptima de deslizamiento de los disipadores por fricción con los que se equipó la estructura.
- Estimar la curva de capacidad de la estructura mediante un análisis estático no lineal-Push Over.
- Estimar los daños causados por los sismos en la estructura caso de estudio en dos escenarios: con disipadores por fricción y sin disipadores, mediante relaciones de ductilidad global en la estructura y relaciones de ductilidad local en las vigas y columnas.
- Comparar los niveles de daño de la estructura analizada en los dos escenarios indicados anteriormente.

3. ESTADO DEL ARTE

La eficiencia de los disipadores por fricción ha sido objeto de investigación en varios estudios. Ali Naghshineh [1] et al. realizaron una comparación del desempeño sísmico de un edificio de 14 pisos en concreto armado con y sin disipadores por fricción. Consideraron el nivel de ductilidad del edificio para distintos acelerogramas y encontraron que los disipadores redujeron al menos un 56% los momentos y cortantes en las columnas.

Pasquin et al. [2] llevaron a cabo un estudio de reforzamiento en el edificio Eaton en Montreal, Canadá, comparando pórticos arriostrados concéntricamente con pórticos equipados con disipadores por fricción. Utilizando análisis no lineales tiempo-historia, determinaron las cargas de deslizamiento de los disipadores y observaron que los pórticos con disipadores absorbieron el 50% de la energía sísmica, reduciendo a la mitad los desplazamientos en la azota del edificio en comparación con el sistema de arriostramiento convencional.

En el artículo "Performance-based design using pall friction dampers - an economical design solution", Avtar y R. Tina Pall [3] resaltan la eficiencia de los disipadores por fricción y su excelente comportamiento ante sismos de gran magnitud. Mencionan que la implementación de estos dispositivos puede aumentar el amortiguamiento crítico de una estructura hasta en un 50%. Además, enfatizan que variaciones en la carga de deslizamiento óptima del disipador del orden del 20% no afectan considerablemente la respuesta estructural.

En resumen, los estudios investigan la eficiencia de los disipadores por fricción en diferentes tipos de estructuras. Se ha encontrado que estos dispositivos reducen significativamente los momentos y cortantes en las columnas, absorben una cantidad considerable de energía sísmica y disminuyen los desplazamientos en comparación con sistemas de arriostramiento convencionales. Además, se destaca que la carga de deslizamiento óptima del disipador puede variar sin un impacto significativo en la respuesta estructural.

4. MARCO TEÓRICO

La presente investigación contempla el estudio del desempeño sísmico de una edificación de concreto reforzado equipada con disipadores por fricción frente a su desempeño en condiciones de un diseño convencional en una zona con amenaza sísmica alta, mediante la obtención del daño que sufren ambas estructuras ante un evento sísmico de gran magnitud. A continuación, se presentan los conceptos básicos a considerar a lo largo del documento.

4.1. DISPOSITIVOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Son elementos que aumentan la capacidad de disipación de energía de una estructura ante eventos sísmicos. Hacen parte de un concepto más general llamado técnicas de control de respuesta sísmica. Estos dispositivos se pueden clasificar en tres categorías principales: los sistemas pasivos, los sistemas de aislamiento y los sistemas activos (que incluyen los activos, semiactivos e híbridos) [4]

4.2. SISTEMAS PASIVOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

Los sistemas pasivos de disipación de energía generalmente se dividen en tres categorías diferentes: dispositivos dependientes del desplazamiento, dependientes de la velocidad y dependientes del movimiento. Sin embargo, hay dispositivos especiales, que no pertenecen a ninguna de estas categorías: amortiguadores viscoelásticos (VE), que se encuentran entre dispositivos dependientes del desplazamiento y la velocidad, y amortiguadores de fricción, que se activan a un cierto valor de fuerza que no depende de Velocidad o desplazamiento. [4]

4.3. AMORTIGUADORES POR FRICCIÓN

Los amortiguadores de fricción disipan la energía a través de la fricción entre las placas que están conectadas por pernos colocados en orificios ranurados, lo que permite desplazamientos. Se encuentran disponibles muchas configuraciones estructurales (similares a los amortiguadores metálicos), ya que se pueden colocar en un miembro (diagonal) o en la intersección de llaves en un sistema de refuerzo concéntrico (se muestra un ejemplo en la Figura 1). La principal ventaja de este tipo de dispositivo es que su comportamiento es bastante fácil de controlar, solo por medio del coeficiente de fricción y la fuerza normal. Además, son fáciles de construir y de bajo costo. [4]

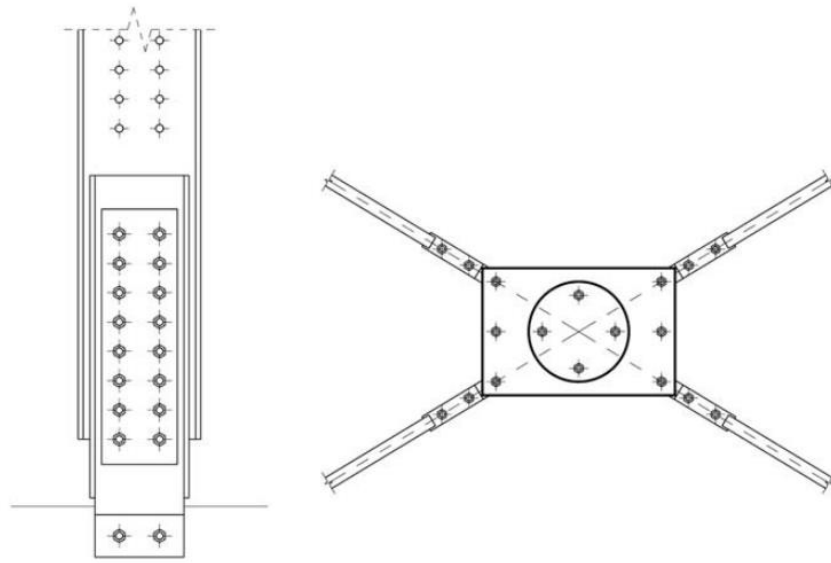


Figura 1. Configuraciones de los disipadores por fricción (izquierda: disipador por tracción y compresión; derecha, disipador a solo a tracción) – Fuente: Adaptado de Pall, A., Pall [3]

4.4. ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL PUSH-OVER

El análisis no lineal estático corresponde a un método simplificado para evaluar directamente la respuesta no lineal de estructuras a movimientos fuertes del terreno causados por un sismo. Reglamento Colombiano de construcción Sismo Resistente NSR-10 [5]. Este análisis se realiza sometiendo a la estructura a fuerzas laterales que se ajustan a un patrón de aplicación establecido y que se incrementan de forma progresiva y monótonica hasta alcanzar el punto de falla de la estructura. Normalmente se compara el cortante en la base con el desplazamiento de un punto específico de la azotea o un punto de control previamente definido [6].

4.5. DAÑO SÍSMICO EN ESTRUCTURAS

El daño es el nivel de afectación causado por un sismo a las estructuras; en la ingeniería estructural generalmente se considera una afectación permanente en la edificación [6].

4.5.1. Clasificación de los indicadores de daño sísmico

Generalmente se consideran tres tipos de daño dependiendo de lo que se pretenda evaluar, local si se trata de un elemento en particular de la estructura, intermedio si se está analizando una zona y global si se está analizando toda la estructura [6].

4.5.2. Indicador de daño

Es un parámetro definido específicamente para medir la afectación de un sismo sobre una estructura; pueden incluir diferentes variables como deformaciones unitarias, curvaturas, rotaciones, desplazamientos, derivas, fuerzas absorbidas, energía disipada entre otros [6].

Los índices brindan información sobre el daño que sufre un elemento estructural; pueden ser acumulativos y no acumulativos. Los no acumulativos tienen la principal limitación de cuantificar el daño máximo instantáneo en la estructura. Existen dos formas básicas de cuantificar el daño local: la ductilidad y la deriva de entre piso. La ductilidad se define como la capacidad de un elemento estructural o una estructura de experimentar deformaciones inelásticas sin colapsar o perder resistencia; las relaciones de ductilidad (por rotación, curvatura o desplazamiento) se establecen como índices de daño no acumulativo [6].

5. DISEÑO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se definen las propiedades geométricas del marco y los materiales de los elementos estructurales; también se definen las propiedades de no linealidad del concreto, del acero de refuerzo, de los elementos tipo vigas y columnas. Se introduce al concepto y funcionamiento de un dissipador por fricción y se establecen los parámetros de modelación de este elemento en particular. Se presenta la metodología de análisis aplicada para obtener la respuesta dinámica de la estructura y finalmente, se indica la demanda en forma de acelerogramas a los que se someterá el marco en estudio y se fijan los escenarios de análisis sobre los que se desarrollará esta investigación.

