

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

COLEGIO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Facultad de Ingeniería Culiacán

Programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería



**“Desempeño sísmico de edificios de acero con contravientos restringidos
al pandeo usando INp”**

TESIS

Que como requisito para obtener el grado de
MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Presenta

Ing. José Clemente Valenzuela Beltrán

Director de tesis

Dr. Edén Bojórquez Mora

Codirector de tesis

Dr. Robespierre Chávez López

Culiacán, Sinaloa, febrero de 2026



Universidad Autónoma de Sinaloa

Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso



Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd.
Universitarios
C.P. 80010 Culiacán Sin. Méx.
Tel (667) 713 78 32 y
(667) 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

AGRADECIMIENTOS

Dedico este apartado a mi familia quienes me impulsaron a tomar una de las mejores decisiones de mi vida en realizar la presente investigación. Gracias por su apoyo desde el comienzo hasta el final, en especial a mi madre y a mi hermano, el Dr. Federico Valenzuela Beltrán, ya que gracias a su apoyo y paciencia pude concluir esta etapa. A mi padre, por ser siempre el motivo para seguir adelante.

A mi director de tesis Dr. Edén Bojórquez Mora y mi codirector Dr. Robespierre Chávez López por siempre estar presentes en cualquier duda y asesoramiento necesitado, brindando su experiencia y conocimiento conmigo.

A los estudiantes de doctorado en Ciencias de la Ingeniería el M.C. Alfredo Félix Soto y M.C. Juan Daniel Trasviña Soberanes, por brindarme siempre su apoyo y conocimiento en momentos de duda durante mi trayecto en la elaboración de esta tesis, y el Ing. Daniel Gaxiola Camacho por brindarme su amistad y conocimiento en los inicios de mis estudios.

A mi compañero de Maestría en Ciencias de la Ingeniería el Ing. José Ramón Madueño Sandoval por su amistad y por hacer que el tiempo que duró esta investigación fuera más fácil.

También un especial agradecimiento a mis profesores, los cuales, durante mi transcurso en la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, me brindaron su conocimiento de la mejor forma posible, así como su experiencia y anécdotas de vida, las cuales sirvieron mucho de inspiración para seguir adelante en los estudios.

Quiero agradecer a la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), específicamente a la Facultad de Ingeniería, por brindarme sus instalaciones donde fue posible llevar a cabo esta investigación.

Asi tambien, agradecer a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por haberme otorgado el apoyo económico durante este tiempo mediante el proyecto Ciencia De Frontera 2023 (CF-2023-G-1636).

DEDICATORIA

A mis padres

Por haber sido los primeros en brindarme educación en casa y por trasmitirme los valores con los que cuento hoy en día. Por ser siempre los primeros en apoyarme en todas las etapas de mi vida tanto en lo académico como laboral, por su gran esfuerzo para poder darme los estudios durante mi adolescencia los cuales han sido la base para estar aquí preparándome día con día. A ustedes muchas gracias, por tanto.

RESUMEN

En este proyecto se llevará a cabo un análisis detallado y un estudio exhaustivo sobre el desempeño sísmico de edificios de acero con contravientos restringidos al pandeo, empleando la medida de intensidad I_{Np} . El estudio abarcará tres edificaciones de baja y media altura correspondientes a 5, 10 y 15 niveles, todas ellas equipadas con contravientos restringidos al pandeo (CRP), y diseñadas con características homogéneas en términos de ductilidad, geometría en planta y ocupación. Estas edificaciones se considerarán situadas en una zona de suelo blando en la Ciudad de México y su diseño estructural se realizará conforme el reglamento y los lineamientos de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México [1]. El estudio incluirá un análisis dinámico modal espectral que garantice el cumplimiento de los estados límite de servicio y de colapso, en particular las distorsiones de entrepiso especificadas en el reglamento NTCDS-2020. Estas normas constituyen un marco técnico esencial para el diseño sísmico en México, asegurando la seguridad y funcionalidad de las estructuras en condiciones de sismo.

Para realizar el estudio del comportamiento de las edificaciones bajo acciones sísmicas se generarán modelos no lineales de los edificios en el software OpenSees [2] y se seleccionarán registros sísmicos característicos del sitio donde se consideran ubicadas las estructuras. Estos registros sísmicos se obtendrán de la base de datos del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico de México [3] y del Instituto de Ingeniería de la UNAM [4]. Los registros se escalarán usando la medida de intensidad $Sa(T_1)$ e I_{Np} . Posteriormente, se realizarán análisis dinámicos no lineales para obtener la respuesta sísmica de los edificios en términos de parámetros como distorsiones de entrepiso y aceleraciones de piso. Finalmente, con los resultados obtenidos, se realizará una comparación de la eficiencia de la medida de intensidad I_{Np} y $Sa(T_1)$, en términos de diferentes parámetros de demanda estructural.

Palabras clave: Intensidad sísmica, contravientos restringidos al pandeo, análisis dinámicos incrementales, aceleración de piso, distorsión de entrepiso.

ABSTRACT

In this project, a detailed analysis and comprehensive study on the seismic performance of steel buildings with buckling-restrained braces (BRBs) is carried out, employing the intensity measure I_{Np} . The study covers three low- and mid-rise buildings with 5, 10, and 15 stories, all of them equipped with BRBs and designed with homogeneous characteristics in terms of ductility, floor plan geometry, and occupancy. These buildings are considered to be located on soft soil in Mexico City, and their structural design is performed in accordance with the regulations and guidelines of the Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México [1]. The study includes a modal spectral dynamic analysis to ensure compliance with both serviceability and collapse limit states, particularly the interstory drift limits established by NTCDS-2020. These standards provide an essential technical framework for seismic design in Mexico, ensuring the safety and functionality of structures under earthquake conditions. To study the behavior of the buildings under seismic actions, nonlinear models are developed in OpenSees [2] (Open System for Earthquake Engineering Simulation), and seismic records representative of the site are selected. These records are obtained from the databases of the Centro de Instrumentación y Registro Sísmico de México [3] and the Instituto de Ingeniería of UNAM [4]. The records are scaled using the intensity measures $Sa(T_1)$ and I_{Np} . Subsequently, nonlinear dynamic analyses are performed to obtain the seismic response of the buildings in terms of parameters such as interstory drifts and floor accelerations. Finally, based on the obtained results, a comparison of the efficiency of the intensity measures I_{Np} and $Sa(T_1)$ is carried out in terms of different structural demand parameters.

Keywords: Seismic intensity, buckling-restrained braces, incremental dynamic analysis, floor acceleration, interstory drift.

OBJETIVOS

Objetivo general

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el desempeño sísmico de edificios de acero de baja y mediana altura equipados con contravientos restringidos al pandeo en términos de diferentes parámetros de demanda estructural usando la medida de intensidad I_{Np} .

Objetivos específicos

- Diseñar estructuralmente tres edificios de acero de baja, media altura, ubicados en una zona de suelo blando en la Ciudad de México, cumpliendo los requerimientos de las NTCDS-2020.
- Generar modelos no lineales de los edificios en OpenSees que capturen todas las características geométricas y mecánicas de estos.
- Seleccionar registros sísmicos representativos de la Ciudad de México, obtenidos a través del CIRES y II-UNAM.
- Realizar análisis dinámicos no lineales para diferentes niveles de intensidad sísmica con el objetivo de obtener la respuesta sísmica de los edificios en términos de parámetros como distorsiones de entrepiso y aceleraciones de piso.
- Realizar una comparación de la eficiencia de la medida de intensidad I_{Np} con la comúnmente usada $Sa(T_1)$.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Generalidades.....	1
1.2	Antecedentes y estado del arte.....	3
1.2.1	Desarrollo y evolución de los crps.....	3
1.2.2	Medidas de intensidad sísmica.....	4
2	ASPECTOS TEÓRICOS.....	6
2.1	Contravientos restringidos al pandeo (CRP).....	6
2.1.1	Tipos de contravientos en marcos estructurales.....	6
2.1.2	Componentes de los CRPs y su función.....	7
2.2	Medida de intensidad sísmica.....	8
2.2.1	Medida de intensidad $Sa(T_1)$	8
2.2.2	Medida de intensidad I_{Np}	8
3	METODOLOGÍA.....	10
3.1	Características generales de los modelos estructurales.....	10
3.2	Diseño del sistema primario.....	12
3.3	Diseño del sistema secundario.....	18
3.4	Análisis estático no lineal (pushover).....	33
3.5	Selección de registros sísmicos.....	39
3.6	Modelo no lineal de los edificios en OpenSees.....	43
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
4.1	Resultados de los análisis dinámicos incrementales (IDAs) utilizando la medida de intensidad $Sa(T_1)$	50
4.1.1	Análisis dinámico incremental (IDAs).....	50
4.1.2	Aceleraciones de piso.....	53
4.1.3	Distorsiones de entrepiso.....	57
4.1.4	Curvas de histéresis de los contravientos con restricción al pandeo (CRP) utilizando $Sa(T_1)$	61
4.2	Resultados de los análisis dinámicos incrementales (IDAs) utilizando la medida de intensidad I_{Np}	64

4.2.1	Análisis dinámico incremental (IDAs)	64
4.2.2	Aceleraciones de piso	67
4.2.3	Distorsiones de entrepiso	70
4.2.4	Curvas de histéresis de los contravientos restringidos al pandeo (CRP) utilizando I_{Np}	74
4.3	Comparación de aceleración de piso y distorsión de entrepiso para las medidas de intensidad I_{Np} vs $Sa(T_1)$	76
4.3.1	Comparación de aceleración de piso	76
4.3.2	Comparación de distorsión de entrepiso	80
4.3.3	Comparación de curvas de histéresis de los contravientos con restricción al pandeo entre I_{Np} vs $Sa(T_1)$	84
4.4	Análisis de eficiencia I_{Np} vs $Sa(T_1)$	87
4.4.1	Aceleración de piso.....	87
4.4.2	Distorsión de entrepiso	90
5	CONCLUSIONES.....	93
6	BIBLIOGRAFÍA.....	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cargas sobre la estructura	13
Tabla 2. Combinaciones de cargas.....	13
Tabla 3. Elementos estructurales de M5.	15
Tabla 4. Elementos estructurales de M10.	15
Tabla 5. Elementos estructurales de M15.	15
Tabla 6. Periodo fundamental de vibración de las estructuras.....	15
Tabla 7. Cálculo de fuerzas en el sistema secundario por piso para M5CRP.....	21
Tabla 8. Fuerzas de diseño para los disipadores de energía de M5CRP.....	21
Tabla 9. Cálculo de fuerzas en el sistema secundario por piso para M10CRP.....	21
Tabla 10. Fuerzas de diseño para los disipadores de energía para M10CRP.	22
Tabla 11. Cálculo de fuerzas en el sistema secundario por piso para M15CRP.....	22
Tabla 12. Fuerzas de diseño para los disipadores de energía para M15CRP.	23
Tabla 13. Disipadores ajustados para M5CRP.	27
Tabla 14. Disipadores ajustados para M10CRP.	27
Tabla 15. Disipadores ajustados para M15CRP.	28
Tabla 16. Propiedades de los disipadores para M5CRP.	29
Tabla 17. Propiedades de los disipadores para M10CRP.	29
Tabla 18. Propiedades de los disipadores para M15CRP.	30
Tabla 19. Periodo fundamental de vibración de la estructura.	30
Tabla 20. Fuerza de diseño en crp y cortante basal, para M5CRP dirección en dirección “X”.	33
Tabla 21. Fuerza de diseño en contravientos y cortante basal para M10CRP en dirección “X”.	35
Tabla 22. Fuerza de diseño en contravientos y cortante basal para M15CRP en dirección “X”.	36
Tabla 23. Características de los registros sísmicos para M5CRP.....	40
Tabla 24. Características de los registros sísmicos para M10CRP.....	41
Tabla 25. Características de los registros sísmicos para M15CRP.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cinturón de fuego.....	1
Figura 2. Tipos de configuración de contravientos.	4
Figura 3. Configuraciones de marcos con contravientos.....	7
Figura 4. Esquema de un contraviento restringido a pandeo (CRP).....	7
Figura 5. Modelo en planta para los tres edificios.....	10
Figura 6. Modelo en elevaciones para a) M5CRP, b) M10CRP, y c) M15CRP.	11
Figura 7. Modelo en 3D para a) M5CRP, b) M10CRP, y c) M15CRP.....	11
Figura 8. Espectros de diseño, espectro elástico y espectro de peligro uniforme obtenidos con el SASID.	12
Figura 9. Espectro de peligro uniforme, espectro elástico, espectro de diseño reducido y periodos fundamentales de las estructuras.	16
Figura 10. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel de M5.	16
Figura 11. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel de M10.	17
Figura 12. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel de M15.	17
Figura 13. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel y dirección de M5.	18
Figura 14. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel y dirección de M10.	19
Figura 15. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel y dirección de M15.	19
Figura 16. Vista en elevación de la distribución de contravientos restringidos al pandeo en dirección “X” y “Y” respectivamente para M5CRP.....	24
Figura 17. Vista en elevación de la distribución de contravientos restringidos al pandeo en dirección “X” y “Y” respectivamente para M10CRP.....	25
Figura 18. Vista en elevación de la distribución de contravientos restringidos al pandeo en dirección “Y” y “X” respectivamente para M15CRP.....	25
Figura 19. Espectros de diseño, espectro elástico y espectro de peligro uniforme obtenidos con el SASID.	26
Figura 20. Espectro de peligro uniforme, Espectro elástico, Espectro de diseño $Q=4$ y periodos fundamentales de las estructuras.	31
Figura 21. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel y dirección para M5CRP...31	31
Figura 22. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel y dirección para M10CRP.32	32
Figura 23. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel y dirección para M15CRP.32	32
Figura 24. Resultados de los análisis pushover para M5CRP.	34
Figura 25. Resultados de los análisis pushover para M10CRP.	36
Figura 26. Resultados de los análisis pushover para M15CRP.	38
Figura 27. Registros seleccionados para M5CRP.....	40
Figura 28. Registros seleccionados para M10CRP.....	41
Figura 29. Registros seleccionados para M15CRP.....	42
Figura 30. Vista en OpenSees Navigator a) M5 b) M5CRP.....	44
Figura 31. Vista en OpenSees Navigator a) M10 b) M10CRP.....	44
Figura 32. Vista en OpenSees Navigator a) M15 b) M15CRP.....	45

Figura 33. Definición de las propiedades del material Steel02 en OpenSees Navigator. ...	46
Figura 34. Definición de las propiedades del material SteelMPF en OpenSees Navigator.	47
Figura 35. Análisis dinámicos incrementales para M5CRP.	51
Figura 36. Análisis dinámicos incrementales para M10CRP.	51
Figura 37. Análisis dinámicos incrementales para M15CRP.	52
Figura 38. Aceleraciones de piso por nivel para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M5CPR.	54
Figura 39. Aceleraciones de piso por nivel para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M10CRP.	56
Figura 40. Aceleraciones de piso por nivel para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M15CRP.	57
Figura 41. Distorsión de entrepiso para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M5CRP.	59
Figura 42. Distorsión de entrepiso para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M10CRP.	60
Figura 43. Distorsión de entrepiso para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M15CRP.	61
Figura 44. Curvas de Histéresis para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g para M5CRP.	62
Figura 45. Curvas de Histéresis para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g para M10CRP.	63
Figura 46. Distorsión de entrepiso para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g para M15CRP.	64
Figura 47. Análisis dinámicos incrementales para M5CRP.	65
Figura 48. Análisis dinámicos incrementales para M10CRP.	65
Figura 49. Análisis dinámicos incrementales para M15CRP.	66
Figura 50. Aceleraciones de piso por nivel para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M5CRP.	68
Figura 51. Aceleraciones de piso por nivel para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M10CRP.	69
Figura 52. Aceleraciones de piso por nivel para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M15CRP.	70
Figura 53. Distorsión de entrepiso para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M5CRP.	71
Figura 54. Distorsión de entrepiso para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M10CRP.	72
Figura 55. Distorsión de entrepiso para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M15CRP.	73
Figura 56. Curvas de Histéresis para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g para M5CRP.	75

Figura 57. Curvas de Histéresis para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g para M10CRP.	75
Figura 58. Curvas de Histéresis para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g para M15CRP.	76
Figura 59. Comparación de aceleraciones de piso para M5CRP, a) resultados con $S_a(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.	78
Figura 60. Comparación de aceleraciones de piso para M10CRP, a) resultados con $S_a(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.	79
Figura 61. Comparación de aceleraciones de piso para M15CRP, a) resultados con $S_a(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.	80
Figura 62. Comparación de distorsión de entrepiso para M5CRP, a) resultados con $S_a(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.	81
Figura 63. Comparación de distorsión de entrepiso para M10CRP, a) resultados con $S_a(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.	82
Figura 64. Comparación de distorsión de entrepiso para M15CRP, a) resultados con $S_a(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.	83
Figura 65. Comparación de Curvas de Histéresis para M5CRP, a) resultados con $S_a(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.	85
Figura 66. Comparación de Curvas de Histéresis para M10CRP, a) resultados con $S_a(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.	86
Figura 67. Comparación de Curvas de Histéresis para M15CRP, a) resultados con $S_a(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.	86
Figura 68. Mediana de la aceleración de piso vs desviación estándar para M5CRP.....	88
Figura 69. Mediana de la aceleración de piso vs desviación estándar para M10CRP.....	89
Figura 70. Mediana de la aceleración de piso vs desviación estándar para M15CRP.....	90
Figura 71. Mediana de distorsión de entrepiso vs desviación estándar para M5CRP.....	91
Figura 72. Mediana de distorsión de entrepiso vs desviación estándar para M10CRP.....	92
Figura 73. Mediana de distorsión de entrepiso vs desviación estándar para M15CRP.....	93

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Los sismos son uno de los fenómenos naturales que históricamente han provocado cuantiosos daños materiales y pérdida de vidas humanas en diversas partes del mundo. Es por ello que la gran mayoría de los manuales y códigos de construcción proveen lineamientos para la consideración del riesgo sísmico en el diseño de las estructuras [5]. Por lo cual la ingeniería sísmica se enfoca en estudiar el impacto de los sismos en las estructuras, con el objetivo principal de mitigar estos efectos. Esto ayuda a reducir los impactos sociales, económicos y políticos provocados por la ocurrencia de un terremoto.

El diseño sísmico de estructuras es una disciplina vital en la ingeniería civil, especialmente en regiones propensas a terremotos. En México debido a su ubicación geográfica, es uno de los países más sísmicamente activos del mundo, ubicado en el cinturón de fuego compuesto de tres placas tectónicas principales: la Placa de Cocos, la Placa de Norteamérica y la Placa del Pacífico, como se aprecia en la Figura 1. Esto ha llevado a la necesidad de desarrollar y adoptar tecnologías avanzadas en ingeniería estructural para mitigar los efectos de los sismos.



Figura 1. *Cinturón de fuego.*

México ha sido testigo de varios terremotos devastadores, como el terremoto ocurrido el 19

de septiembre de 1985 en la Ciudad de México, que causó la muerte de miles de personas y la destrucción de numerosos edificios. Este evento impulsó una revisión exhaustiva de las normas y prácticas de diseño sísmico en el país, llevando al desarrollo de métodos más avanzados y la implementación de tecnologías innovadoras en la construcción de edificios. La seguridad y estabilidad de los edificios ante eventos sísmicos es una preocupación primordial en la ingeniería estructural, los edificios de acero son particularmente susceptibles a fallas catastróficas durante terremotos debido a su naturaleza flexible y la posibilidad de pandeo de sus elementos estructurales. Para mitigar estos riesgos, se han desarrollado diversas técnicas y dispositivos que buscan mejorar el desempeño sísmico de las estructuras, entre los cuales destacan los Contravientos Restringidos al Pandeo (CRP) o (BRBs, por sus siglas en inglés), los cuales han demostrado ser una solución efectiva para mejorar el desempeño sísmico de las estructuras de acero. Al igual que es importante caracterizar de manera adecuada la intensidad sísmica (IS) la cual es de suma importancia al momento de evaluar el desempeño sísmico de sistemas estructurales, debido a esto se requiere el uso de parámetros que puedan relacionar la intensidad de un movimiento con la respuesta estructural. La definición de un parámetro que pueda describir la severidad de un movimiento sísmico ha sido constantemente estudiada desde los inicios de la ingeniería sísmica. Uno de los objetivos principales de dicho parámetro que se conoce como medida de intensidad sísmica, es estar íntimamente relacionado con la demanda sísmica, lo cual permite reducir las incertidumbres en la estimación de respuesta estructural de edificios. Algunas características deseables de dicha medida son su relación con la respuesta estructural y su capacidad para desacoplar las incertidumbres sismológicas y estructurales. Debido a la gran importancia que representa contar con una medida de IS apropiada, se han desarrollado varios estudios orientados a encontrar un parámetro que refleje el potencial destructivo de un movimiento sísmico [6].

1.2 Antecedentes y estado del arte

El estudio del desempeño sísmico de estructuras ha evolucionado significativamente desde los primeros esfuerzos por entender y mitigar los efectos destructivos de los terremotos. Inicialmente, el diseño sísmico se centraba en asegurar la estabilidad estructural básica, pero con el tiempo, la atención se ha desplazado hacia la mejora de la resistencia y la minimización de los daños estructurales y no estructurales, así como evaluar correctamente el comportamiento sísmico de una estructura, la cual es crucial caracterizar adecuadamente la intensidad sísmica a la que estará expuesta durante su vida útil. Esto requiere el uso de medidas de intensidad sísmica apropiadas que sean eficientes y que consideren aspectos esenciales para la evaluación del desempeño sísmico de las estructuras.

1.2.1 Desarrollo y evolución de los CRPs

Los CRPs han ganado relevancia en los últimos años debido a su capacidad para ofrecer resistencia tanto en tensión como en compresión de manera simétrica. Este tipo de dispositivos fue desarrollado inicialmente en Japón en los años 70's, con el primer diseño de CRP propuesto por Morihisa [7], quien introdujo criterios de diseño para garantizar un comportamiento histórico simétrico bajo cargas de tensión y compresión. Tras los sismos de Kobe 1995 y Northridge 1994, se ha intensificado la investigación tanto analítica como experimental para mejorar el desempeño de las estructuras con CRPs. Estos estudios han demostrado que los CRPs no solo mejoran la rigidez y la resistencia estructural, sino que también optimizan la capacidad de disipación de energía, reduciendo considerablemente los daños durante eventos sísmicos [8].

1.2.1.1 Evaluación y aplicaciones recientes sobre los CRPs

Estudios recientes han evaluado la efectividad de los CRPs en diversas configuraciones estructurales (Figura 2) [9][10]. Investigaciones de Zheng [11] y Jayarajan [12] analizaron la implementación de CRPs en edificios de diferentes alturas y configuraciones geométricas. Los resultados mostraron que estos dispositivos no solo mejoran la capacidad de disipación de energía, sino que también reducen las demandas de desplazamiento y el daño en las estructuras, lo que resulta en un mejor desempeño sísmico.

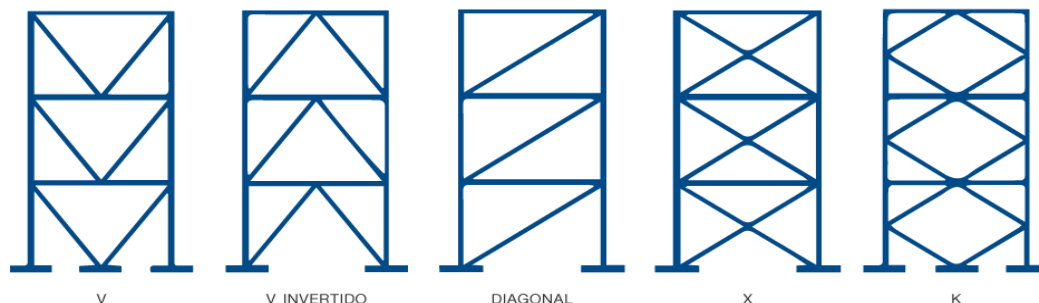


Figura 2. Tipos de configuración de contravientos.

1.2.1.2 Situación de los CRPs en México

Aunque la adopción de CRPs en México ha sido más lenta en comparación con países como Japón y Estados Unidos, el interés por estos dispositivos ha ido en aumento debido a los beneficios comprobados en la mejora del comportamiento sísmico de las estructuras. En este contexto, las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS-2020) han comenzado a incluir métodos de diseño para los CRPs, lo que refleja su creciente importancia en la ingeniería sísmica en México.

1.2.2 Medidas de intensidad sísmica

La importancia de contar con una medida de IS que represente de manera razonable el potencial destructivo de un movimiento sísmico, ha provocado que muchos estudios se hayan orientado en esa dirección. En 1952 Housner propuso utilizar el área del espectro de pseudo-velocidad como medida de intensidad sísmica, algunos años después Von Thun [13] sugirió el uso del área encerrada en el espectro de pseudo-aceleración en un intervalo de periodos de 0.1 a 0.5s, para el análisis sísmico de presas [14]. En los últimos años, se han adoptado distintas medidas de intensidad sísmica, una de ellas es la aceleración máxima del suelo (Ams). En la actualidad, la pseudoaceleración espectral en el periodo fundamental de vibración de la estructura, $Sa(T_1)$ es la medida de intensidad más utilizada para el análisis de estructuras. Sin embargo, $Sa(T_1)$ tiene algunas limitaciones cuando se emplea como medida de intensidad sísmica, dado que no contempla el efecto de la elongación del periodo de

vibración en caso de comportamiento no lineal ni la contribución de modos superiores en la respuesta estructural [6].

Recientemente, otras medidas de intensidad más avanzadas como I_{Np} en la evaluación del desempeño sísmico también ha sido objeto de investigación. Baker & Cornell [15] y Bojórquez [14] destacan que I_{Np} proporciona una medida más precisa de la demanda sísmica al considerar el comportamiento no lineal de la estructura. En la actualidad, el uso de sistemas de disipación de energía innovadores como los contravientos restringidos al pandeo, así como el uso de medidas de intensidad avanzadas como I_{Np} , representan avances significativos en el diseño sísmico de estructuras de acero. La investigación y la implementación de estos enfoques continúan evolucionando, con el objetivo de mejorar la resiliencia de las estructuras y reducir los riesgos asociados con los terremotos.

Estudios como el de Chávez López y Bojórquez Mora [16] demuestran que la medida de intensidad I_{Np} es muy buen parámetro para evaluar el peligro sísmico. Además, Chávez López y Bojórquez Mora [17] han demostrado que la medida de intensidad I_{Np} basada en la forma espectral N_p es más eficiente para predecir la respuesta estructural en condiciones no lineales comparada con medidas de intensidad tradicionales. Asimismo, Rajabnejad [18] ha encontrado que I_{Np} presenta una dispersión significativamente menor en la estimación de desplazamientos residuales en estructuras tridimensionales ante sismos prolongados. Más recientemente, Payán-Serrano [19] han incorporado I_{Np} en modelos de aprendizaje profundo para mejorar la predicción de desplazamientos estructurales en edificaciones con marcos CRPs.”

2 ASPECTOS TEÓRICOS

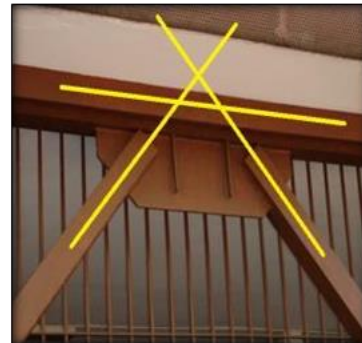
2.1 Contravientos restringidos al pandeo (CRP)

Un CRP es un elemento estructural diseñado para aumentar la rigidez lateral de un edificio y disipar energía durante un evento sísmico. Al aumentar la rigidez es decir la relación entre los esfuerzos y las deformaciones, en forma indirecta ayudan a controlar las deformaciones de la estructura ante excitaciones laterales. Por lo cual en un edificio estructurado con marcos contraventados, la respuesta inelástica ante excitaciones laterales de todo el sistema es altamente dependiente de las capacidades y de la respuesta inelástica de los contravientos [20][21][22].

Los CRPs están diseñados para evitar el pandeo mediante un núcleo de acero confinado dentro de una funda que restringe su deformación. Este diseño no solo ayuda a mejorar la rigidez estructural, sino que también facilita la disipación de energía durante un sismo, incrementando la ductilidad y la capacidad de disipación de energía de la estructura, además de que unas de las principales ventajas de estos sistemas disipadores de energía es que considera a los CRPs como fusibles reemplazables es decir se busca que sean los primeros elementos del sistema estructural en fallar durante un sismo, debido a la facilidad de ser reemplazados rápidamente y a bajo costo cuando sufren daños significativos.

2.1.1 Tipos de contravientos en marcos estructurales

Existen dos tipos principales de marcos contraventados: marcos con contravientos concéntricos y marcos con contravientos excéntricos. Los contravientos concéntricos se caracterizan porque el eje del contraviento se cruza aproximadamente con el eje de la trabe y la columna (Figura 3a). Por otro lado, en los contravientos excéntricos, el eje del contraviento intercepta el eje de la trabe en diferentes puntos, lo que genera un comportamiento diferente (Figura 3b).



a) Marco con contravientos concéntrico b) Marco con contravientos excéntricos

Figura 3. Configuraciones de marcos con contravientos

2.1.2 Componentes de los CRPs y su función

Diversos investigadores han explorado el comportamiento de las estructuras con CRPs bajo cargas sísmicas. Clark [23] describe los componentes principales de los CRPs, siendo el componente central es una placa de acero que se deforma axialmente, sometándose a tensiones y compresiones para absorber energía. Esta placa está separada por un espacio vacío diseñado para maximizar la eficiencia en la disipación de energía durante su deformación. Posteriormente, se agrega una capa de concreto que confina y limita el pandeo de la placa de acero. Finalmente, una camisa metálica externa, generalmente de sección HSS o en forma de cajón, protege el concreto de posibles daños o fracturas ocasionados por la presión interna generada por el pandeo del núcleo metálico (Figura 4).

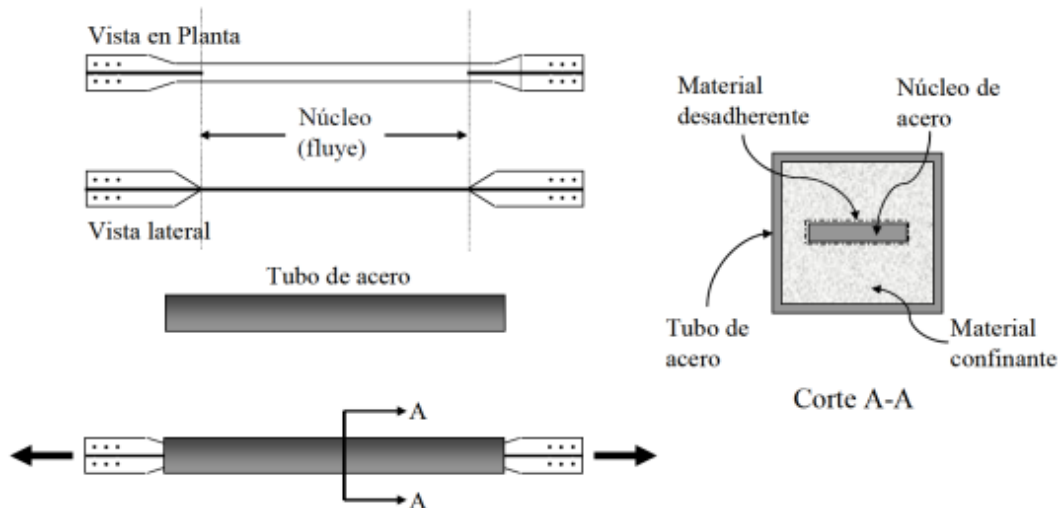


Figura 4. Esquema de un contraviento restringido a pandeo (CRP).