5.1. ESTRUCTURA OBJETO DE ESTUDIO

La estructura de estudio es una cuya altura y sistema estructural son convencionales y están presentes en las zonas urbanas de la ciudad de Medellín y el Valle de Aburrá en general. Esta consiste en un pórtico de concreto reforzado de ocho niveles. Las propiedades del concreto y del acero de refuerzo son presentados en la Tabla 1. El pórtico tiene una altura de 3000 mm entre pisos y tres vanos de 6000 mm de distancia entre pilares; las columnas y vigas tienen secciones transversales de 600mm x 600mm y 400mm x 600mm respectivamente. El refuerzo de columnas y vigas se determinó para una aceleración de aproximadamente 1.15 veces la aceleración espectral de los sismos implementados en el análisis, y se muestra en la Tabla 2. Se emplea un coeficiente de modificación de respuesta R con un valor de 7.00.

Tabla 1. Propiedades de los materiales.

Material	f'c [Mpa]	E [Mpa]	Fy [Mpa]
Concreto	21	21737	-----
Acero de refuerzo	-----	200000	422

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Propiedades geométricas y refuerzos en columnas y vigas del pórtico.

Elemento tipo	F'c (MPa)	b (mm)	h (mm)	Sección (mm ²)	As* (Superior) (-)(mm ²)	As** (Inferior) (+)(mm ²)	ρ (mm ² /mm ²)
Columna	21	600	600	360000	3980	3980	2.219
Vigas nivel 1	21	400	600	240000	1700	800	1.052
Vigas nivel 2	21	400	600	240000	1900	1000	1.052

Elemento tipo	F'c (MPa)	b (mm)	h (mm)	Sección (mm ²)	A _s [*]	A _s ^{**}	ρ (mm ² /mm ²)
					(Superior) (-)(mm ²)	(Inferior) (+)(mm ²)	
Vigas nivel 3	21	400	600	240000	1900	1000	1.052
Vigas nivel 4	21	400	600	240000	1700	800	1.052
Vigas nivel 5	21	400	600	240000	1500	720	1.052
Vigas nivel 6	21	400	600	240000	1200	720	1.052
Vigas nivel 7	21	400	600	240000	1000	720	1.052
Vigas nivel 8	21	400	600	240000	720	720	1.052

(^{*}) A_s= Refuerzo longitudinal

(^{**}) ρ = Cuantía de refuerzo transversal

Fuente: Elaboración propia

Las cargas en la estructura se asignaron directamente sobre las vigas y tienen una distribución triangular; los valores de las cargas muertas y vivas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Cargas actuantes en la estructura.

Carga	Ubicación en el elemento		
	Extremo inicial	Centro	Extremo Final
Muerta [kN/m]	0	3.40	0
Viva [kN/m]	0	1.1	0

Fuente: Elaboración propia

5.2. MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Con base en la información de las propiedades geométricas y de materiales del pórtico, este se modeló a través del software SAP2000®, el cual, ante excitaciones sísmicas, es capaz de estimar la respuesta dinámica de una edificación considerando las propiedades no lineales de la misma.

5.2.1. No linealidad de los materiales

Para el caso del concreto y con el fin de representar las propiedades no lineales de éste, se implementa el modelo de Mander confinado tal como se observa en la Figura 2a. Por otra parte, para el acero se considera el diagrama de esfuerzo-deformación tipo A-615 Gr60 (ver Figura 2b).

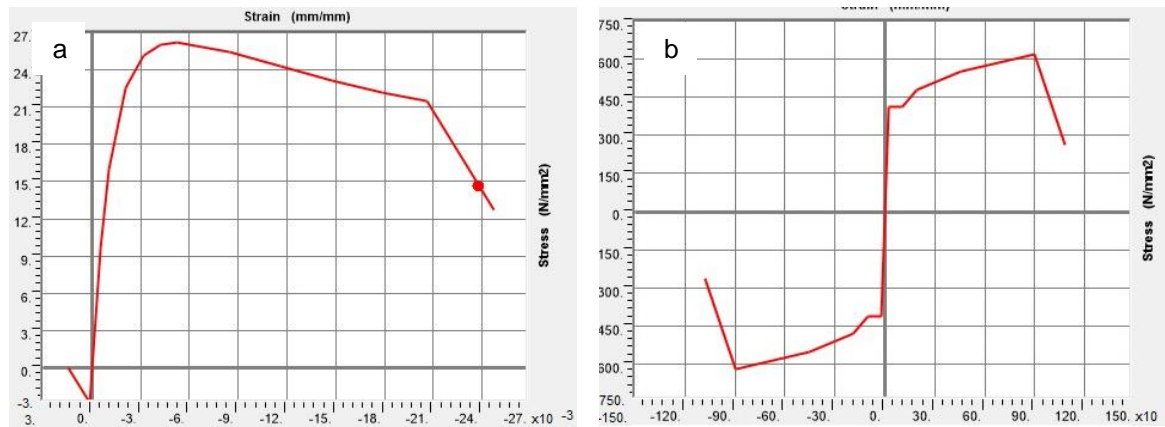


Figura 2. Diagrama de esfuerzo vs. deformación de (a) concreto confinado (b) acero de refuerzo A-615 Gr60 – Fuente: Elaboración propia

5.2.2. Comportamiento no lineal del pórtico

El comportamiento no lineal del pórtico se modela mediante rótulas plásticas en vigas y columnas (Figura 3 y Figura 4); utilizando los parámetros contenidos en la tabla 10-7 y 10-8 del código norteamericano ASCE 41-13 [7] y fundamentos teóricos para el análisis no lineal de elementos de concreto reforzado [8]. El programa SAP2000®, contiene por defecto la definición de estas rótulas, y en ambos casos (columnas y vigas), se define la flexión como modo de falla. En las rótulas plásticas de las columnas se modifican las cargas axiales para las cuales el software genera los diagramas de momento rotación. Estas cargas se obtienen discretizando la carga axial máxima a compresión obtenida del diagrama de P-M3 de la columna y que se muestra en el Figura 5. Se consideran 10 cargas, cada una de las cuales es menor que su antecesora en una décima parte de dicha carga axial y se presentan en la Figura 6.

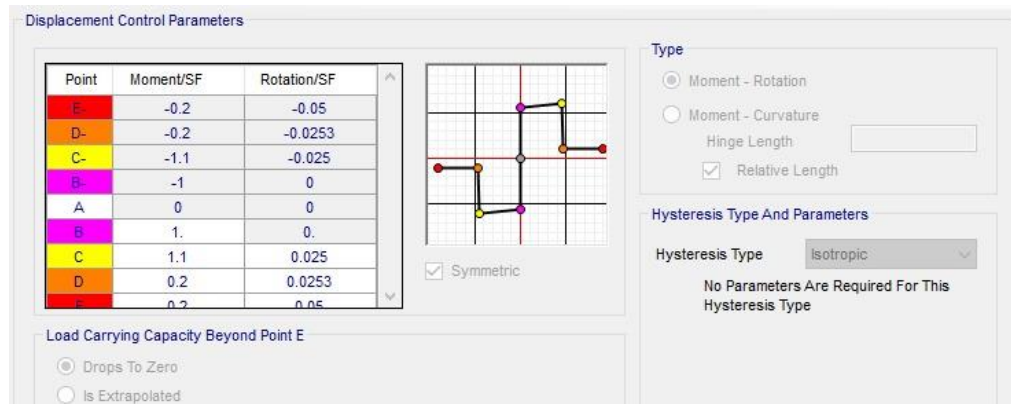


Figura 3. Rótula plástica de una viga definida en el programa SAP2000® – Fuente: Elaboración propia

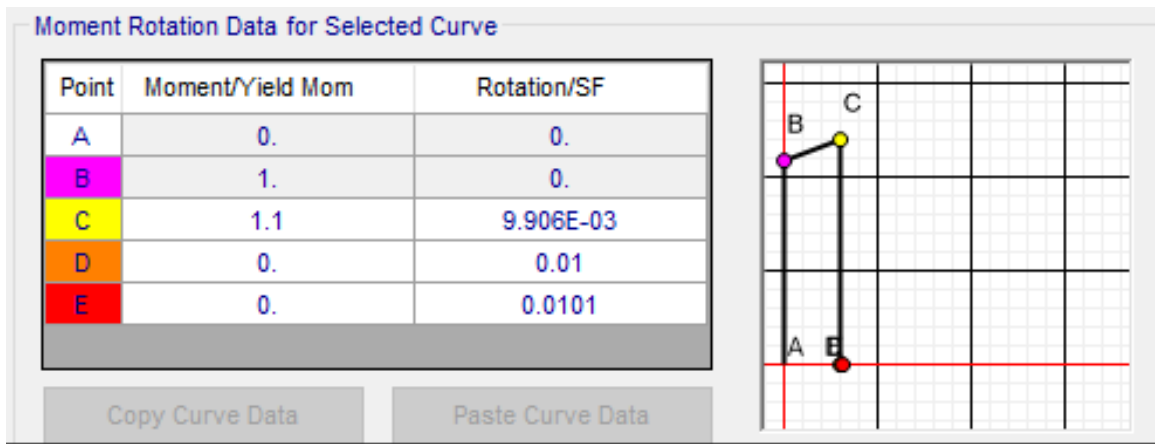


Figura 4. Rótula plástica de una columna definida en el programa SAP2000® -
Fuente: Elaboración propia