2.2 Medida de intensidad sísmica

Una medida de intensidad sísmica (IS) cuantifica las características de un movimiento sísmico importante para describir su potencial destructivo y predecir la respuesta estructural, como la amplitud, frecuencia y duración del movimiento, entre otros [6].

2.2.1 Medida de intensidad $Sa(T_1)$

La medida de intensidad sísmica comúnmente usada por la mayoría de los ingenieros sísmicos, sismólogos y por códigos de diseño es la pseudo-aceleración espectral en el periodo fundamental de vibración de la estructura de interés $Sa(T_1)$. Este parámetro es muy útil para predecir la respuesta de estructuras con poco comportamiento inelástico y gobernadas principalmente por su modo fundamental de vibración, esto se debe a la relación que tiene con la respuesta sísmica de tales estructuras, ya que es un parámetro que predice la respuesta sísmica de sistemas de un grado de libertad y sistemas de varios grados de libertad elásticos influenciados por el primer modo de manera bastante aproximada [6].

2.2.2 Medida de intensidad I_{Np}

Bojórquez y Iervolino [24] propusieron una medida de intensidad sísmica escalar basado en los parámetros $Sa(T_1)$ y N_p con características similares a la medida de intensidad propuesta por Córdova[25], la cual se define en la siguiente ecuación (Ec.1):

$$I_{Np} = Sa(T_1) \cdot N_p^\alpha \quad (1)$$

El uso de la medida de intensidad I_{Np} se presenta como una herramienta avanzada para evaluar y predecir el comportamiento sísmico de edificios. La medida de intensidad I_{Np} considera el efecto del comportamiento no lineal en la respuesta estructural, proporcionando una cuantificación más precisa de la demanda sísmica en comparación con otros índices tradicionales.

En la ecuación 1, I_{Np} es la medida de intensidad sísmica escalar, y el valor α es un parámetro que debe ser calibrado, en función de la estructura y el parámetro de demanda sísmica seleccionado. Buratti [26][27] demostró que I_{Np} resulta más eficiente que un gran número de medidas de intensidad sísmica encontradas en la literatura.

En la ecuación 2 se observa lo siguiente: a) la aceleración espectral en el primer modo de vibrar o el periodo de la estructura es un caso particular de I_{Np} , y este ocurre cuando α es igual a cero; b) la media geométrica $Sa_{avg}(T_1 \dots T_N)$ representa el caso particular de I_{Np} cuando $\alpha=1$; y c) la medida de intensidad vectorial propuesta por Cordova [25], denominada $\langle Sa, RT_{1,T_2} \rangle$, también corresponde a un caso particular cuando solo dos puntos del espectro son tomados en consideración, por ejemplo, T_1 y T_N . Bojórquez y Iervolino [24] sugieren que los valores óptimos de α están en un intervalo que va desde cero hasta uno, Lo cual implica asignar un nivel distinto de importancia a las ordenadas espectrales al analizar la medida de intensidad I_{Np} más allá del primer modo. Este exponente permite calibrar la medida I_{Np} hasta determinar el valor de α que presenta la mejor correlación con la demanda sísmica. A partir de los resultados obtenidos por Bojórquez y Iervolino [24] se ha concluido que el valor que minimiza la dispersión de esta medida de IS es un exponente α igual a 0.4. Por lo tanto, I_{Np} puede estimarse como se indica en la ecuación 2 [6].

$$I_{Np} = Sa(T_1) \cdot N_p^{0.4} \quad (2)$$

3 METODOLOGÍA

3.1 Características generales de los modelos estructurales

Para el diseño y análisis estructural de los tres edificios de acero correspondientes a 5,10 y15 niveles se utilizó el software ETABS [28], estos edificios fueron estructurados a base de marcos resistentes a momento donde se hará referencia a ellos como M5, M10 y M15, que al equiparse con contravientos restringidos al pandeo (CRP) se hará referencia a ellos como M5CRP, M10CRP y M15CRP, Los modelos analizados tienen una distribución geométrica en planta que consiste en 3 crujiás en la dirección “X” y 4 crujiás en la dirección “Y”, con una separación de 7 metros en ambas direcciones como se ilustra en la figura 5. Los edificios son de 5, 10 y 15 niveles con una altura de entrepiso de 3.5 metros como se ilustra en la figura 6. Adicionalmente, se presenta la vista tridimensional de cada edificio de acero con sus respectivos contravientos, como se ilustra en la figura 7.

En todos los diseños, se definió un diafragma rígido con el objetivo de garantizar que los nodos ubicados en un mismo nivel presenten el mismo desplazamiento. Asimismo, para la determinación de las acciones variables y permanentes, se consideró que los edificios estarían destinados a uso habitacional. El sistema de losa empleado corresponde a una losa de acero, soportada por vigas diseñadas conforme a las especificaciones correspondientes.

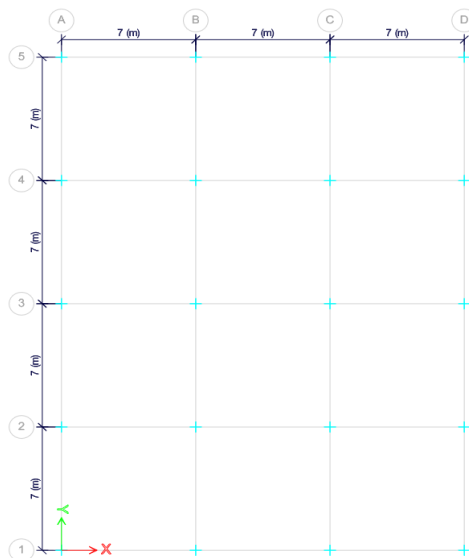


Figura 5. Modelo en planta para los tres edificios.

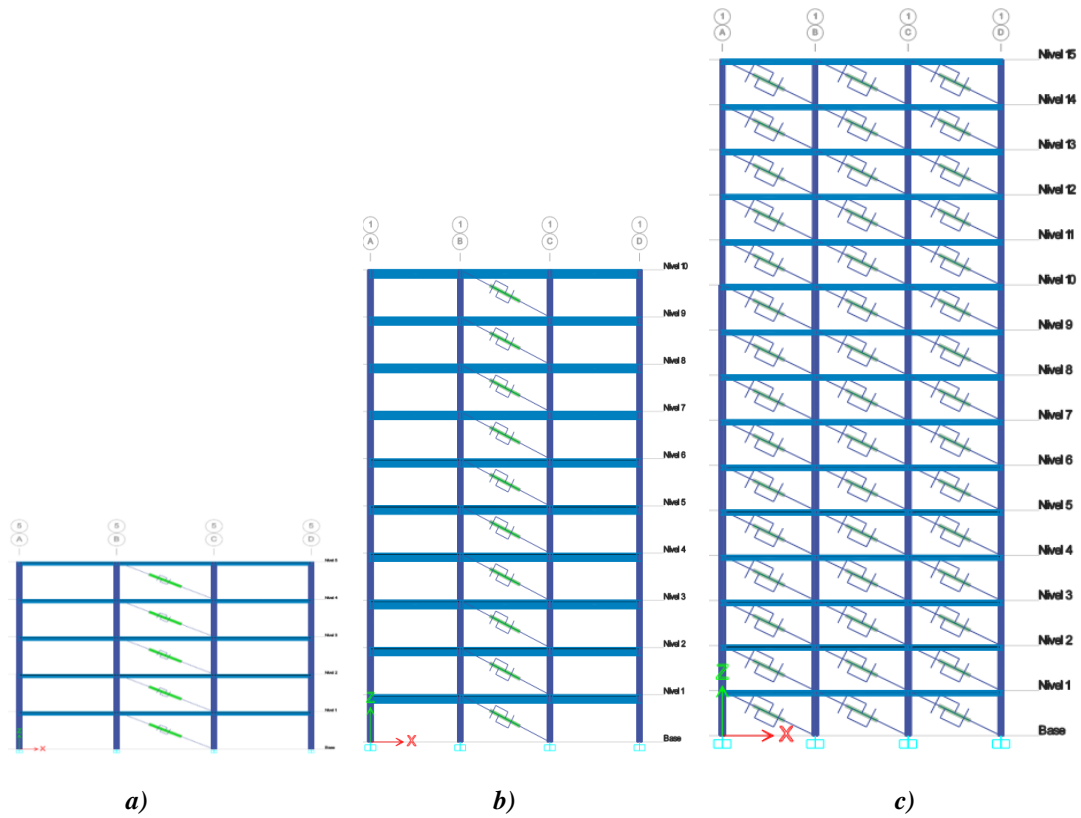


Figura 6. Modelo en elevaciones para a) M5CRP, b) M10CRP, y c) M15CRP.

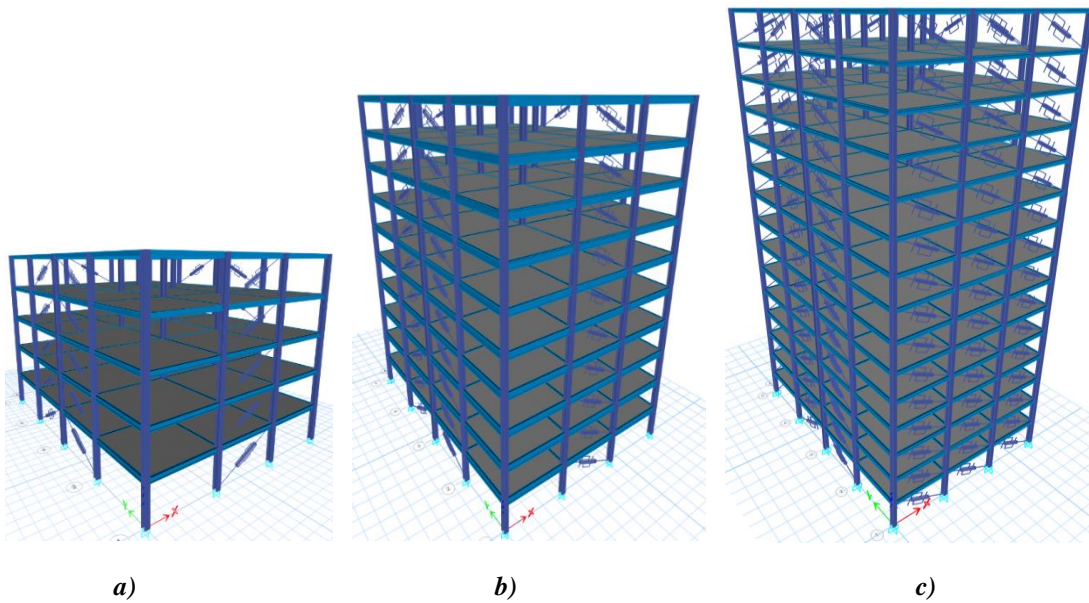


Figura 7. Modelo en 3D para a) M5CRP, b) M10CRP, y c) M15CRP.

3.2 Diseño del sistema primario

En esta sección se muestran los detalles que fueron utilizados en el diseño estructural del sistema primario de los edificios. Se denomina sistema primario a vigas y columnas que resisten principalmente cargas gravitacionales y algún porcentaje de las fuerzas horizontales que indique la normativa. El edificio se consideró localizado en un suelo blando de la Ciudad de México con un periodo dominante $T_S = 1.6$ s de acuerdo con el Reglamento de Construcciones para la Ciudad de México.

Se utilizó un espectro de diseño obtenido del SASID [29] que se muestra en la figura 8. el cual fue afectado por los factores que se muestran a continuación.

-Ubicación: Latitud: 19.41211, Longitud: -99.16279

-Factor de Importancia: 1.0 (Grupo B)

-Factor de Irregularidad: 1.0 (Edificio Regular)

-Factor de Comportamiento Sísmico (Q) = 2.0

-Factor de Hiperstaticidad: 1.0

-Amortiguamiento: 5%

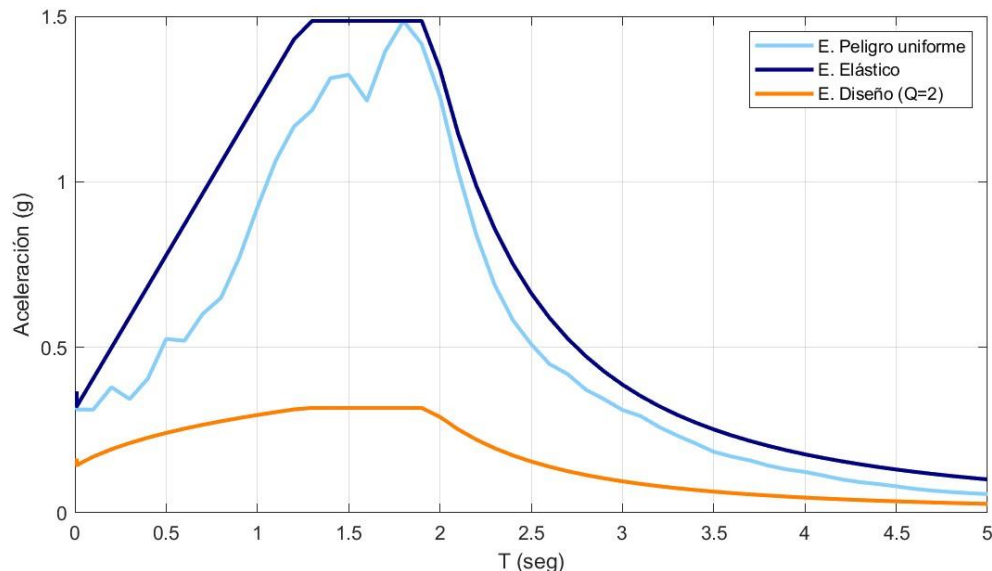


Figura 8. Espectros de diseño, espectro elástico y espectro de peligro uniforme obtenidos con el SASID.

En la Tabla 1 se presentan las cargas que fueron consideradas para el análisis, las cargas vivas se fueron definidas con la norma técnica complementaria sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones [1]. Es importante mencionar que en los entresijos se usaron cargas de uso habitacional y en la azotea se definieron cargas para pendiente no mayor a 5%, una carga viva instantánea de acuerdo con la norma y el peso propio se consideró directamente en el programa de análisis estructural.

Tabla 1. Cargas sobre la estructura

Niveles	Sobre carga muerta CM (kg/m²)	Carga viva instantánea CVi (kg/m²)	Carga viva Máxima CVm (kg/m²)
Entresijos	150	100	190
Azotea	150	70	100

En estructuras del Grupo B se aplicará un factor de carga igual a 1.3 para las cargas permanentes y 1.5 para las variables. Para combinaciones de acciones que involucren cargas gravitacionales y accidentales, se tomará un factor de carga de 1.1 aplicado a los efectos de todas las acciones que intervengan en la combinación. Se definieron combinaciones de cargas de acuerdo con las recomendaciones de las NTCDS-2020 Acciones y criterios las cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Combinaciones de cargas

Combinación	Desarrollo
1	1.3 (CM + PP+SC) + 1.5 (CVm)
2	1.1 (CM + PP +SC + CVi + SX + 0.3 SY)
3	1.1 (CM + PP+SC + CVi + SX - 0.3 SY)
4	1.1 (CM + PP +SC + CVi - SX + 0.3 SY)
5	1.1 (CM + PP+SC + CVi - SX - 0.3 SY)
6	1.1 (CM + PP +SC + CVi + 0.3 SX + SY)
7	1.1 (CM + PP+SC + CVi + 0.3 SX - SY)
8	1.1 (CM + PP +SC + CVi - 0.3 SX + SY)
9	1.1 (CM + PP+SC + CVi - 0.3 SX - SY)

Donde:

CM: Carga muerta

PP: Peso propio

SC: Sobre carga

CVM: Carga viva máxima

CVI: Carga viva instantánea

SX: Sismo en dirección “X”

SY: Sismo en dirección “Y”

A partir de lo anterior, se procedió al diseño del sistema primario, considerando únicamente las cargas gravitacionales y asegurando que este fuera capaz de resistir al menos el 30% de las fuerzas sísmicas de diseño. Para ello, se incluyeron los efectos sísmicos en sus dos componentes, en cumplimiento con las NTCDS-2020, las cuales estipulan que debe considerarse el 100% de los efectos del sismo en una dirección principal y el 30% de los efectos en la dirección perpendicular.

En el análisis dinámico modal espectral se incluyeron todos los modos de vibrar necesarios para representar adecuadamente el comportamiento de la estructura, esto implica que la suma del peso efectivo en cada dirección de análisis sea mayor o igual que 90 por ciento del peso total de la estructura y, segundo, que se tome en cuenta el acoplamiento dinámico de los modos de vibrar. Asimismo, los elementos del sistema primario deben ser capaces de resistir al menos el 30% del cortante sísmico de diseño sin depender de la contribución del sistema secundario.

Para llevar a cabo la revisión de los diseños de las estructuras se utilizó como criterio principal las distorsiones máximas de entrepiso respetando que estas cumplieran con el límite máximo permitido de acuerdo con el estado límite de seguridad contra el colapso (Tabla 4.2.2 de las NTCDS-2020). Se consideró para los modelos un límite de 0.01 que ayuda a limitar el nivel de daño en la estructura, aunque el reglamento recomienda un límite mayor (de 0.015) para estructuras de ductilidad baja. Inicialmente, se considera un factor de comportamiento sísmico $Q=2$ para revisar la capacidad de las estructuras sin el sistema de CRP, llegando a

los siguientes elementos estructurales que se muestran a continuación en las Tablas 3, 4 y 5, para M5, M10 y M15, respectivamente.

Tabla 3. Elementos estructurales de M5.

Niveles	Columnas	Vigas	Materiales	Tipo losa
3-5	W14X311	W14X68	A992 Gr.50	LosaAcero
1-2	W14X342	W14X68		

Tabla 4. Elementos estructurales de M10.

Niveles	Columnas	Vigas	Materiales	Tipo losa
8-10	W14X398	W24x84	A992 Gr.50	LosaAcero
5-7	W14X426	W24x84		
1-4	W14X455	W24X94		

Tabla 5. Elementos estructurales de M15.

Niveles	Columnas	Vigas	Materiales	Tipo losa
11-15	W12X336	W14X74	A992 Gr.50	LosaAcero
6-10	W14X342	W14X74		
3-5	W14X398	W14X82		
1-2	W14X455	W14X82		

Adicionalmente, en la Tabla 6, se muestran los periodos fundamentales de vibración de los tres modelos estructurales sin CRP.

Tabla 6. Periodo fundamental de vibración de las estructuras.

Edificios	5 niveles	10 niveles	15 niveles
Periodo (Ts)	1.04	1.377	3.212

En la Figura 9. se muestra el espectro de peligro uniforme, espectro elástico, espectro de diseño y en las líneas verticales representan los periodos fundamentales de las estructuras.

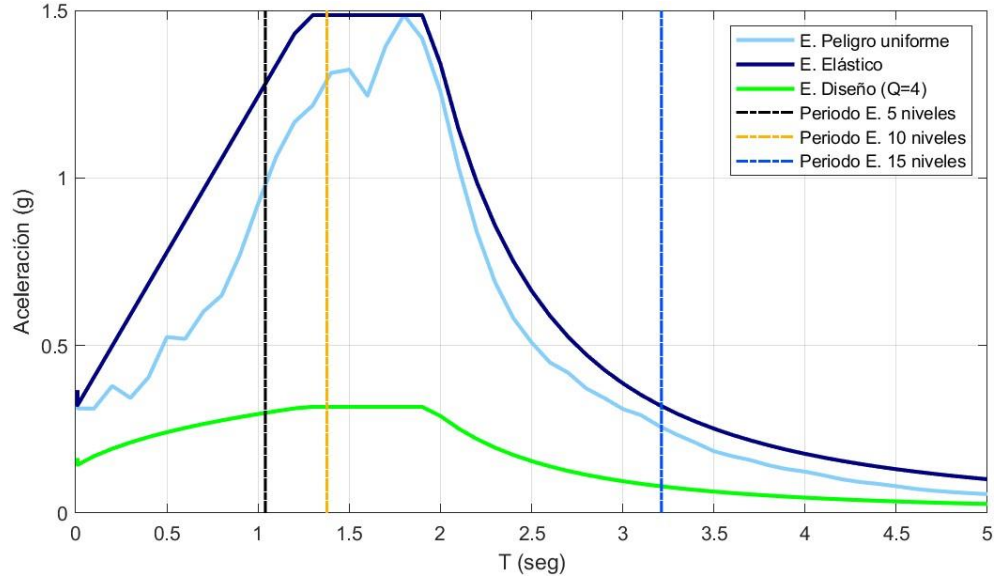


Figura 9. Espectro de peligro uniforme, espectro elástico, espectro de diseño reducido y periodos fundamentales de las estructuras.

En el diseño de M5 se obtuvo una distorsión máxima de 0.0101 en dirección “X” y una distorsión de 0.0092 en dirección “Y” como se ilustra en la figura 10.

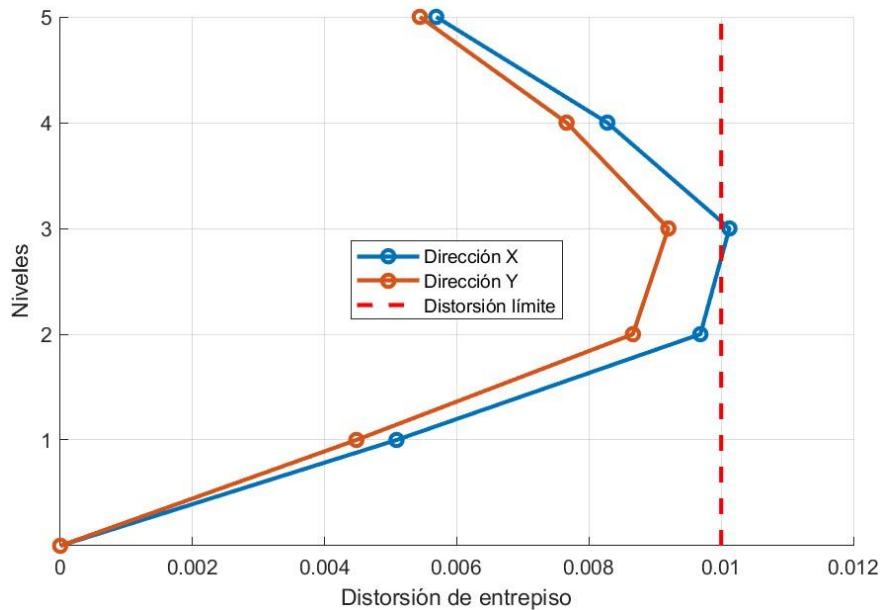


Figura 10. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel de M5.

En el diseño de M10 se obtuvo una distorsión máxima de 0.0101 en dirección “X” y una distorsión de 0.0095 en dirección “Y” como se ilustra en la figura 11.

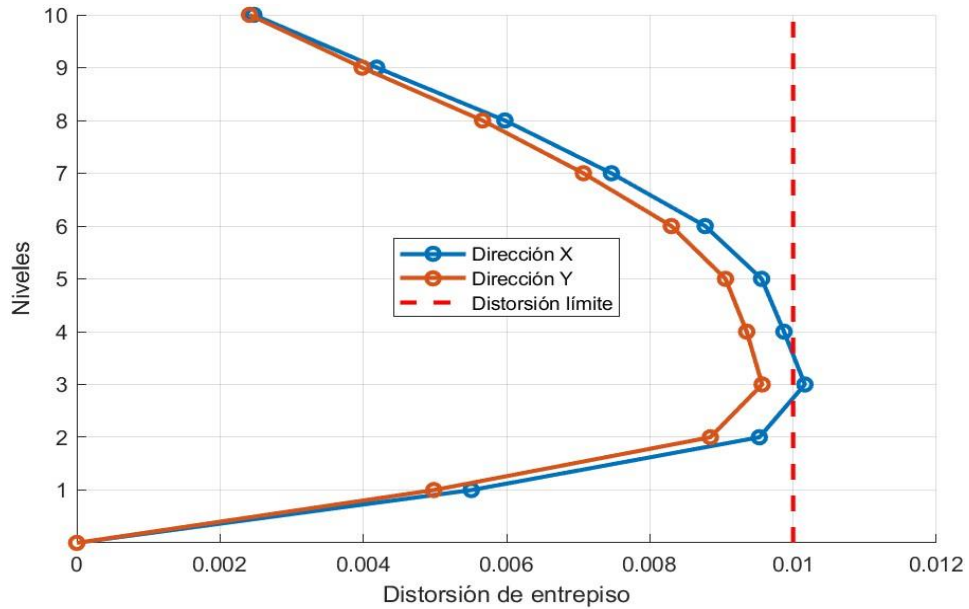


Figura 11. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel de M10.

En el diseño de M15 obtuvo una distorsión máxima de 0.0105 en dirección “X” y una distorsión de 0.0106 en dirección “Y” como se ilustra en la figura 12.

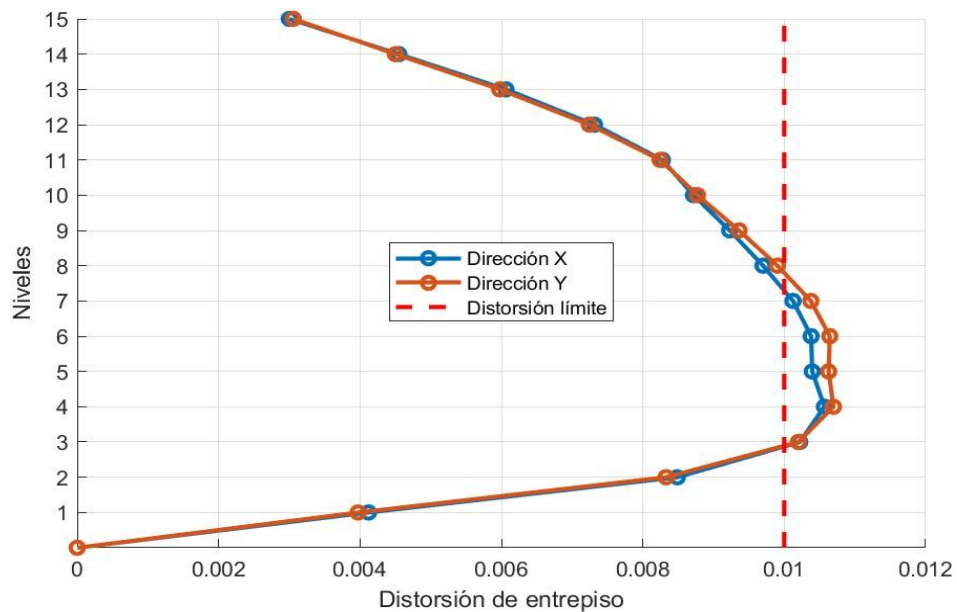


Figura 12. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel de M15.

3.3 Diseño del sistema secundario

Para las estructuras que son diseñadas con disipadores de energía en nuestro caso CRP, deben cumplir con lo indicado en las NTCDS-2020. Uno de los requisitos es que el sistema primario (vigas y columnas) sean diseñados para soportar como mínimo el 30% de las fuerzas sísmicas de diseño, por lo tanto, el sistema secundario (disipadores de energía) serán los encargados de soportar el porcentaje restante de estas fuerzas. De acuerdo con las NTCDS-2020 los primeros elementos estructurales en fallar serán los contravientos, siguiendo vigas y por ultimo las columnas a esto se le conoce como (columna fuerte- viga débil - contraviento aún más débil). A continuación, se muestran las distorsiones máximas de los modelos estructurales tomando el 100 % de las fuerzas sísmicas de diseño donde se observa claramente el trabajo que realizarán los contravientos, para reducir las distorsiones máximas presentadas.

En el diseño de M5 se obtuvo una distorsión máxima de 0.0337 en dirección “X” y una distorsión de 0.0306 en dirección “Y” como se ilustra en la figura 13.

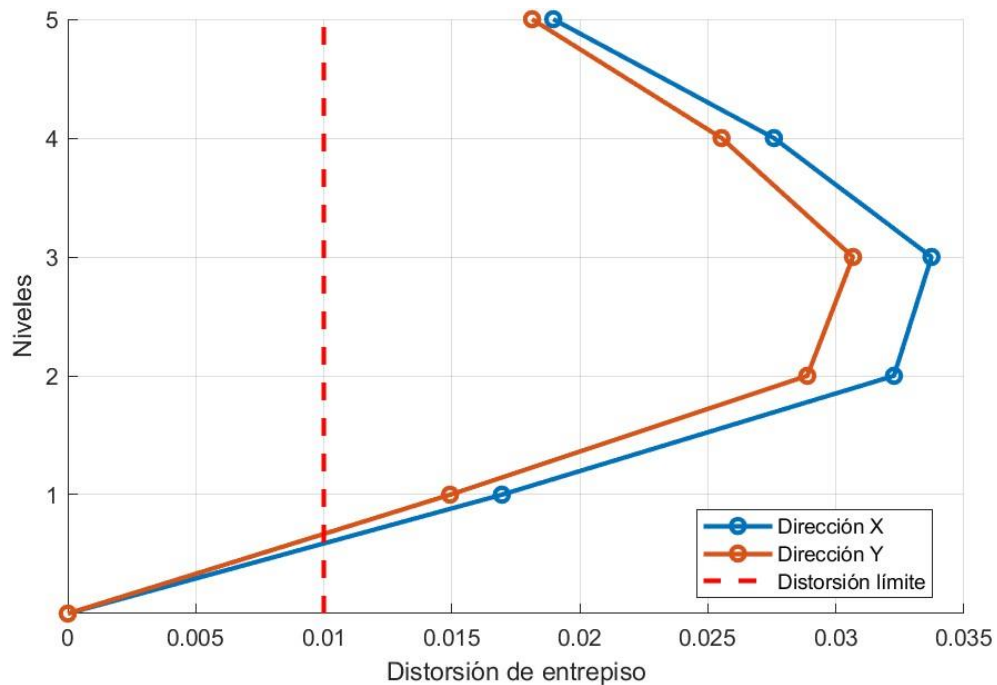


Figura 13. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel y dirección de M5.

En el diseño de M10 se obtuvo una distorsión máxima de 0.0338 en dirección “X” y una distorsión de 0.0318 en dirección “Y” como se ilustra en la figura 14.

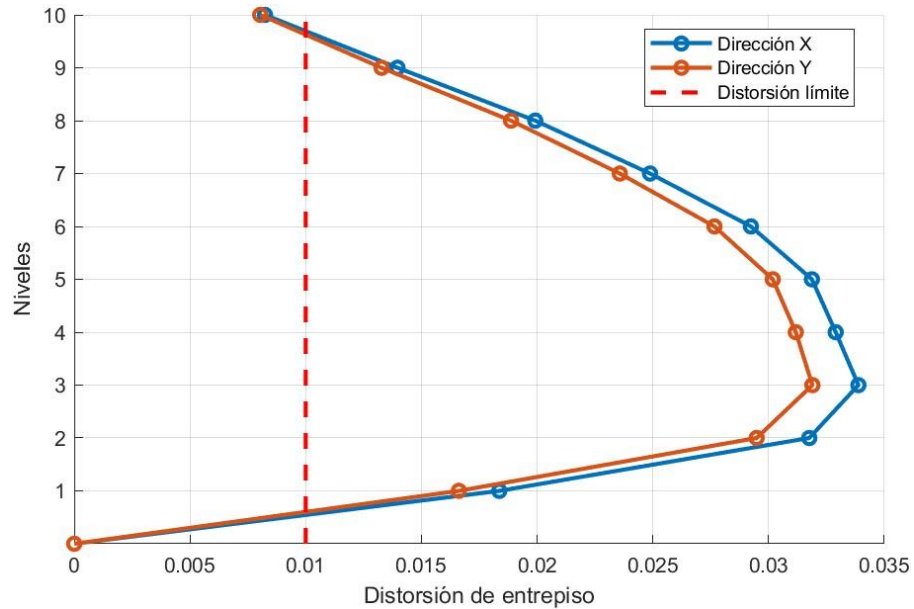


Figura 14. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel y dirección de M10.