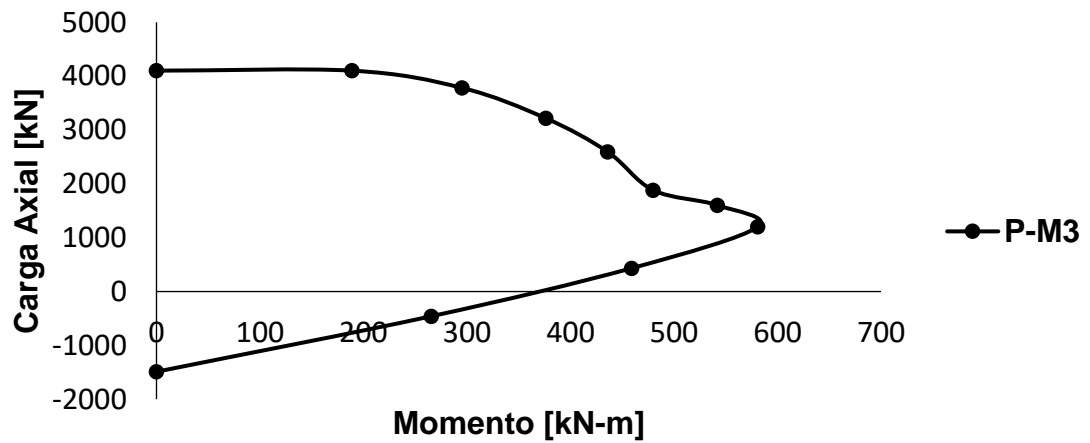


Figura 5. Diagrama P-M3 de columnas del pórtico. – Fuente: Elaboración propia

This Number of Axial Force Values Is Specified

Number of Axial Forces

Axial Force Data

	Axial Force
1	-4020.73
2	-3618.65
3	-3216.58
4	-2814.509
5	-2412.436
6	-2010.363
7	-1608.291
8	-1206.218
9	-804.1453
10	-402.0727

KN, m, C

Order Rows

Figura 6. Cargas axiales para diagramas de Momento-Rotación en columnas. –
Fuente: Elaboración propia

5.2.3. Curvaturas y rotaciones en vigas

Para determinar las relaciones de ductilidad por rotación en las vigas del pórtico, es necesario conocer su capacidad de rotación a fluencia (θ_{yi}), curvatura de fluencia y la longitud plástica, estas variables se obtienen mediante las ecuaciones (1), (2) y (3) respectivamente.

$$\theta_{yi} = \phi_{yi} l_p \quad (1)$$

$$\phi_{yi} = \frac{\varepsilon_y}{d - c} \quad (2)$$

$$l_p = 0.5h \quad (3)$$

Donde:

ϕ_{yi} = Curvatura de fluencia de la viga *i*.

l_p = Longitud plástica

ε_y = Deformación de fluencia del acero = 0.0021.

$c =$ Profundidad del eje neutro.

$d =$ altura útil de la viga.

De conformidad con las ecuaciones anteriores, las curvaturas y las rotaciones de las vigas del pórtico son presentadas en la Tabla 4.

Tabla 4. Curvaturas y rotaciones de las vigas del pórtico.

Elemento	$\phi_y (+)$ [rad/mm]	$\phi_y (-)$ [rad/mm]	$\theta_y (+)$ [rad]	$\theta_y (-)$ [rad]
Vigas nivel 1	5.05×10^{-6}	5.71×10^{-6}	1.51×10^{-3}	1.71×10^{-3}
Vigas nivel 2	5.20×10^{-6}	5.86×10^{-6}	1.56×10^{-3}	1.76×10^{-3}
Vigas nivel 3	5.20×10^{-6}	5.86×10^{-6}	1.56×10^{-3}	1.76×10^{-3}
Vigas nivel 4	5.05×10^{-6}	5.71×10^{-6}	1.51×10^{-3}	1.71×10^{-3}
Vigas nivel 5	4.98×10^{-6}	5.56×10^{-6}	1.49×10^{-3}	1.67×10^{-3}
Vigas nivel 6	4.98×10^{-6}	5.35×10^{-6}	1.49×10^{-3}	1.60×10^{-3}
Vigas nivel 7	4.98×10^{-6}	5.20×10^{-6}	1.49×10^{-3}	1.56×10^{-3}
Vigas nivel 8	4.98×10^{-6}	4.98×10^{-6}	1.49×10^{-3}	1.49×10^{-3}

Fuente: Elaboración propia

5.2.4. Curvaturas y rotaciones en columnas

Las relaciones de Momento- Curvatura de las columnas se calcularon mediante el programa SAP2000 ® ya que estas dependen fundamentalmente de la carga axial actuante en la columna; se obtuvieron las gráficas para las siguientes cargas axiales: carga máxima a compresión, carga de falla balanceada, para una carga ubicada entre la máxima a compresión y la carga de falla balanceada, y sin carga axial; en el Figura 7 se muestran las relaciones Momento - Curvatura de las columnas. A partir de lo anterior e implementando la ecuación (2), se obtiene un valor para la curvatura de fluencia en columnas de $\phi_{yi} = 1.1 \times 10^{-5} \frac{rad}{mm}$.

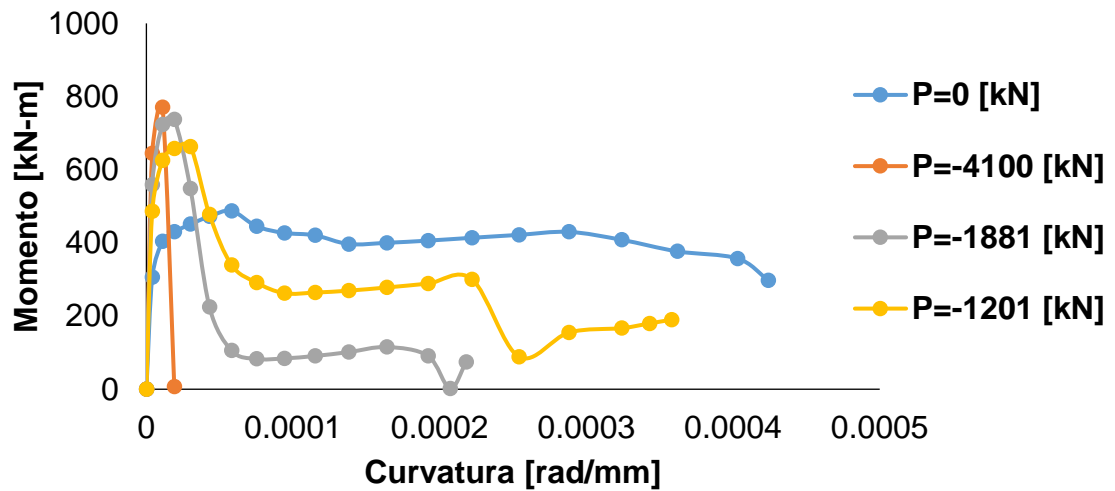


Figura 7. Diagramas de P-M-Ø de columnas del pórtico.

Aplicando la ecuación (1), es posible calcular la relación P-M- θ de las columnas; las cuales se muestran en la Figura 8. El valor de la rotación de fluencia en las columnas es de $\theta_{yi} = 0.0033 \text{ Rad}$.

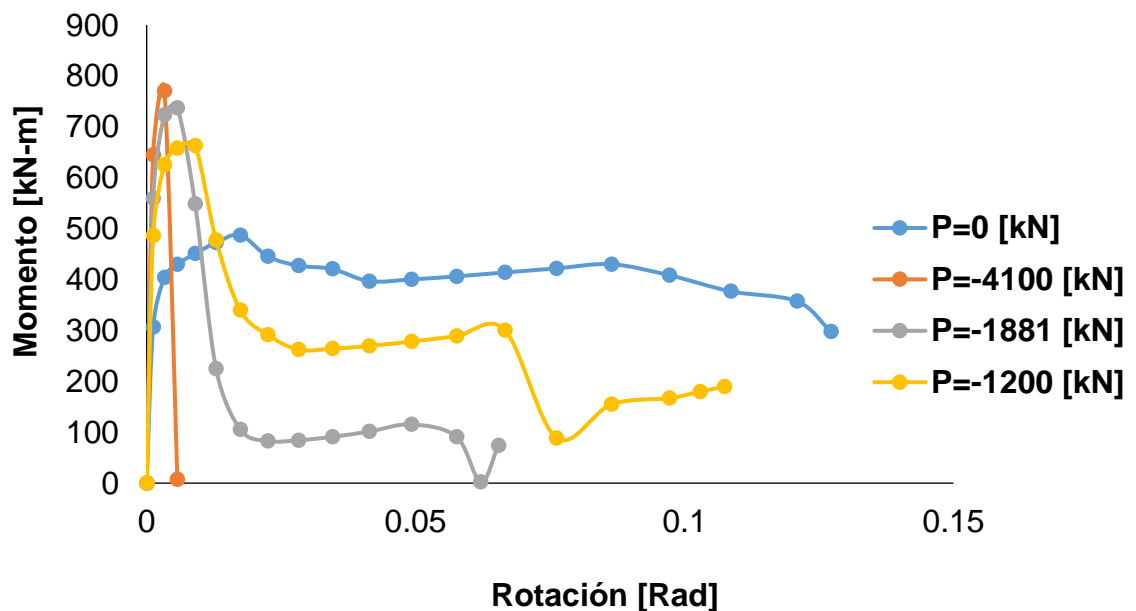


Figura 8. Diagramas de P-M- θ de columnas del pórtico.

5.2.5. Disipadores por fricción

La modelación de un disipador por fricción se realiza empleando un elemento tipo link que sigue el modelo Wen para materiales elastoplásticos. En la Figura 9 se presentan las propiedades geométricas, de rigidez y de no linealidad del disipador por fricción implementado y su configuración dentro de la estructura se puede apreciar en la Figura 10. Las propiedades generales de los disipadores son presentadas en la Tabla 5.

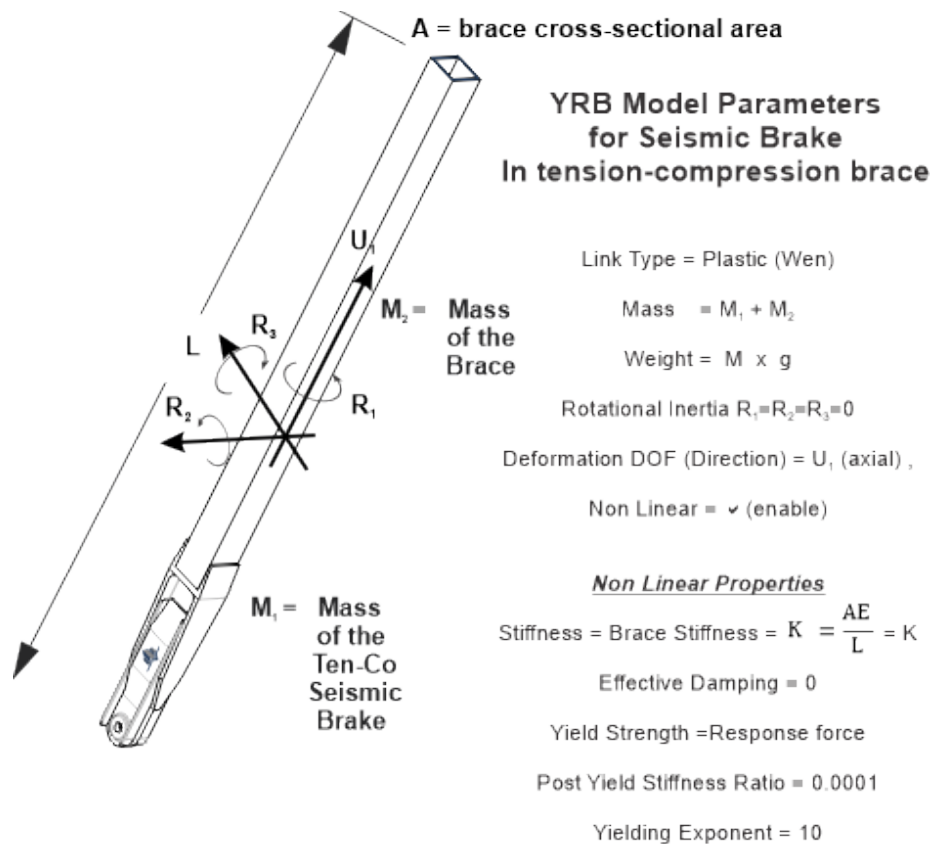


Figura 9. Propiedades para la modelación disipador por fricción. – Fuente: Quaketek [9]

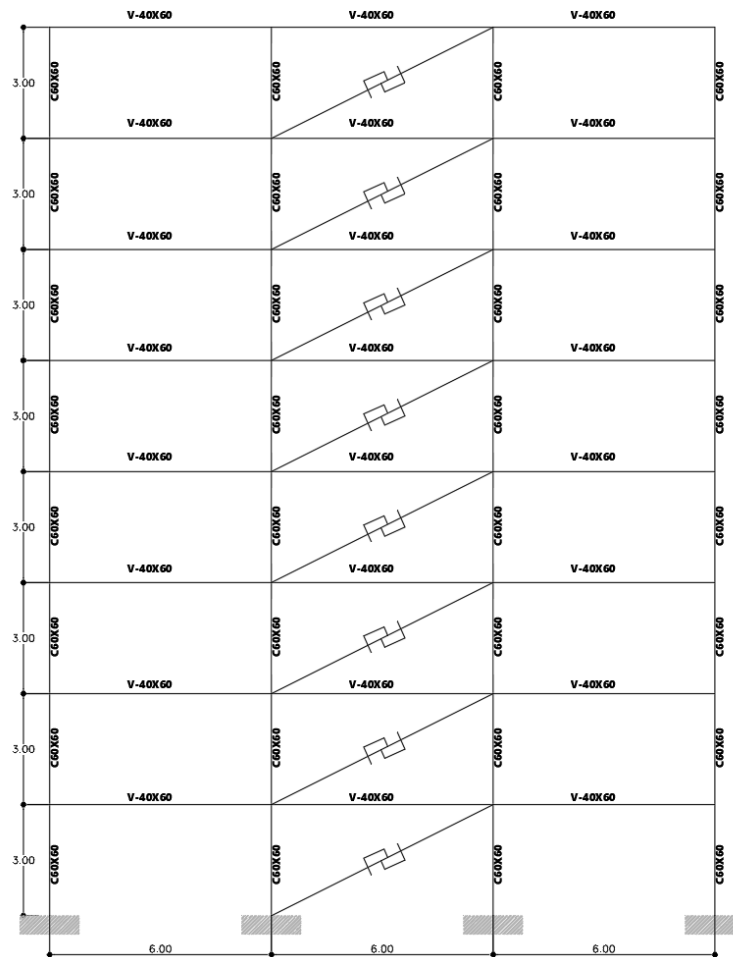


Figura 10. Configuración de disipadores en el pórtico– Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Propiedades generales de los disipadores por fricción.

Niveles	Módulo de elasticidad (MPa)	Longitud (mm)	Área Transversal (mm ²)	Rigidez (N/m)
1 a 6	200,000	6700	15600	465672
7	200,000	6700	7800	232836
8	200,000	6700	3900	116418

Fuente: Elaboración propia

La sección transversal de estos elementos se estableció mediante criterios de pandeo local; la carga de desplazamiento (Yield Strength) del disipador se varía con el objetivo de minimizar los efectos de los sismos en la estructura. El comportamiento de un pórtico armado con disipadores por fricción oscilará entre

dos condiciones, si la carga de deslizamiento es muy alta, entonces el comportamiento del pórtico tenderá a ser el de un pórtico arriostrado; por el contrario, si la carga de deslizamiento del disipador es muy baja, se comportará como un pórtico sin ningún tipo de arriostramiento; en consecuencia, cualquier respuesta de la estructura que se pretenda medir en función de la carga de deslizamiento del disipador, tendrá el comportamiento indicado en la Figura 11.

El funcionamiento de este tipo de amortiguadores se basa en la teoría general de la fricción. La fuerza de fricción (F_{ds}), es independiente del área de contacto y de la velocidad de deslizamiento (para amplitudes relativamente bajas), pero proporcional a la fuerza normal aplicada (F_N). En consecuencia, se puede calcular como la fricción de Coulomb mediante la ecuación (4) (Ver Figura 12)

$$F_{ds} = \mu F_N \quad (4)$$

En la Tabla 7 del capítulo de 6.1, se muestran las cargas óptimas de deslizamiento obtenidas para cada disipador según el acelerograma analizado.



Figura 11. Respuesta vs carga de deslizamiento – Fuente: Elaboración propia

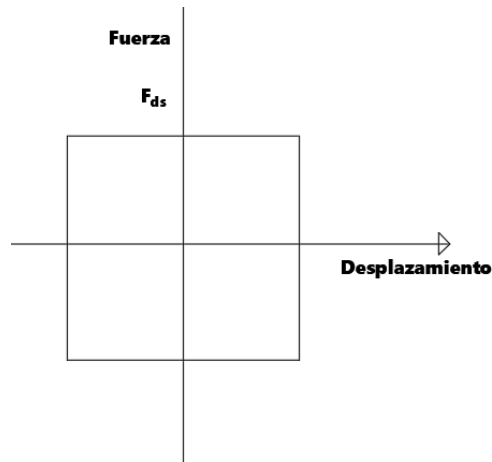


Figura 12. Modelo SDOF de fricción de Coulomb. – Fuente: Elaboración propia

5.3. DEFINICIÓN DE LA DEMANDA SÍSMICA

La demanda sísmica ante la cual se evaluó el desempeño sísmico de la estructura consistió en 14 acelerogramas cuya máxima aceleración del terreno es de 0.55g. La razón de analizar la estructura ante 14 sismos diferentes es debido a que los resultados de la respuesta calculada son sensibles a las características particulares de la demanda y al interés de ampliar el espectro de las sollicitaciones de sismo sobre el pórtilco. El espectro de pseudo aceleraciones de los 14 acelerogramas se muestra en el Figura 13.