En el diseño de M15 se obtuvo una distorsión máxima de 0.0355 en dirección “X” y una distorsión de 0.0356 en dirección “Y” como se ilustra en la figura 15.

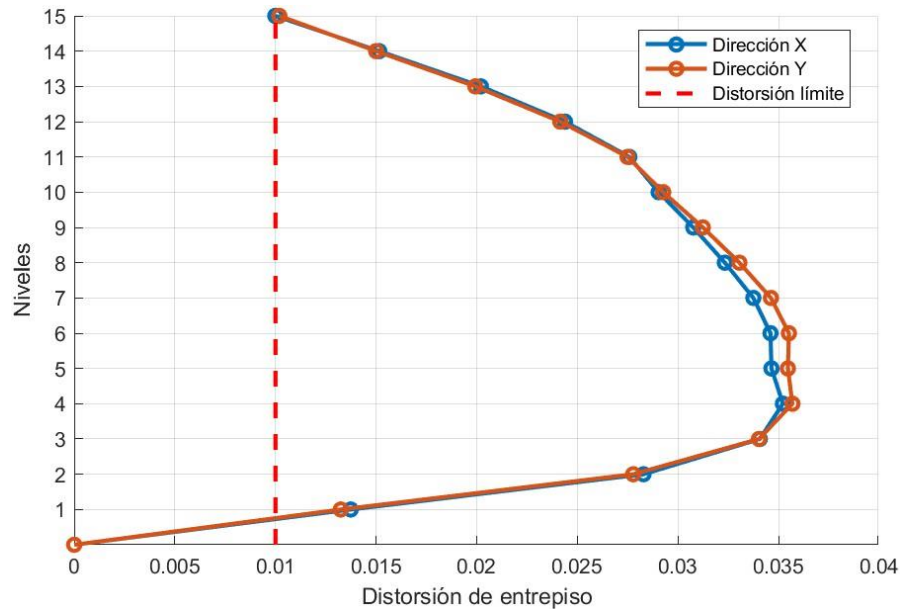


Figura 15. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel y dirección de M15.

En las gráficas se puede observar que en ambas direcciones se supera el límite máximo de distorsión de 0.015 que marca la NTCDS-2020. Por lo tanto, a partir de estos resultados se recomienda incluir disipadores de energía en la estructura para el control de los desplazamientos.

En el primer paso del diseño de los disipadores de energía para el sistema secundario fue proponer el porcentaje de cortante (%V) que resiste el sistema secundario, en el cual se tomó como distorsión máxima de entrepiso $\gamma_{\max} = 0.01$ con el objetivo de minimizar los daños del sistema primario y la distorsión calculada de cada piso y dirección (γ_{calc}) empleándose la siguiente ecuación (Ec.3).

$$\% V = \left(1 - \frac{\gamma_{\max}}{\gamma_{\text{calc}}}\right) * 100\% \quad (3)$$

Posteriormente, calculado el porcentaje de cortante se calculará la magnitud de corte que deberá ser capaz de resistir el sistema secundario (V_{ss}) en cada nivel, este se obtiene al realizar la multiplicación del porcentaje de cortante de entrepiso (%V) por el cortante total calculado en cada nivel y dirección de análisis (V) utilizando la siguiente ecuación (Ec.4).

$$V_{ss} = \%V * V \quad (4)$$

Por último, una vez obtenida la fuerza cortante necesaria en cada entrepiso, se calcula la fuerza de diseño (F_d) de los disipadores en cada entrepiso, esto se realiza dividiendo el cortante (V_{ss}) de cada entrepiso y en cada dirección, entre un número de disipadores propuestos (n) utilizando la ecuación (Ec.5).

$$F_d = \frac{V_{ss}/n}{\cos \theta} \quad (5)$$

Donde F_d es la fuerza de diseño en cada disipador del nivel, n es el número de disipadores propuestos en el nivel y θ es en el ángulo que forma el disipador con la horizontal.

Realizando el cálculo para todos los niveles y en ambas direcciones de análisis se obtienen las fuerzas de diseño que se muestran en las tablas.

Tabla 7. Cálculo de fuerzas en el sistema secundario por piso para M5CRP.

Dirección	Piso	Ymax	Ycal	%V	V(ton)	Vss(ton)
X	5	0.01	0.0190	47.3%	151.62287	71.65
	4	0.01	0.0276	63.7%	286.98192	182.91
	3	0.01	0.0337	70.4%	388.41914	273.27
	2	0.01	0.0323	69.0%	451.00833	311.22
	1	0.01	0.0170	41.0%	474.31993	194.52
Y	5	0.01	0.0181	44.8%	150.29291	67.40
	4	0.01	0.0255	60.8%	283.20699	172.28
	3	0.01	0.0307	67.4%	382.12772	257.51
	2	0.01	0.0289	65.4%	442.74207	289.44
	1	0.01	0.0149	33.0%	465.14814	153.55

Tabla 8. Fuerzas de diseño para los disipadores de energía de M5CRP.

Dirección	piso	Fd(ton) calculado	Fd(ton) Seleccionada	n (número de disipadores)	Θ Angulo del disipador
X	5	20.0	40	4	26.57
	4	51.1	60	4	26.57
	3	76.4	80	4	26.57
	2	87.0	100	4	26.57
	1	54.4	60	4	26.57
Y	5	18.8	40	4	26.57
	4	48.2	60	4	26.57
	3	72.0	80	4	26.57
	2	80.9	100	4	26.57
	1	42.9	60	4	26.57

Tabla 9. Cálculo de fuerzas en el sistema secundario por piso para M10CRP.

Dirección	Piso	Ymax	Ycal	%V	V(ton)	Vss(ton)
X	10	0.01	0.00824	-21.3%	169.07872	-36.01
	9	0.01	0.0140	28.4%	345.31173	98.02
	8	0.01	0.0199	49.8%	508.11919	253.04
	7	0.01	0.0249	59.8%	655.17328	391.84
	6	0.01	0.0292	65.8%	784.27549	516.02
	5	0.01	0.0319	68.6%	892.85742	612.72
	4	0.01	0.0329	69.6%	980.58284	682.53
	3	0.01	0.0339	70.5%	1045.48348	736.90
	2	0.01	0.0318	68.5%	1085.50268	743.68
	1	0.01	0.0184	45.5%	1100.7894	501.36
Y	10	0.01	0.0080	-24.4%	168.41191	-41.16
	9	0.01	0.0133	24.7%	343.54228	84.85
	8	0.01	0.0189	47.0%	505.24599	237.52
	7	0.01	0.0236	57.6%	651.23497	374.96
	6	0.01	0.0277	63.8%	779.28392	497.55

	5	0.01	0.0302	66.9%	886.82752	592.98
	4	0.01	0.0312	67.9%	973.46428	661.22
	3	0.01	0.0319	68.6%	1037.19663	711.98
	2	0.01	0.0295	66.1%	1076.13582	711.15
	1	0.01	0.0166	39.8%	1090.78072	434.32

Tabla 10. Fuerzas de diseño para los disipadores de energía para M10CRP.

Dirección	piso	Fd(ton) calculado	Fd(ton) Seleccionada	n (número de disipadores)	Θ Angulo del disipador
X	10	-10.1	40	4	26.57
	9	27.4	40	4	26.57
	8	70.7	80	4	26.57
	7	109.5	120	4	26.57
	6	144.2	160	4	26.57
	5	171.3	180	4	26.57
	4	190.8	200	4	26.57
	3	206.0	220	4	26.57
	2	207.9	220	4	26.57
	1	140.1	160	4	26.57
Y	10	-11.5	40	4	26.57
	9	23.7	40	4	26.57
	8	66.4	80	4	26.57
	7	104.8	120	4	26.57
	6	139.1	140	4	26.57
	5	165.7	180	4	26.57
	4	184.8	200	4	26.57
	3	199.0	200	4	26.57
	2	198.8	200	4	26.57
	1	121.4	140	4	26.57

Tabla 11. Cálculo de fuerzas en el sistema secundario por piso para M15CRP.

Dirección	Piso	Ymax	Ycal	%V	V(ton)	Vss(ton)
X	15	0.01	0.0100	-0.1%	78.87597	-0.06
	14	0.01	0.0152	34.0%	149.9883	51.00
	13	0.01	0.0202	50.5%	206.78703	104.44
	12	0.01	0.0244	59.0%	250.13572	147.55
	11	0.01	0.0276	63.7%	281.95899	179.73
	10	0.01	0.0290	65.6%	305.25024	200.14
	9	0.01	0.0308	67.5%	323.94433	218.62
	8	0.01	0.0323	69.1%	341.5028	235.87
	7	0.01	0.0337	70.4%	360.71677	253.82
	6	0.01	0.0346	71.1%	382.94331	272.25
	5	0.01	0.0346	71.1%	408.09582	290.30
	4	0.01	0.0352	71.6%	433.89214	310.67
	3	0.01	0.0341	70.6%	456.51333	322.50
	2	0.01	0.0283	64.6%	472.20289	305.25

	1	0.01	0.0137	27.2%	478.61369	130.18
Y	15	0.01	0.010192	1.9%	81.31376	1.53
	14	0.01	0.0150	33.3%	154.86227	51.62
	13	0.01	0.0199	49.8%	214.46779	106.85
	12	0.01	0.0242	58.6%	261.19139	153.05
	11	0.01	0.0275	63.6%	296.97866	188.97
	10	0.01	0.0293	65.8%	324.70099	213.75
	9	0.01	0.0312	68.0%	347.94499	236.54
	8	0.01	0.0330	69.7%	369.73863	257.86
	7	0.01	0.0346	71.1%	392.39533	279.04
	6	0.01	0.0355	71.8%	416.93158	299.53
	5	0.01	0.0355	71.8%	443.18977	318.21
	4	0.01	0.0357	72.0%	469.05357	337.61
	3	0.01	0.0340	70.6%	491.09594	346.76
	2	0.01	0.0278	64.0%	506.05382	323.86
1	0.01	0.0132	24.5%	512.05444	125.42	

Tabla 12. Fuerzas de diseño para los disipadores de energía para M15CRP.

Dirección	piso	Fd(ton) calculado	Fd(ton) Seleccionada	n (número de disipadores)	Θ Angulo del disipador
X	15	0.0	40	6	26.57
	14	9.5	40	6	26.57
	13	19.5	40	6	26.57
	12	27.5	40	6	26.57
	11	33.5	40	6	26.57
	10	37.3	40	6	26.57
	9	40.7	60	6	26.57
	8	44.0	60	6	26.57
	7	47.3	60	6	26.57
	6	50.7	60	6	26.57
	5	54.1	60	6	26.57
	4	57.9	60	6	26.57
	3	60.1	80	6	26.57
	2	56.9	60	6	26.57
1	24.3	40	6	26.57	
Y	15	0.4	40	4	26.57
	14	14.4	40	4	26.57
	13	29.9	40	4	26.57
	12	42.8	60	4	26.57
	11	52.8	60	4	26.57
	10	59.7	60	4	26.57
	9	66.1	80	4	26.57
	8	72.1	80	4	26.57
7	78.0	80	4	26.57	

	6	83.7	100	4	26.57
	5	88.9	100	4	26.57
	4	94.4	100	4	26.57
	3	96.9	100	4	26.57
	2	90.5	100	4	26.57
	1	35.1	40	4	26.57

Es importante mencionar que las capacidades seleccionadas se determinaron por bloques de 2 niveles o más, para ello se tomaron en cuenta los valores calculados y en la selección del disipador de cada grupo se consideró la mayor fuerza de diseño calculada, además se buscó una distribución simétrica de los contravientos restringidos al pandeo, con la finalidad de reducir posibles efectos de torsión en la estructura, como se ilustran en las figuras 16, 17 y 18.

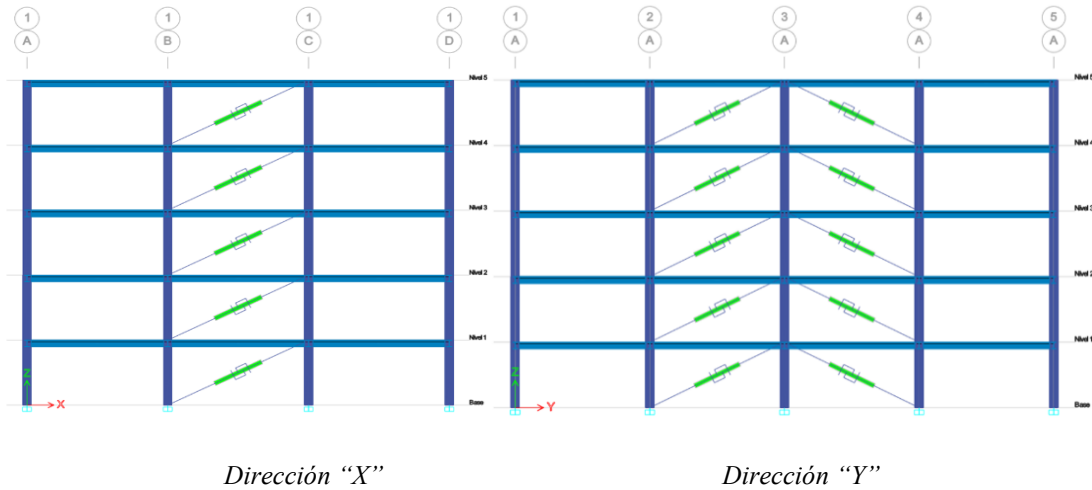


Figura 16. Vista en elevación de la distribución de contravientos restringidos al pandeo en dirección "X" y "Y" respectivamente para M5CRP.

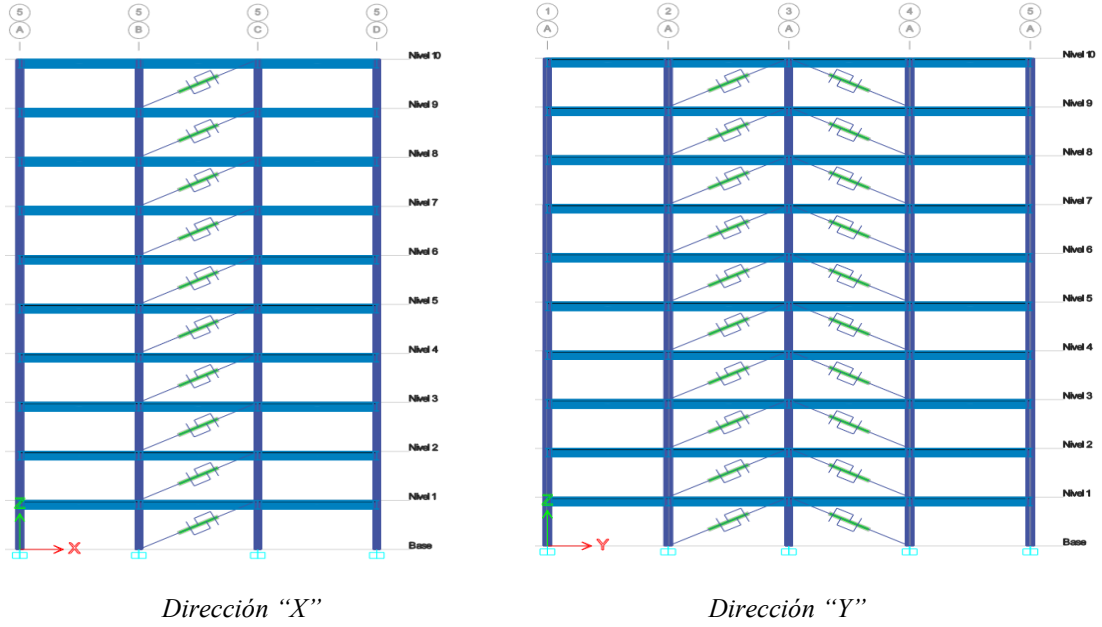


Figura 17. Vista en elevación de la distribución de contravientos restringidos al pandeo en dirección "X" y "Y" respectivamente para M10CRP.