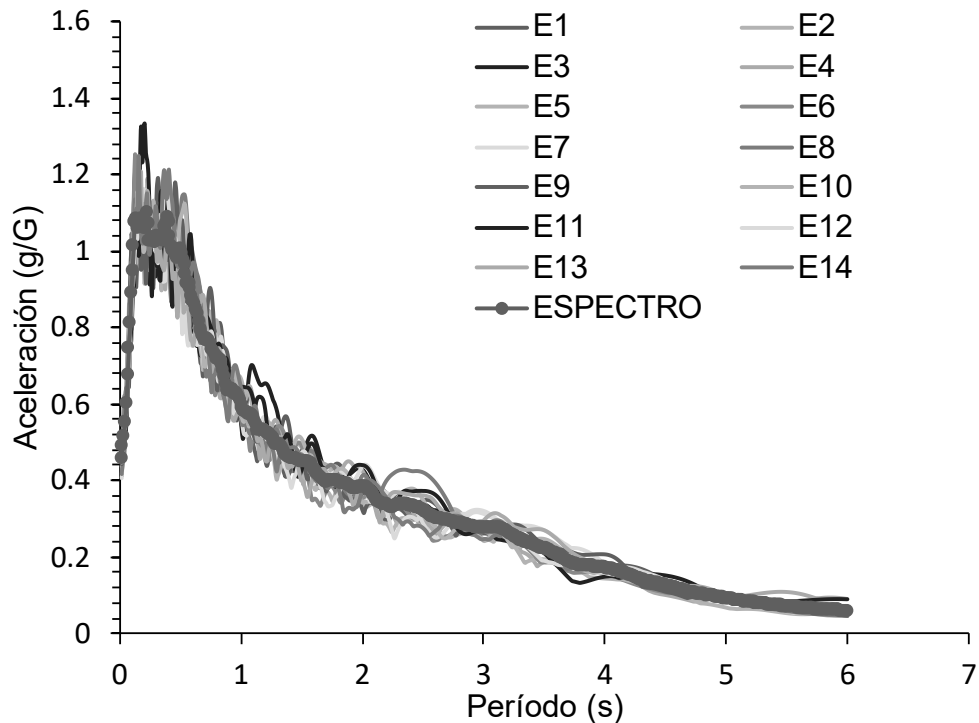


Figura 13. Espectro de aceleraciones para un 5% de amortiguamiento - E1 a E14 (g/G). – Fuente: Elaboración propia

5.4. OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL

Para obtener la respuesta de la estructura frente a los 14 acelerogramas antes mencionados, se utilizó el programa SAP2000® y se ejecutó un análisis no lineal tiempo historia aplicando el método de integración directa de Newmark [10].

5.5. ESCENARIOS DE ANÁLISIS, DISIPACIÓN DE ENERGÍA E INDICES DE DAÑO

A continuación, se presentan dos (2) escenarios de análisis.

5.5.1. Pórtico de concreto armado sin disipadores por fricción

Este es el escenario habitual de las estructuras de uso común, la resistencia a las fuerzas sísmicas y la disipación de energía son de exclusiva responsabilidad de los componentes estructurales del pórtico; en particular, las vigas son las que suelen concentrar el mayor daño debido al diseño por capacidad. Un indicador de la energía sísmica que disipa una viga se puede obtener mediante la ecuación (5) y el indicador de la cantidad de energía disipada por todas las vigas puede estimarse mediante la ecuación (6).

$$E_i = \phi M_{ni} \theta_{pi} \quad (5)$$

$$E = \sum_{i=1}^k \phi M_{ni} \theta_{pi} \quad (6)$$

Dónde:

ϕM_{ni} = Capacidad a momento de la viga i

θ_{pi} = Rotación plástica máxima en la viga i

5.5.2. Pórtico de concreto armado con disipadores por fricción

En el segundo escenario de análisis, una estructura convencional es equipada con elementos de disipación de energía para eliminar o reducir el daño que experimenta la edificación una vez se someta a un movimiento del terreno.

La carga óptima de cada dispositivo de disipación se obtiene mediante un proceso iterativo en el cual, después de realizar el respectivo análisis de la estructura, se calculan los nuevos índices de disipación de energía en las vigas para cada acelerograma, teniendo en cuenta que la carga óptima de cada configuración de disipadores es aquella cuyo comportamiento esté de acuerdo con lo mostrado en la Figura 11. Finalmente, se promedian las cargas obtenidas en cada acelerograma y se define un único set de cargas del disipador por nivel para los cuales se realiza nuevamente el análisis descrito anteriormente.

El grado de afectación en la estructura se determinó a través de las relaciones de ductilidad global en el marco y relaciones de ductilidad local por rotación en las vigas y columnas.

5.5.3. Análisis estático no lineal push-over

Con el objeto de obtener el desplazamiento de fluencia de la estructura, se realiza el análisis push-over; para esto se definió que el caso de carga estático no lineal (horizontal monotónico) se ejecutó posterior a la aplicación del caso de carga 1.2D + 1.6L; y se aplicó de acuerdo con la forma del modo fundamental de la estructura.

6. RESULTADOS

En el presente capítulo se reportan los resultados obtenidos luego de desarrollar la metodología propuesta en la presente investigación.

6.1. CARGA ÓPTIMA DE DESLIZAMIENTO DE LOS DISIPADORES POR FRICCIÓN

Se procedió de conformidad con lo descrito en el numeral 5.5.2; los resultados de los diferentes sets de cargas evaluados y del set de carga óptima de deslizamiento de los disipadores se presentan en la Tabla 6 y Tabla 7 para facilitar su interpretación. En estas se muestra el índice de disipación de energía de las vigas, el cual es el criterio usado para comparar la eficiencia de los sets de cargas de los disipadores.

Tabla 6. Sets de cargas de deslizamiento de disipadores de energía.

Señal (S)	Set de cargas (kN)	Nivel								E (kJ)
		1	2	3	4	5	6	7	8	
S1	1	300	300	300	300	300	300	150	50	22.63
	2	350	350	350	350	350	350	150	50	21.54
	3	800	800	800	800	800	800	300	50	26.10
S2	1	900	900	900	900	900	900	300	50	25.18
	2	1000	1000	1000	1000	1000	1000	300	50	25.09
	3	110	110	110	110	110	110	300	50	25.24
S3	1	600	600	600	600	600	600	150	50	18.52
	2	600	600	600	600	600	600	300	150	18.29
	3	650	650	650	650	650	650	300	50	19.37
S4	1	800	800	800	800	800	800	300	150	18.28
	2	900	900	900	900	900	900	300	150	17.81
	3	1000	1000	1000	1000	1000	1000	300	150	17.81
S5	1	800	800	800	800	800	800	300	50	21.82
	2	900	900	900	900	900	900	300	50	20.96
	3	100	100	100	100	100	100	300	50	20.98
S6	1	500	500	500	500	500	500	150	50	22.10
	2	600	600	600	600	600	600	150	150	21.50
	3	650	650	650	650	650	650	150	50	22.14
S7	1	600	600	600	600	600	600	150	50	20.00
	2	600	600	600	600	600	600	300	150	19.66
	3	650	650	650	650	650	650	150	50	19.96
S8	1	400	400	400	400	400	400	150	50	27.33
	2	450	450	450	450	450	450	150	50	27.01

Señal (S)	Set de cargas (kN)	Nivel								E (kJ)
		1	2	3	4	5	6	7	8	
	3	500	500	500	500	500	500	150	50	27.09
S9	1	650	650	650	650	650	650	300	50	24.84
	2	700	700	700	700	700	700	300	150	24.71
	3	800	800	800	800	800	800	300	150	25.50
S10	1	300	300	300	300	300	300	15	5	21.53
	2	400	400	400	400	400	400	150	50	20.59
	3	500	500	500	500	500	500	150	50	21.50
S11	1	350	350	350	350	350	350	150	50	25.33
	2	650	650	650	650	650	650	150	50	24.70
	3	700	700	700	700	700	700	300	50	25.13
S12	1	700	700	700	700	700	700	300	50	12.34
	2	800	800	800	800	800	800	300	50	11.68
	3	900	900	900	900	900	900	300	50	12.14
S13	1	700	700	700	700	700	700	300	50	22.65
	2	800	800	800	800	800	800	300	50	21.84
	3	900	900	900	900	900	900	300	50	22.00
S14	1	600	600	600	600	600	600	300	150	20.18
	2	650	650	650	650	650	650	300	150	20.17
	3	700	700	700	700	700	700	300	150	20.69

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Sets de cargas de deslizamiento óptimas por señal de los disipadores de energía.

Señal (S)	Set de cargas por nivel (kN)								E [kJ]
	1	2	3	4	5	6	7	8	
S1	350	350	350	350	350	350	150	50	21.54
S2	1000	1000	1000	1000	1000	1000	300	50	25.09
S3	600	600	600	600	600	600	300	150	18.29
S4	900	900	900	900	900	900	300	150	17.81
S5	900	900	900	900	900	900	300	50	20.96
S6	600	600	600	600	600	600	150	150	21.50
S7	600	600	600	600	600	600	300	150	19.66
S8	450	450	450	450	450	450	150	50	27.01
S9	700	700	700	700	700	700	300	150	24.71
S10	400	400	400	400	400	400	150	50	20.59
S11	650	650	650	650	650	650	150	50	24.70
S12	800	800	800	800	800	800	300	50	11.68

Señal (S)	Set de cargas por nivel (kN)								E [kJ]
	1	2	3	4	5	6	7	8	
S13	800	800	800	800	800	800	300	50	21.84
S14	650	650	650	650	650	650	300	150	20.17
Promedio (kN)	671	671	671	671	671	671	246	93	21.11

Fuente: Elaboración propia

6.2. CURVA DE CAPACIDAD DE LA ESTRUCTURA

La curva de capacidad de la estructura (Figura 14) se obtiene para determinar el desplazamiento de fluencia de la estructura, el cual se estima en 45mm; esto permitió establecer las relaciones de ductilidad global de la edificación propuesta en el estudio.

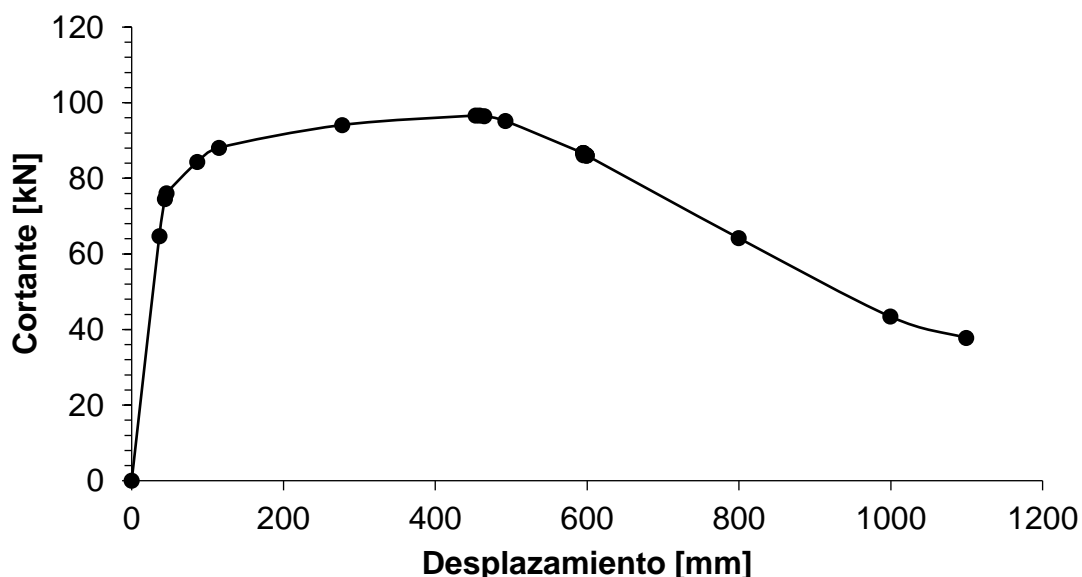


Figura 14. Curva de capacidad de la estructura. – Fuente: Elaboración propia

6.3. PRIMER ESCENARIO: PÓRICO SIN DISIPADORES POR FRICCIÓN

Se presentan los resultados del análisis no lineal ejecutado para cada uno de los catorce (14) acelerogramas. En la Tabla 8 se muestra el indicador de la energía disipada (E), la máxima demanda de rotación plástica positiva θ_D (+) y negativa θ_D (-), la máxima demanda de ductilidad (μ) del elemento tipo vigas de la estructura en investigación. Así mismo, se presenta la máxima demanda de ductilidad global (μ_D) en la estructura.

Tabla 8. Demanda de ductilidad en la estructura sin disipadores.

Señal	E (kJ)	θ_D (+) (Rad)	θ_D (-) (Rad)	θ_y (+) (Rad)	θ_y (-) (Rad)	μ_{max} (+)	μ_{max} (-)	Δy global (mm)	Δ_{max} (mm)	μ_d
S1	80.76	0.00882	0.00886	0.00156	0.00176	6.65	6.04	45	147.10	3.27
S2	97.5	0.00819	0.00825	0.00156	0.00176	6.25	5.69	45	150.10	3.34
S3	76.34	0.00617	0.00644	0.00156	0.00176	4.95	4.66	45	117.00	2.60
S4	104.9	0.00997	0.01010	0.00156	0.00176	7.39	6.76	45	187.90	4.17
S5	71.57	0.00668	0.00682	0.00156	0.00176	5.28	4.87	45	135.60	3.01
S6	72.14	0.00681	0.00702	0.00156	0.00176	5.36	4.99	45	131.80	2.93
S7	79.15	0.00937	0.00947	0.00156	0.00176	7.00	6.39	45	169.30	3.76
S8	80.86	0.00601	0.00622	0.00156	0.00176	4.85	4.54	45	118.00	2.62
S9	76.2	0.00640	0.00666	0.00156	0.00176	5.10	4.79	45	124.20	2.76
S10	83.54	0.00763	0.00768	0.00156	0.00176	5.89	5.37	45	147.40	3.28
S11	92.56	0.00780	0.00791	0.00156	0.00176	6.00	5.50	45	139.80	3.11
S12	75.55	0.00600	0.00628	0.00156	0.00176	4.84	4.57	45	120.20	2.67
S13	95.55	0.00718	0.00717	0.00156	0.00176	5.60	5.08	45	132.80	2.95
S14	77.27	0.00686	0.00708	0.00156	0.00176	5.40	5.03	45	137.60	3.06
Prom.	83.13	0.00742	0.00757	0.00156	0.00176	5.75	5.3	45	139.9	3.11

Fuente: Elaboración propia

En la se Tabla 9 presentan las máximas rotaciones plásticas (θ_D) y las máximas demandas de ductilidad en columnas (μ_{max}).

Tabla 9. Demanda de ductilidad en columnas. Estructura sin disipadores.

Señal	θ_D (Rad)	θ_y (Rad)	μ_{max}
S1	0.00476	0.00330	2.44
S2	0.00395	0.00330	2.2
S3	0.00089	0.00330	1.27
S4	0.00578	0.00330	2.75
S5	0.00259	0.00330	1.78
S6	0.00252	0.00330	1.76
S7	0.00534	0.00330	2.62
S8	0.00212	0.00330	1.64
S9	0.00203	0.00330	1.62
S10	0.00360	0.00330	2.09
S11	0.00256	0.00330	1.78
S12	0.00159	0.00330	1.48
S13	0.00326	0.00330	1.99
S14	0.00150	0.00330	1.46
Promedio	0.003034	0.0033	1.92

Fuente: Elaboración propia

6.4. SEGUNDO ESCENARIO: PÓRTICO CON DISIPADORES POR FRICCIÓN

Una vez determinado el set de carga optima promedio de los disipadores, se modeló y se analizó la estructura con los dispositivos de disipación de energía para cada acelerograma definido previamente; nuevamente, se obtuvieron las demandas de ductilidad global máxima de la estructura, demandas de ductilidad máxima por rotación en las vigas y las columnas

Se presentan los resultados del análisis no lineal ejecutado para cada uno de los catorce (14) acelerogramas. En la Tabla 10 se muestra el indicador de la energía disipada (E), la máxima demanda de rotación plástica positiva θ_D (+) y negativa θ_D (-), la máxima demanda de ductilidad (μ) del elemento tipo vigas de la estructura en investigación. Así mismo, se presenta la máxima demanda de ductilidad global (μ_d) en la estructura.

Tabla 10. Índice de energía disipada en vigas y demanda de ductilidad en la estructura con disipadores.

Señal	E (kJ)	θ_D (+) (Rad)	θ_D (-) (Rad)	θ_y (+) (Rad)	θ_y (-) (Rad)	μ_{max} (+)	μ_{max} (-)	Δy global (mm)	Δ_{max} (mm)	μ_d
S1	21.22	0.00359	0.00357	0.00156	0.00176	3.30	3.03	45	72.70	1.62
S2	23.1	0.00255	0.00277	0.00156	0.00176	2.63	2.58	45	60.20	1.34
S3	28.12	0.00285	0.00313	0.00156	0.00176	2.82	2.78	45	77.30	1.72
S4	19.54	0.00228	0.00176	0.00156	0.00176	2.46	2.00	45	67.00	1.49
S5	24.7	0.00414	0.00432	0.00156	0.00176	3.65	3.46	45	78.10	1.74
S6	18.65	0.00150	0.00174	0.00156	0.00176	1.96	1.99	45	59.50	1.32
S7	12.47	0.00150	0.00149	0.00156	0.00176	1.96	1.85	45	46.40	1.03
S8	24.18	0.00124	0.00154	0.00156	0.00176	1.80	1.87	45	61.20	1.36
S9	21.83	0.00199	0.00238	0.00156	0.00176	2.27	2.35	45	67.80	1.51
S10	23.33	0.00353	0.00365	0.00156	0.00176	3.26	3.08	45	67.10	1.49
S11	19.56	0.00244	0.00269	0.00156	0.00176	2.56	2.53	45	54.80	1.22
S12	20.14	0.00171	0.00200	0.00156	0.00176	2.10	2.14	45	58.40	1.30
S13	26.73	0.00351	0.00372	0.00156	0.00176	3.25	3.12	45	67.80	1.51
S14	24.89	0.00199	0.00190	0.00156	0.00176	2.27	2.08	45	67.00	1.49
Prom.	22.03	0.0025	0.0026	0.0016	0.0018	2.59	2.49	45	64.66	1.44

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 11 se presentan las máximas rotaciones plásticas (θ_D) y las máximas demandas de ductilidad en columnas (μ_{max}).