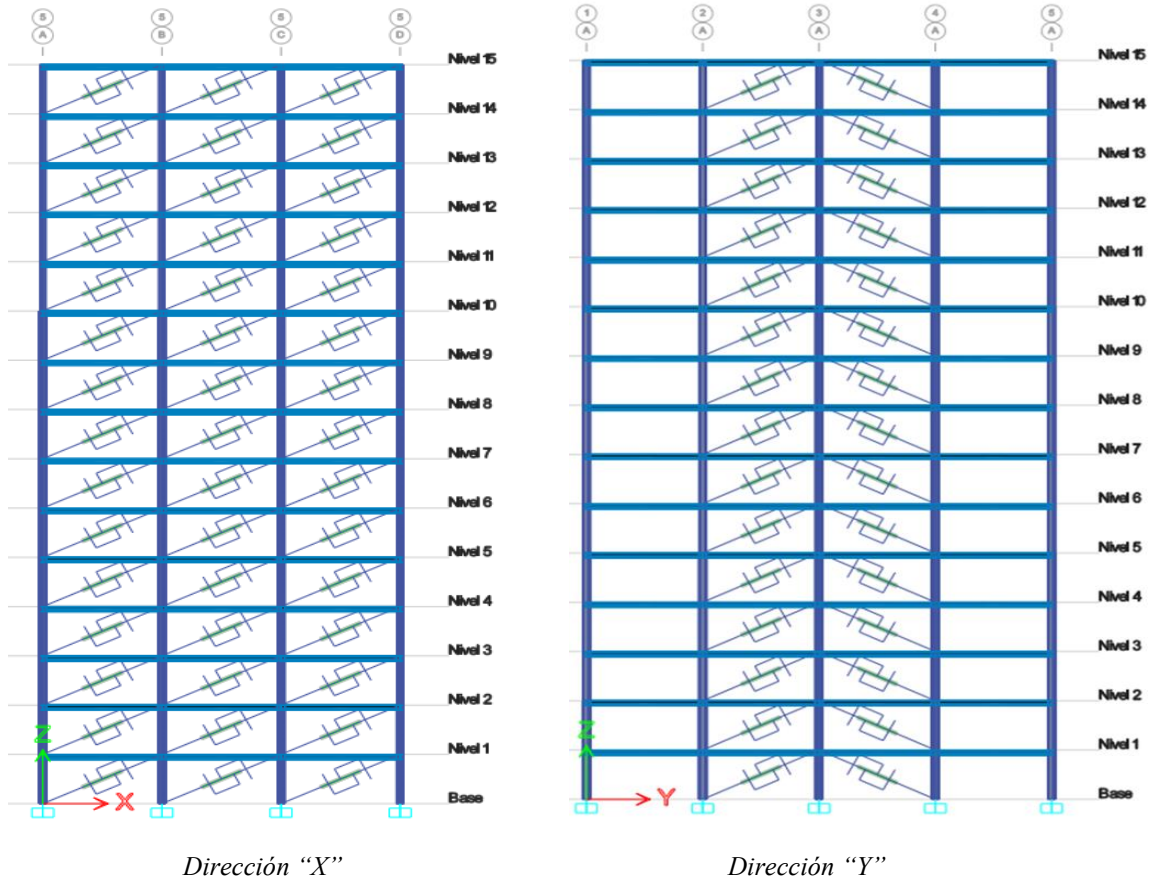


Figura 18. Vista en elevación de la distribución de contravientos restringidos al pandeo en dirección "Y" y "X" respectivamente para M15CRP.

Ya contando con los disipadores modelados en la estructura se realiza nuevamente un análisis modal espectral, pero a diferencia del primer análisis realizado ahora utilizaremos un factor de comportamiento sísmico más favorable. De acuerdo con las NTCDS-2020 en la sección 4.2.2 “Estructuras compuestas marcos con contravientos restringidos al pandeo”, estos elementos se caracterizan por mostrar un comportamiento similar tanto a tensión como a compresión. Por esta razón, los marcos con contravientos restringidos a pandeo pueden asociarse con una respuesta estable y una capacidad más alta de ductilidad ($Q=4$ y $\gamma=0.020$), adicionalmente el factor de correlación por Hiperstaticidad (k_1) puede subir a 1.25.

Se utilizó nuevamente el SASID para la determinación del nuevo espectro de diseño que se muestra en la figura 19, el cual fue afectado por los factores que se muestran a continuación:

- Ubicación: Latitud: 19.41211, Longitud: -99.16279
- Factor de Importancia: 1.0 (Grupo B)
- Factor de Irregularidad: 1.0 (Edificio Regular)
- Factor de Comportamiento Sísmico (Q) = 4.0
- Factor de Hiperstaticidad: 1.25
- Amortiguamiento: 0.050

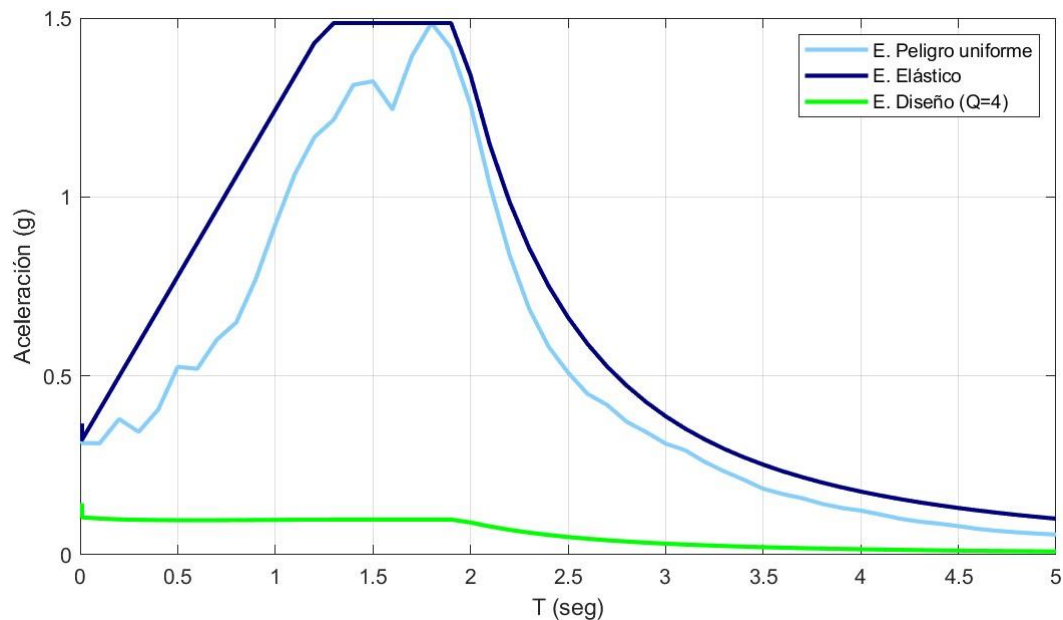


Figura 19. Espectros de diseño, espectro elástico y espectro de peligro uniforme obtenidos con el SASID.

Los contravientos restringidos al pandeo se modelaron en el programa de análisis estructural ETABS-2021 se utilizó elementos tipo “link” en donde se definieron características del disipador como, peso, masa, rigidez efectiva del disipador, fuerza de fluencia esperada, exponente de fluencia, relación de rigidez post fluencia y amortiguamiento.

Realizando un proceso iterativo para optimizar el diseño estructural, se ajustaron las dimensiones de los contravientos (ver Tabla 13,14,15), adicionalmente se muestran las propiedades de los contravientos una vez finalizado la iteración (ver Tabla 16,17,18), también se obtuvieron los siguientes resultados en cuanto a los periodos fundamentales de vibración de las estructuras (ver figura 19 y ver Tabla 19) y sus distorsiones de entrepiso (ver Figura 20,21,22).

Tabla 13. Disipadores ajustados para M5CRP.

Dirección	Piso	Disipador Calculado FD (ton)	Disipador ajustado FD (ton)
X	5	40/8	40/8
	4	60/8	40/8
	3	80/8	40/8
	2	100/8	40/8
	1	60/8	40/8
Y	5	40/8	40/8
	4	60/8	40/8
	3	80/8	40/8
	2	100/8	40/8
	1	60/8	40/8

Tabla 14. Disipadores ajustados para M10CRP.

Dirección	piso	Disipador Calculado Fd(ton)	Disipador ajustado Fd(ton)
X	10	40/8	60/8
	9	40/8	60/8
	8	80/8	80/8
	7	120/8	80/8
	6	160/8	100/8
	5	180/8	100/8
	4	200/8	100/8
	3	220/8	100/8
	2	220/8	120/8
	1	160/8	120/8
	10	40/8	40/8

Y	9	40/8	40/8
	8	80/8	40/8
	7	120/8	40/8
	6	140/8	40/8
	5	180/8	40/8
	4	200/8	40/8
	3	200/8	40/8
	2	200/8	40/8
	1	140/8	40/8

Tabla 15. Disipadores ajustados para M15CRP.

Dirección	piso	Disipador Calculado Fd(ton)	Disipador ajustado Fd(ton)
X	15	40/8	140/8
	14	40/8	140/8
	13	40/8	140/8
	12	40/8	160/8
	11	40/8	160/8
	10	40/8	160/8
	9	60/8	160/8
	8	60/8	160/8
	7	60/8	160/8
	6	60/8	160/8
	5	60/8	160/8
	4	60/8	160/8
	3	80/8	160/8
	2	60/8	160/8
	1	40/8	140/8
Y	15	40/8	180/8
	14	40/8	180/8
	13	40/8	180/8
	12	60/8	220/8
	11	60/8	220/8
	10	60/8	220/8
	9	80/8	220/8
	8	80/8	220/8
	7	80/8	220/8
	6	100/8	220/8
	5	100/8	220/8
	4	100/8	220/8
	3	100/8	220/8
	2	100/8	220/8
	1	40/8	160/8

Tabla 16. Propiedades de los disipadores para M5CRP.

Dirección	Piso	Disipador ajustado Fd(ton)	Fuerza de diseño Fd(ton)	Rigidez axial kd(kg/mm)	Fuerza de fluencia esperada Ffe(t)	Peso Wd(kg)	Masa Md(kgf*s ² /m)	Longitud (m)
X	5	40/8	40	4090	44.4	813	82.87	8
	4	40/8	40	4090	44.4	813	82.87	8
	3	40/8	40	4090	44.4	813	82.87	8
	2	40/8	40	4090	44.4	813	82.87	8
	1	40/8	40	4090	44.4	813	82.87	8
Y	5	40/8	40	4090	44.4	813	82.87	8
	4	40/8	40	4090	44.4	813	82.87	8
	3	40/8	40	4090	44.4	813	82.87	8
	2	40/8	40	4090	44.4	813	82.87	8
	1	40/8	40	4090	44.4	813	82.87	8

Tabla 17. Propiedades de los disipadores para M10CRP.

Dirección	Piso	Disipador ajustado Fd(ton)	Fuerza de diseño Fd(ton)	Rigidez axial kd(kg/mm)	Fuerza de fluencia esperada Ffe(t)	Peso Wd(kg)	Masa Md(kgf*s ² /m)	Longitud (m)
X	10	60/8	60	6142.25	66.7	1062	108.26	8
	9	60/8	60	6142.25	66.7	1062	108.26	8
	8	80/8	80	8125.18	88.9	1316	134.15	8
	7	80/8	80	8125.18	88.9	1316	134.15	8
	6	100/8	100	10156.47	111.1	1392	141.90	8
	5	100/8	100	10156.47	111.1	1392	141.90	8
	4	100/8	100	10156.47	111.1	1392	141.90	8
	3	100/8	100	10156.47	111.1	1392	141.90	8
	2	120/8	120	12187.77	133.3	1513	154.23	8
	1	120/8	120	12187.77	133.3	1513	154.23	8
Y	10	40/8	40	4094.83	44.4	813	82.87	8
	9	40/8	40	4094.83	44.4	813	82.87	8
	8	40/8	40	4094.83	44.4	813	82.87	8
	7	40/8	40	4094.83	44.4	813	82.87	8
	6	40/8	40	4094.83	44.4	813	82.87	8
	5	40/8	40	4094.83	44.4	813	82.87	8
	4	40/8	40	4094.83	44.4	813	82.87	8
	3	40/8	40	4094.83	44.4	813	82.87	8
	2	40/8	40	4094.83	44.4	813	82.87	8
	1	40/8	40	4094.83	44.4	813	82.87	8

Tabla 18. Propiedades de los disipadores para M15CRP.

Dirección	Piso	Disipador ajustado Fd(ton)	Fuerza de diseño Fd(ton)	Rigidez axial kd(kg/mm)	Fuerza de fluencia esperada Ffe(t)	Peso Wd(kg)	Masa Md(kgf*s ² /m)	Longitud (m)
X	15	140/8	140	14219.06	155.6	1748	178.19	8
	14	140/8	140	14219.06	155.6	1748	178.19	8
	13	140/8	140	14219.06	155.6	1748	178.19	8
	12	160/8	160	16121.38	177.8	1856	189.19	8
	11	160/8	160	16121.38	177.8	1856	189.19	8
	10	160/8	160	16121.38	177.8	1856	189.19	8
	9	160/8	160	16121.38	177.8	1856	189.19	8
	8	160/8	160	16121.38	177.8	1856	189.19	8
	7	160/8	160	16121.38	177.8	1856	189.19	8
	6	160/8	160	16121.38	177.8	1856	189.19	8
	5	160/8	160	16121.38	177.8	1856	189.19	8
	4	160/8	160	16121.38	177.8	1856	189.19	8
	3	160/8	160	16121.38	177.8	1856	189.19	8
	2	160/8	160	16121.38	177.8	1856	189.19	8
	1	140/8	140	14219.06	155.6	1748	178.19	8
Y	15	180/8	180	18426.74	200	2371	241.69	8
	14	180/8	180	18426.74	200	2371	241.69	8
	13	180/8	180	18426.74	200	2371	241.69	8
	12	220/8	220	22521.57	244.4	2450	249.75	8
	11	220/8	220	22521.57	244.4	2450	249.75	8
	10	220/8	220	22521.57	244.4	2450	249.75	8
	9	220/8	220	22521.57	244.4	2450	249.75	8
	8	220/8	220	22521.57	244.4	2450	249.75	8
	7	220/8	220	22521.57	244.4	2450	249.75	8
	6	220/8	220	22521.57	244.4	2450	249.75	8
	5	220/8	220	22521.57	244.4	2450	249.75	8
	4	220/8	220	22521.57	244.4	2450	249.75	8
	3	220/8	220	22521.57	244.4	2450	249.75	8
	2	220/8	220	22521.57	244.4	2450	249.75	8
1	160/8	160	16121.38	177.8	1856	189.19	8	

Tabla 19. Periodo fundamental de vibración de la estructura.

Edificios	5 niveles	10 niveles	15 niveles
Periodo (Ts)	0.877	1.17	1.505

En la Figura 20 se muestra el espectro elástico, espectro de diseño así como los periodos fundamentales de los modelos estructurales con CRP.

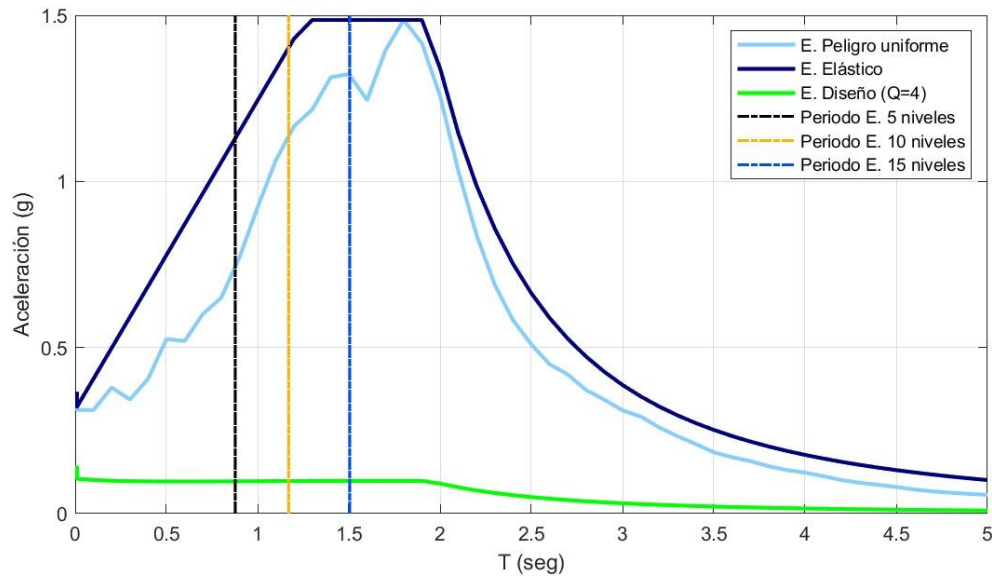


Figura 20. Espectro de peligro uniforme, Espectro elástico, Espectro de diseño $Q=4$ y periodos fundamentales de las estructuras.