Tabla 11. Demanda de ductilidad en columnas. Estructura con disipadores.

Señal	θ_D [Rad]	θ_y [Rad]	μ_{max}
S1	0.00195	0.00330	1.59
S2	0.00088	0.00330	1.27
S3	0.00250	0.00330	1.76
S4	0.00078	0.00330	1.24
S5	0.00244	0.00330	1.74
S6	0.00115	0.00330	1.35
S7	0.00062	0.00330	1.19
S8	0.00124	0.00330	1.37
S9	0.00167	0.00330	1.51
S10	0.00170	0.00330	1.51
S11	0.00109	0.00330	1.33
S12	0.00078	0.00330	1.24
S13	0.00165	0.00330	1.5
S14	0.00136	0.00330	1.41
Promedio	0.001413	0.0033	1.43

Fuente: Elaboración propia

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de la investigación proporcionan una sólida evidencia que respalda la hipótesis de que el uso de disipadores por fricción es una técnica efectiva para controlar el daño sísmico en estructuras de concreto convencionales ubicadas en zonas de amenaza sísmica alta. Se observó una notable y significativa mejora en el desempeño sísmico del pórtico equipado con los disipadores por fricción en comparación con el pórtico sin ellos. La Figura 15 muestra que el índice de disipación de energía por las vigas (E) en pórtico con disipadores se redujo en más de la mitad en comparación con el pórtico sin disipadores, presentando la máxima reducción en un 84.2% para S7 y una mínima reducción de 63.2% para la S3, en promedio la reducción de este índice fue de 73.1%.

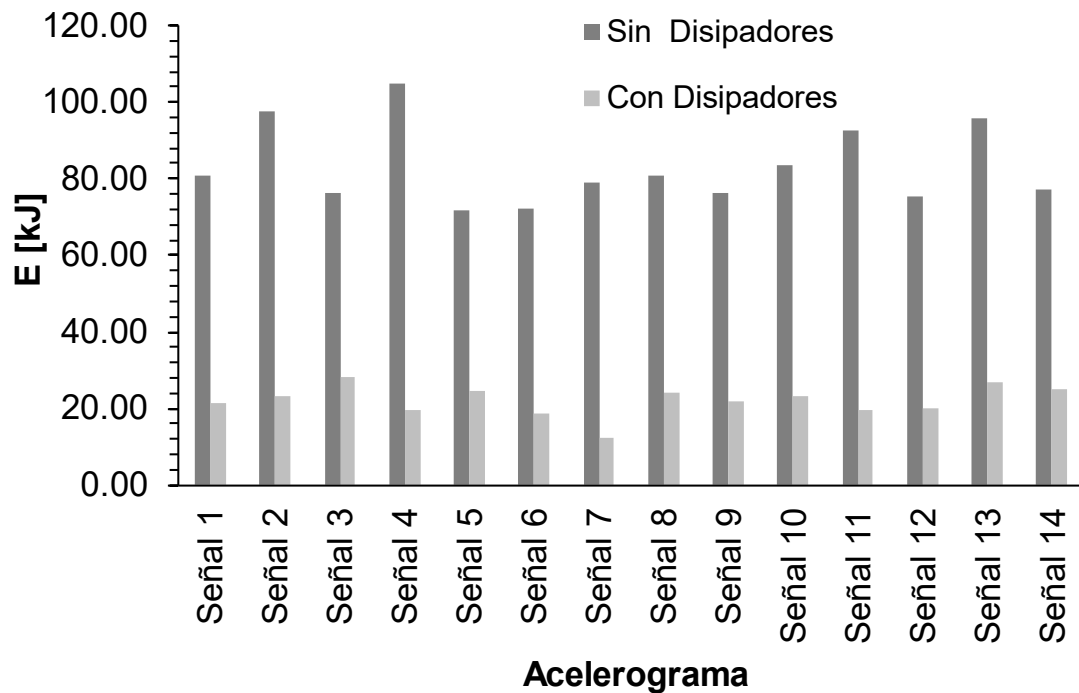


Figura 15. Comparación del índice de disipación de energía en vigas [E] – Fuente: Elaboración propia

La Figura 16 se compara la demanda de ductilidad global en el pórtico para los dos escenarios de análisis. Se evidencia una tendencia general de reducción del 50% en los desplazamientos laterales a nivel de azotea, mientras que la máxima reducción presentada registra un valor de 72.59% para la S7, y la mínima un valor de 33.94% para la S3.

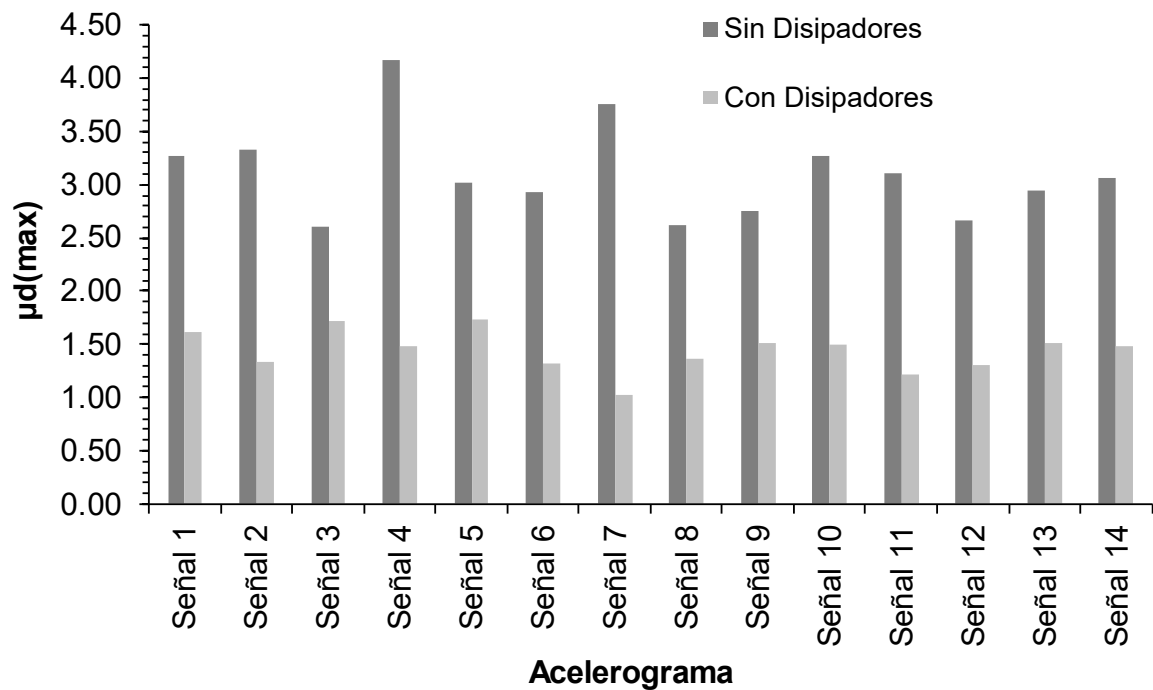


Figura 16. Comparación de demandas de ductilidad global – Fuente: Elaboración propia

La Figura 17 muestra comparativamente las máximas demandas de ductilidad en elementos tipo viga en los escenarios de análisis; la máxima reducción registrada es de 72.0 % para la señal 7 y la mínima con un valor de 30.90% para la señal 5. En promedio la reducción de la demanda de ductilidad obtenida con el pórtico con disipadores fue de 52.80% en relación al pórtico sin disipadores.