En el diseño M5CRP se obtuvo una distorsión máxima de 0.0199 en dirección “X” y una distorsión de 0.0147 en dirección “Y” como se ilustra en la figura 21.

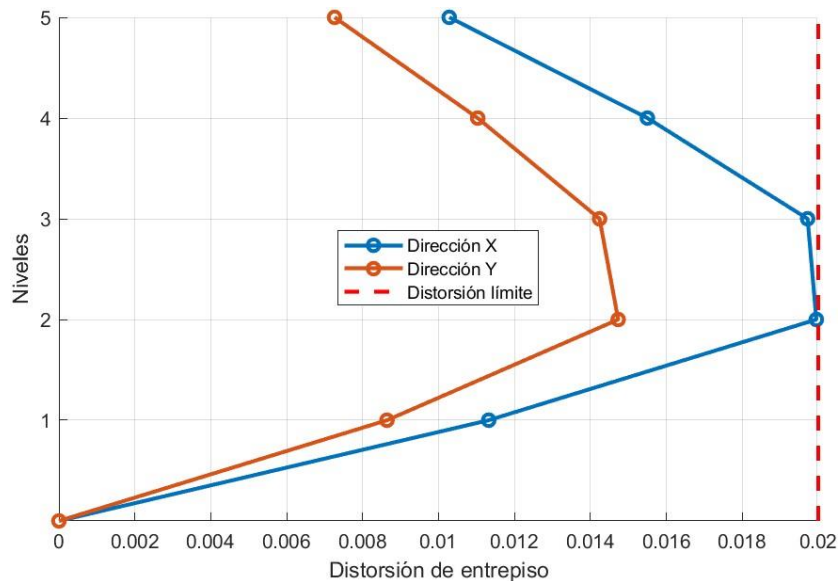


Figura 21. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel y dirección para M5CRP.

En el diseño de M10CRP se obtuvo una distorsión máxima de 0.0188 en dirección “X” y una distorsión de 0.0191 en dirección “Y” como se ilustra en la figura 22.

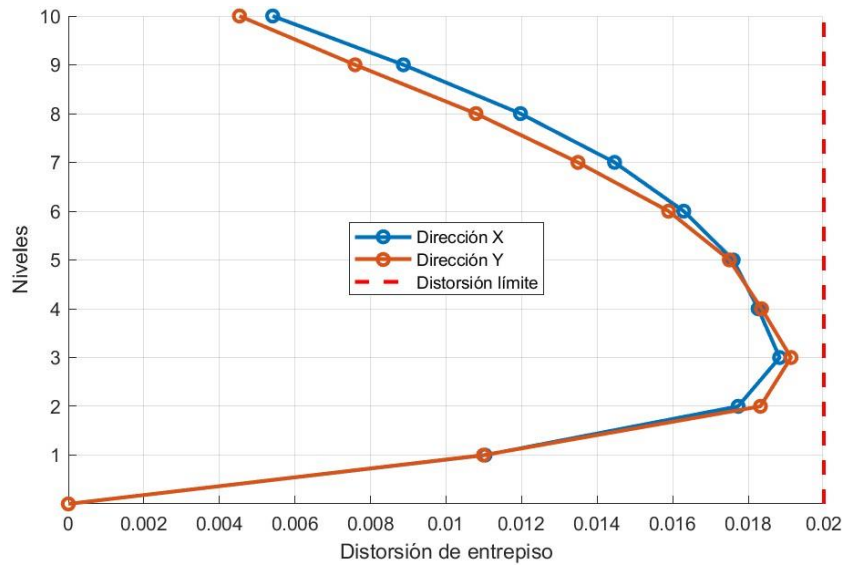


Figura 22. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel y dirección para M10CRP.

En el diseño de M15CRP se obtuvo una distorsión máxima de 0.0182 en dirección “X” y una distorsión de 0.0197 en dirección “Y” como se ilustra en la figura 23.

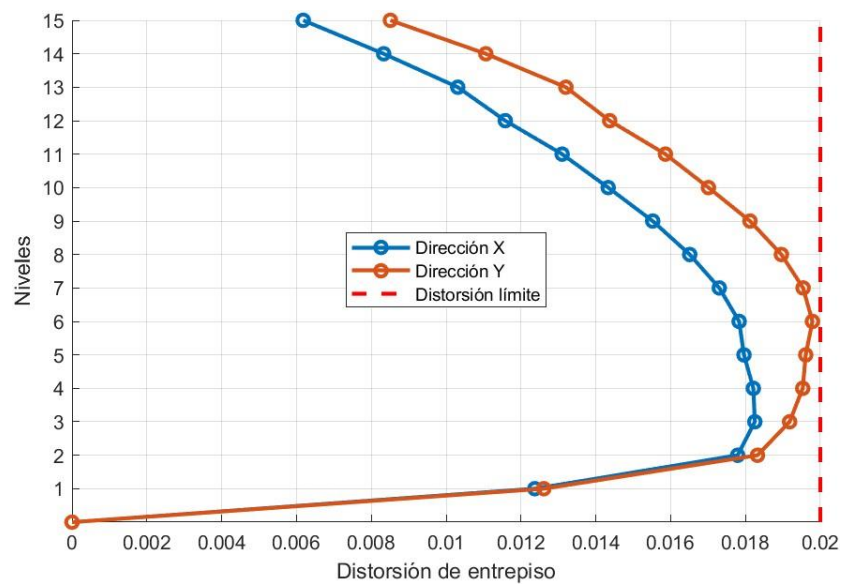


Figura 23. Distorsiones obtenidas del análisis para cada nivel y dirección para M15CRP.

3.4 Análisis estático no lineal (pushover)

Uno de los principios fundamentales del diseño de una estructura con CRP es que su primera línea de defensa ante acciones sísmicas sean los CRP, siendo estos los que disipen la mayor parte de las fuerzas sísmicas, por lo cual deberán sufrir daño antes que la estructura principal. Para corroborar que se cumpla este principio y modo de falla, se realizó un análisis “pushover” en cada una de las direcciones de las estructuras, con el objetivo de observar el esfuerzo de los contravientos y el estado de la estructura principal. Los resultados obtenidos de los análisis “pushover” se presentan en las siguientes figuras, mostrando en la dirección “X” de cada modelo sus resultados. En la tabla 20 se muestran en un paso específico del procedimiento los valores de cortante basal aplicado por nivel, así como la fuerza de diseño de los contravientos.

En la Figura 24 se muestran los resultados obtenidos del análisis pushover para M5CRP. En la figura 24 a) se muestra la estructura sin articulaciones plásticas en vigas y columnas. En la figura 24 b) se observa cómo, para esa demanda sísmica, ya la mayoría de los contravientos han alcanzado o superado su fuerza de fluencia para el que fueron diseñados. Mientras tanto, en la figura 24 c) se muestra el comienzo de la formación de articulaciones plásticas (puntos verdes) en algunas vigas, lo que confirma el correcto funcionamiento del sistema dual. Finalmente, en la figura 24 d) se observa que comienza la aparición de articulaciones plásticas en columnas.

Tabla 20. Fuerza de diseño en CRP y cortante basal, para M5CRP dirección en dirección “X”.

Nivel	Fuerza de diseño (Ton)	Cortante Basal aplicado (Ton)	% Excedido
5	40	46.64	16.6%
4	40	48.24	20.6%
3	40	49.53	23.8%
2	40	49.24	23.1%
1	40	46.51	16.3%

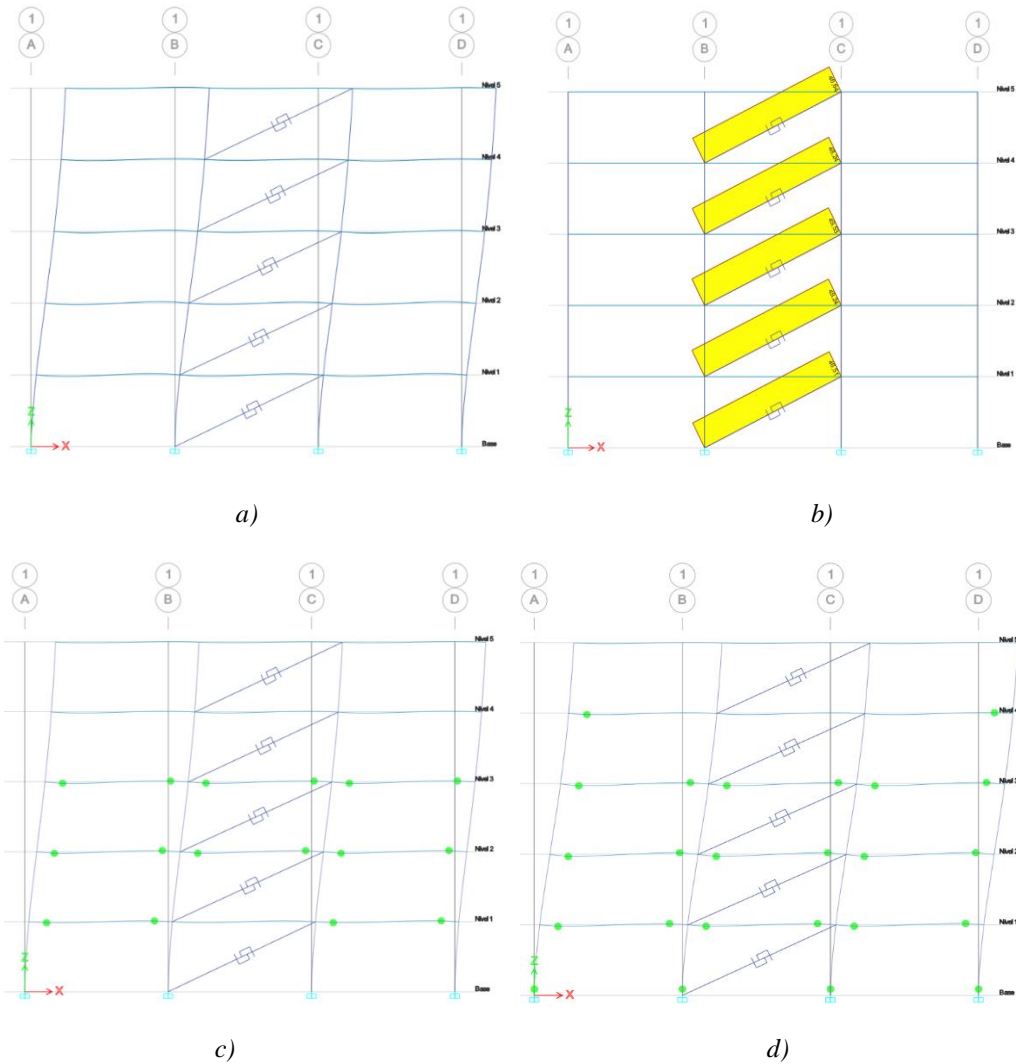


Figura 24. Resultados de los análisis pushover para M5CRP.

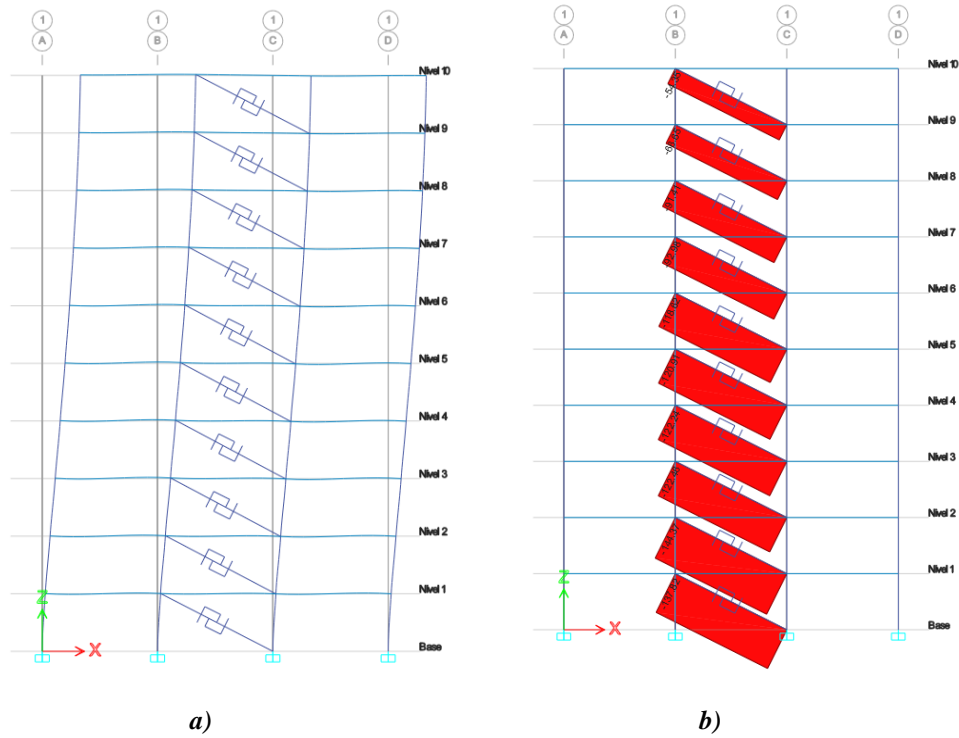
En la tabla 21 se muestran en un paso específico del procedimiento los valores de cortante basal aplicado por nivel, así como la fuerza de diseño de los contravientos.

En la Figura 25 se muestran los resultados obtenidos del análisis pushover para M10CRP. En la figura 25 a) se muestra la estructura sin articulaciones plásticas en vigas y columnas. En la figura 25 b) se observa cómo, para esa demanda sísmica, ya la mayoría de los contravientos han alcanzado o superado su fuerza de fluencia para el que fueron diseñados. Mientras tanto, en la figura 25 c) se muestra el comienzo de la formación de articulaciones plásticas (puntos verdes) en algunas vigas, lo que confirma el correcto funcionamiento del

sistema dual. Finalmente, en la figura 25 d) se observa que comienza la aparición de articulaciones plásticas en columnas.

Tabla 21. Fuerza de diseño en contravientos y cortante basal para M10CRP en dirección "X".