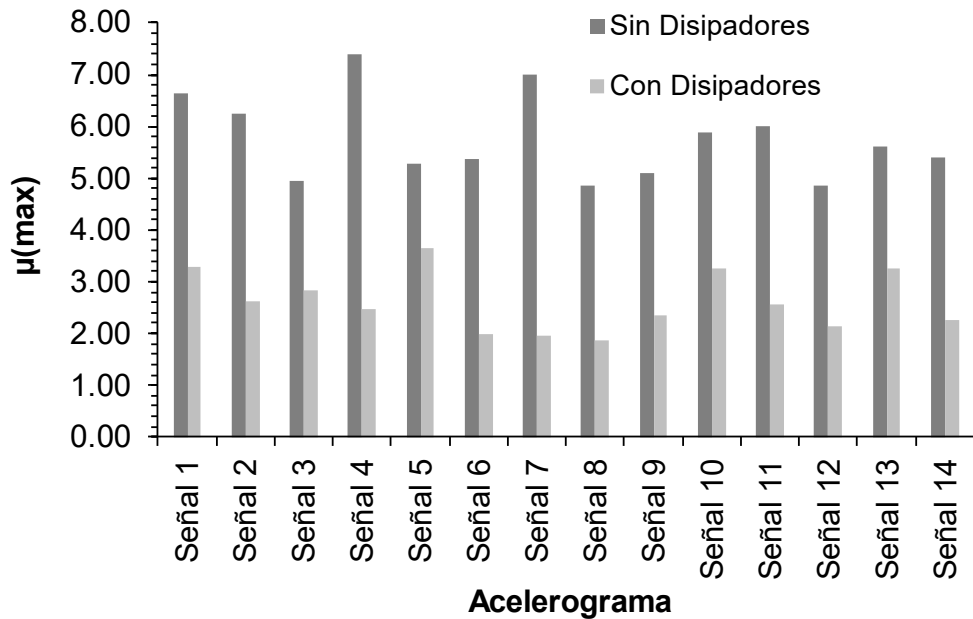


Figura 17. Comparación de demandas de ductilidad en vigas – Fuente: Elaboración propia

La Figura 18 muestra que, en comparación de los dos escenarios de análisis, en las columnas la reducción de la demanda de ductilidad fue 25.1%. A excepción de la S3, dónde se incrementó la demanda, esto puede indicar que la estructura en un tiempo determinado, bajo la excitación sísmica se comportó como un pórtico arriostrado y no como un sistema pórtico- disipador.

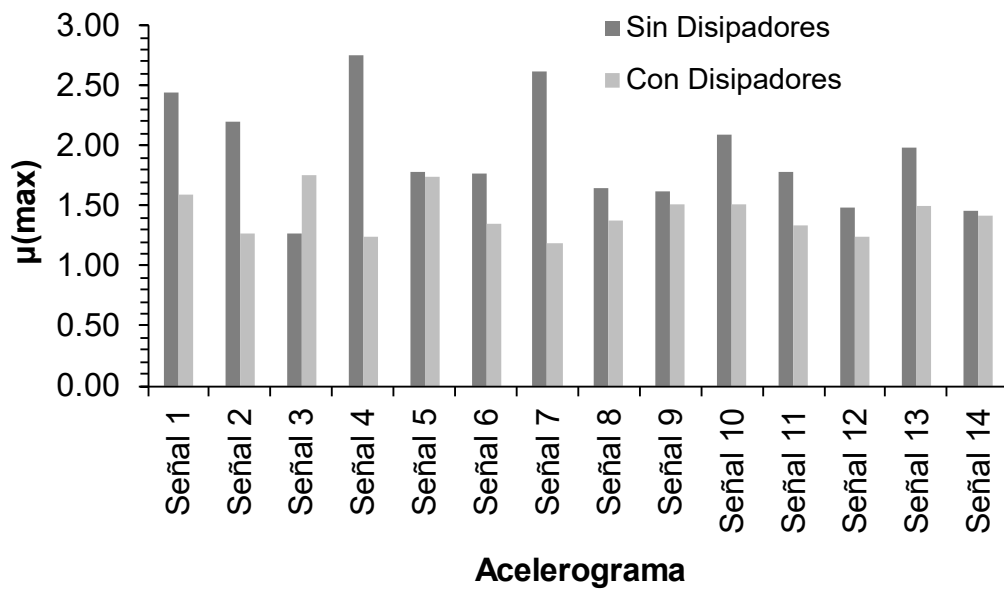


Figura 18. Comparación de demandas de ductilidad en columnas – Fuente: Elaboración propia

La confiabilidad de los resultados obtenidos en este estudio se respalda mediante la aplicación de una metodología clara y concisa, soportada por un riguroso proceso de modelación y análisis de la estructura. Esta metodología utiliza conceptos teóricos que describen el comportamiento no lineal de las estructuras de concreto armado frente a excitaciones dinámicas, lo que garantiza la solidez de los hallazgos. Los investigadores interesados en replicar este análisis podrán seguir la misma metodología y obtener resultados comparables.

Al comparar nuestros resultados con investigaciones previas, se encontraron similitudes que respaldan estos hallazgos. Las reducciones en deformaciones y solicitaciones estructurales son similares a las reportadas en los estudios de Naghshineh et al. [1] y Pall y Pall [3]. Estas similitudes no solo confirman nuestros resultados, sino que también validan la metodología implementada en esta investigación. Es importante tener en cuenta que existen diferencias significativas en la definición de las cargas de deslizamiento de los disipadores y, en consecuencia, en la metodología utilizada para obtener los resultados. Naghshineh et al. [1] sigue una metodología basada en la recomendación dada por Quaketek [9], que estima la carga óptima de deslizamiento de los disipadores como un tercio de la fuerza cortante en el piso y evalúa los efectos de estos dispositivos comparando las solicitaciones en los elementos estructurales.

En este estudio, se llevó a cabo la calibración de los disipadores mediante el análisis no lineal de la estructura propuesta en la presente investigación, centrándose en el comportamiento del índice de energía disipada en las vigas (E). Este índice considera el momento de fluencia de las vigas y las rotaciones plásticas que ocurren en respuesta a los sismos analizados. El objetivo principal fue ajustar el comportamiento del índice E de acuerdo con los principios teóricos que rigen las respuestas de estructuras equipadas con este tipo de dispositivos, tal como se ilustra en la Figura 11.

Este enfoque reviste una importancia significativa, ya que aporta a la ingeniería estructural colombiana al desarrollar una metodología para el diseño de estructuras de concreto que incorporan disipadores por fricción. Además, los resultados obtenidos son coherentes con la teoría existente sobre los principios de disipación de energía y el comportamiento no lineal de las estructuras. Esto refuerza la validez y aplicabilidad de los hallazgos en el campo de la ingeniería civil.

8. CONCLUSIONES

En resumen, las conclusiones obtenidas a partir de la realización de este trabajo de investigación son las siguientes:

1. Los resultados respaldan sólidamente la hipótesis de que el uso de disipadores por fricción es una técnica efectiva para controlar el daño sísmico en estructuras de concreto convencionales ubicadas en zonas de alta amenaza sísmica
2. Se observó una notable y significativa mejora en el desempeño sísmico del pórtico equipado con los disipadores por fricción en comparación con el pórtico sin ellos. Los valores reducidos de las variables principales evaluadas respaldan esta afirmación, con una disminución del 73.10% en el índice de disipación de energía en vigas (E), una reducción del 52.80% en la demanda de ductilidad global, y disminuciones del 54.4% y 53.50% en las demandas de ductilidad en vigas y columnas, respectivamente.
3. Los disipadores por fricción demostraron absorber al menos el 50% de la energía sísmica, lo que contribuye a reducir las deformaciones inelásticas en los elementos estructurales y mejorar el comportamiento global de la estructura durante un sismo.
4. Los resultados y la metodología aplicada en este estudio tienen importantes implicaciones para futuras investigaciones relacionadas con los sistemas de disipación por fricción en estructuras de concreto reforzado. Los hallazgos obtenidos y la metodología empleada pueden servir como punto de partida y referencia para el desarrollo de investigaciones posteriores en este campo. Se recomienda que se realicen más estudios que exploren la efectividad de los disipadores por fricción en diferentes tipos de estructuras y escenarios sísmicos.
5. Se espera que este trabajo sea una contribución a la ingeniería estructural colombiana en el desarrollo de una metodología de diseño de estructuras de concreto armado equipadas con disipadores de energía por fricción.

9. REFERENCIAS

- [1] A. Naghshineh, A. Kassem, A.-G. Pilorge, O. R. Galindo, y A. Bagchi, «Seismic Performance of Reinforced Concrete Frame Buildings Equipped with Friction Dampers», en *Structures Congress 2018*, Fort Worth, Texas: American Society of Civil Engineers, abr. 2018, pp. 94-101. doi: 10.1061/9780784481325.011.
- [2] C. Pasquin, N. Leboeuf, R. Pall, y A. Pall, «Friction dampers for seismic rehabilitation of Eaton Building, Montreal», *Proc. Annu. Conf. - Can. Soc. Civ. Eng.*, vol. 2002, ene. 2002.
- [3] A. Pall y R. Pall, «Performance Based Design Using Pall Friction Dampers - an Economical Design Solution», 2002. Accedido: 22 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/PERFORMANCE-BASED-DESIGN-USING-PALL-FRICTION-DESIGN-Pall-Pall/409602a398dc5a8e536d9ee107f742b9395d3618>
- [4] A. Lago, D. Trabucco, y A. Wood, *Damping Technologies for Tall Buildings: Theory, Design Guidance and Case Studies*. London, United Kingdom; Cambridge, MA, United States, 2018.
- [5] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR - 10*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.
- [6] R. L. Bonett Díaz, «Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada.», Ph.D. Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2003. Accedido: 22 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/handle/10803/6230>
- [7] American Society of Civil Engineers, *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, 41.^a ed. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2014. doi: 10.1061/9780784412855.
- [8] J. Moehle, *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*. New York, 2014.
- [9] «Seismic Design with Friction Dampers», *Quaketek | Earthquake protection*. <https://quaketek.com/seismic-design/> (accedido 23 de junio de 2023).
- [10] A. K. Chopra, *Dynamics of Structures in SI Units*. 2019.