Nivel	Fuerza de diseño (Ton)	Cortante Basal aplicado (Ton)	% Excedido
10	60	54.35	0%
9	60	66.65	11.1%
8	80	91.41	14.3%
7	80	92.98	16.2%
6	100	118.62	18.6%
5	100	120.91	20.9%
4	100	122.24	22.2%
3	100	122.46	22.5%
2	120	144.37	20.3%
1	120	137.82	14.9%



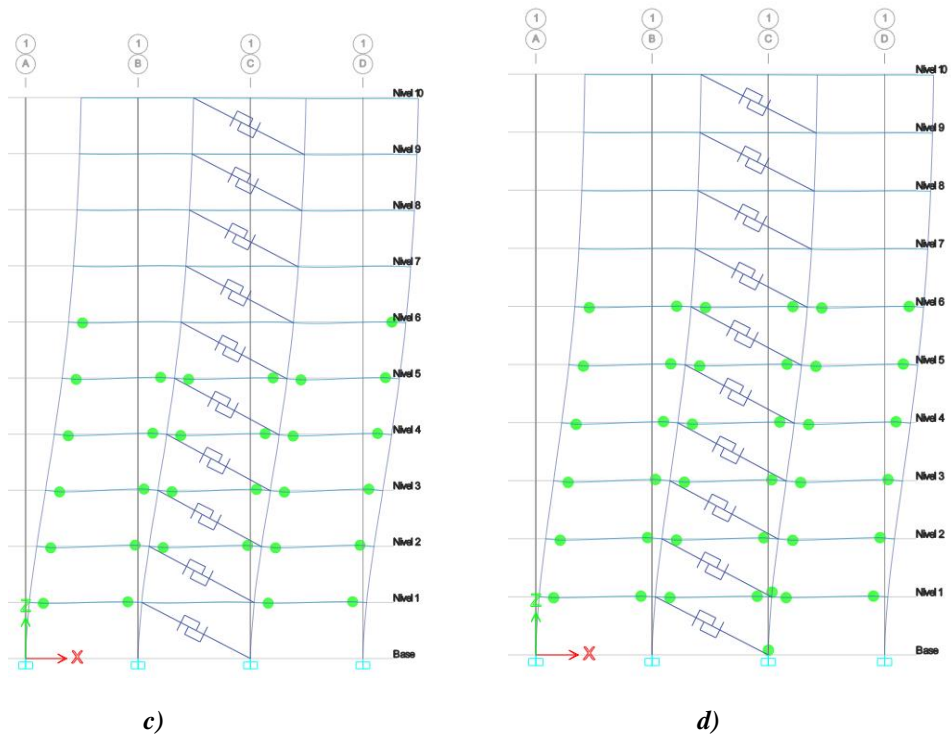


Figura 25. Resultados de los análisis pushover para M10CRP.

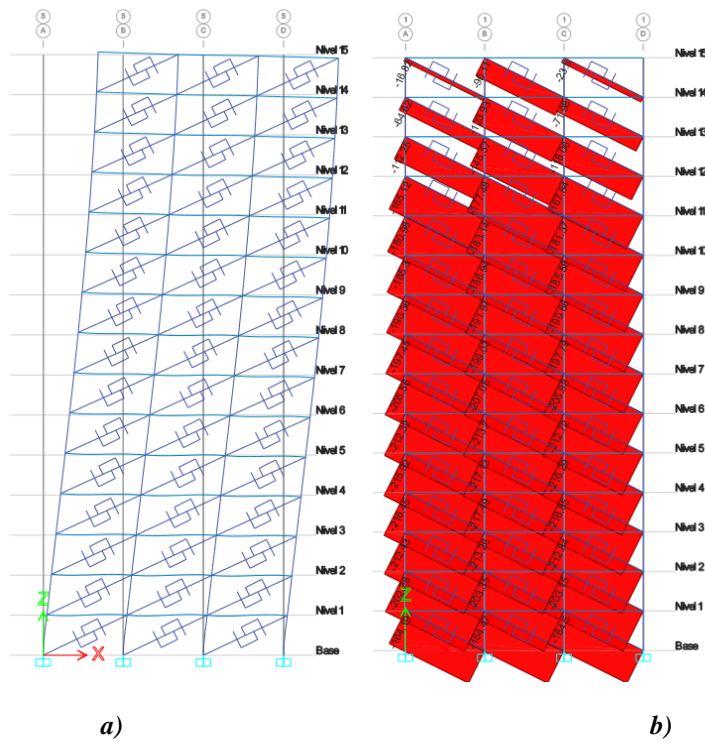
En la tabla 22 se muestran en un paso específico del procedimiento los valores de cortante basal aplicado por nivel, así como la fuerza de diseño de los contravientos.

En la Figura 26 se muestran los resultados obtenidos del análisis pushover para M15CRP. En la figura 26 a) se muestra la estructura sin articulaciones plásticas en vigas y columnas. En la figura 26 b) se observa cómo, para esa demanda sísmica, ya la mayoría de los contravientos han alcanzado o superado su fuerza de fluencia para el que fueron diseñados. Mientras tanto, en la figura 26 c) se muestra el comienzo de la formación de articulaciones plásticas (puntos verdes) en algunas vigas, lo que confirma el correcto funcionamiento del sistema dual. Finalmente, en la figura 26 d) se observa que comienza la aparición de articulaciones plásticas en columnas.

Tabla 22. Fuerza de diseño en contravientos y cortante basal para M15CRP en dirección “X”.

Nivel	Fuerza de diseño (Ton)	Cortante Basal aplicado (Ton)			% Excedido		
15	140	16.82	90.11	23.5	0.0%	0.0%	0.0%
14	140	64.62	12.93	71.98	0.0%	0.0%	0.0%
13	140	112.25	145.57	118.06	0.0%	4.0%	0.0%

12	160	165.12	177.48	167.84	3.2%	10.9%	4.9%
11	160	180.98	183.14	181.37	13.1%	14.5%	13.4%
10	160	185.3	186.94	185.58	15.8%	16.8%	16.0%
9	160	190.36	191.97	190.66	19.0%	20.0%	19.2%
8	160	197.45	199.03	197.79	23.4%	24.4%	23.6%
7	160	205.56	207.05	205.98	28.5%	29.4%	28.7%
6	160	212.32	213.7	212.72	32.7%	33.6%	33.0%
5	160	215.92	217.13	216.29	35.0%	35.7%	35.2%
4	160	216.45	217.49	216.85	35.3%	35.9%	35.5%
3	160	212.43	213.26	212.84	32.8%	33.3%	33.0%
2	160	202.78	203.35	203.15	26.7%	27.1%	27.0%
1	140	164.19	164.47	164.5	17.3%	17.5%	17.5%



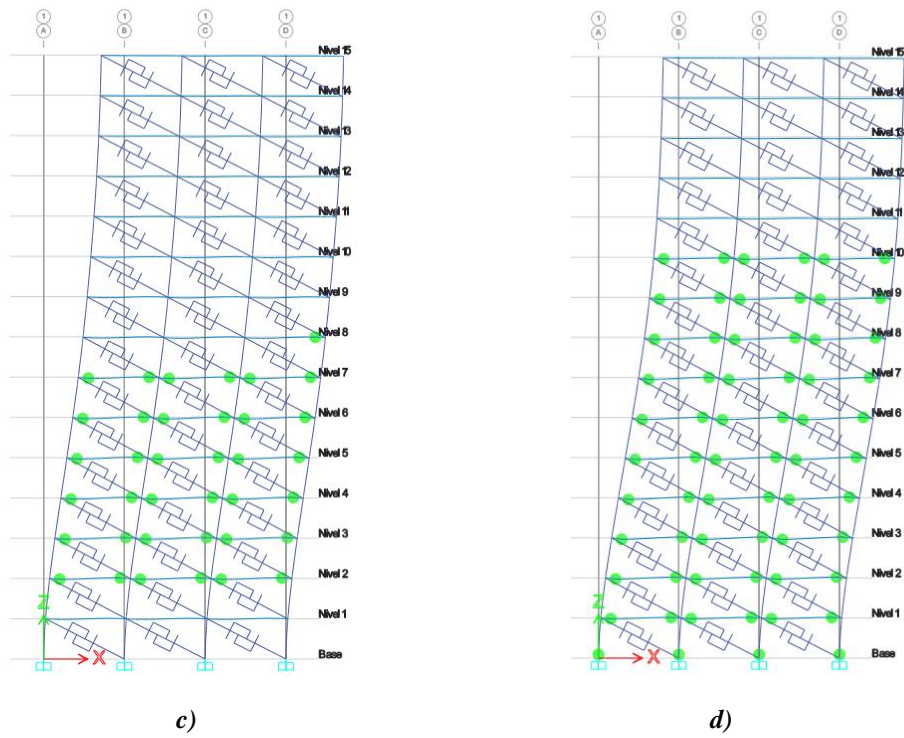


Figura 26. Resultados de los análisis pushover para M15CRP.

3.5 Selección de registros sísmicos

Se seleccionaron conjuntos de veinte pares de registros sísmicos para realizar los IDA (un conjunto para cada modelo). Los registros son consistentes con el peligro sísmico del sitio donde los edificios se consideran localizados y fueron seleccionados de tal manera que su forma espectral sea similar al espectro de peligro uniforme (EPU) en un rango de periodos que va desde $0.2T$ hasta $2T$, donde T es el promedio de los periodos en las dos direcciones ortogonales de la estructura y de esta forma se consideran los modos de vibrar superiores de la estructura [30].

Los registros sísmicos se obtuvieron de las bases de datos del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico de México y del Instituto de Ingeniería de la UNAM, estos están asociados a eventos de subducción ocurridos en el pacífico mexicano con magnitudes de momento (Mw) mayores o iguales a 6.0 y distancias epicentrales de aproximadamente 300 - 500 km.

La respuesta estructural de los edificios se estimó considerando la acción simultánea de dos componentes horizontales, con el fin de obtener los parámetros de demanda estructural (PDE) de interés en función de la intensidad sísmica. Para realizar el correcto filtrado de información y realizar la obtención de registros sísmicos de interés utilizando la medida $Sa(T_1)$ se utilizó el programa Matlab [31] donde la intensidad de las dos componentes se combinó usando la media cuadrática de la ecuación (Ec.6).

$$Sa = \sqrt{\frac{S_{aEW}^2 + S_{aNS}^2}{2}} \quad (6)$$

donde S_{aEW} y S_{aNS} son las ordenadas del espectro elástico de pseudo-aceleración asociadas al periodo fundamental de vibración del sistema estructural considerado, para un 5% del amortiguamiento crítico, correspondientes a las componentes Este-Oeste (E-W) y Norte-Sur (N-S), respectivamente y los espectros de respuesta de pseudoaceleración (considerando las dos componentes horizontales) escalados para la intensidad del EPU correspondiente al sitio.

En la Figura 27 se muestran los espectros de respuesta de aceleración (Sa) correspondientes a los registros seleccionados para el análisis de M5CRP ($T_1 = 0.877$ s, Tabla 19) y en la Tabla 23 se presentan las características principales de los registros sísmicos utilizados.

En la gráfica se incluye el Espectro de Peligro Uniforme (EPU) (curva azul gruesa), así como las curvas espectrales individuales de los registros (curvas grises). El eje horizontal representa el período de vibración (T) en segundos, mientras que el eje vertical muestra la aceleración espectral (Sa) en unidades de gravedad (g) y la línea discontinua roja indica la ubicación del período fundamental de la estructura.

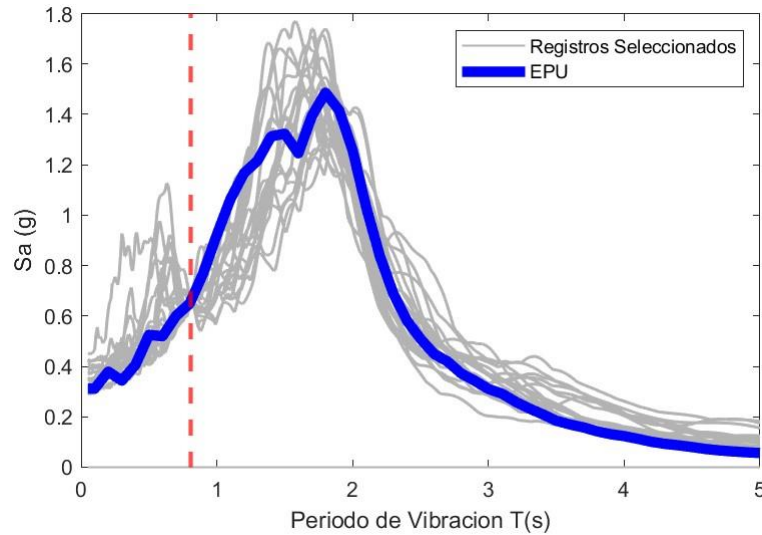


Figura 27. Registros seleccionados para M5CRP.

Tabla 23. Características de los registros sísmicos para M5CRP.

No. de Registro	Fecha	Estación	Coordenadas Epicentrales		Distancia epicentral (km)	Magnitud (Mw)	PGA (cm/s ²)	
			Latitud N	Longitud W			NS	EW
1	18/04/2014	AL01	17.18	101.19	331.238	7.2	28.9499	37.0091
2	08/09/2017	CCCL	14.761	94.103	747.7316	8.2	19.6893	11.1149
3	19/09/2017	CCCL	18.3353	98.6763	133.247	7.1	85.5283	41.0016
4	22/01/2003	CI05	18.6	104.22	539.7244	6.5	14.7653	24.864
5	08/09/2017	CI05	14.85	94.11	739.9697	8.2	34.1488	26.23
6	18/04/2014	CJ03	17.18	101.19	328.2792	7.2	27.2974	33.4598
7	08/05/2014	CJ03	17.11	100.87	313.5601	6.4	28.0475	29.949
8	18/04/2014	CJ04	17.18	101.19	328.2945	7.2	30.4692	33.6552
9	08/05/2014	CJ04	17.11	100.87	313.5753	6.4	29.0433	31.0346
10	18/04/2014	GA62	17.18	101.19	331.8399	7.2	43.7341	42.5746
11	23/06/2020	GC38	15.78	96.12	505.2784	7.4	26.3466	24.277
12	14/09/1995	GC38	16.31	98.88	335.4556	7.2	31.13	19.63
13	29/11/1978	NONP	16	96.69	463.8366	7.8	24.571	18.959
14	07/06/1982	NONS	16.17	98.36	374.4303	6.1	20.019	21.578
15	20/03/2012	S160	16.42	98.36	341.2609	7.4	22.9754	19.8473
16	16/02/2018	S160	16.21	98.01	374.2265	7.2	25.2772	32.1854
17	16/02/2018	SCT2	16.218	98.0135	373.4987	7.2	22.453	20.969

18	20/03/2012	TL08	16.42	98.36	347.076	7.4	35.4336	27.947
19	18/04/2014	TL08	17.18	101.19	333.2533	7.2	33.8747	24.1034
20	08/09/2017	TL55	14.85	94.11	740.8611	8.2	14.7271	21.2143

En la Figura 28 se muestran los espectros de respuesta de pseudo-aceleración (S_a) correspondientes a los registros seleccionados para el análisis de M10CRP ($T_1 = 1.17$ s, Tabla 19) y en la Tabla 24 se presentan las características principales de los registros sísmicos utilizados.

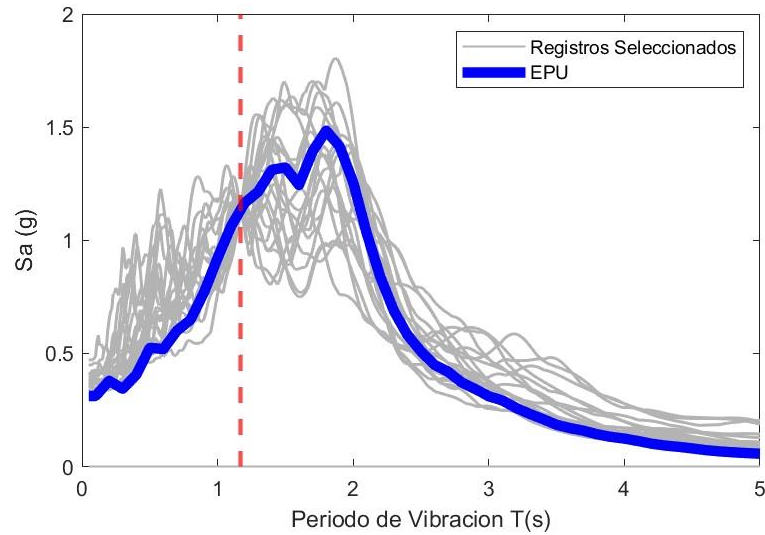


Figura 28. Registros seleccionados para M10CRP.

Tabla 24. Características de los registros sísmicos para M10CRP.

No. de Registro	Fecha	Estación	Coordenadas Epicentrales		Distancia epicentral (km)	Magnitud (Mw)	PGA (cm/s ²)	
			Latitud N	Longitud W			NS	EW
1	18/04/2014	AL01	17.18	101.19	331.238	7.2	28.9499	37.0091
2	08/09/2017	AL01	14.85	94.11	739.712	8.2	27.3626	24.23
3	30/09/1999	AL01	16.05	97.004	439.9461	7.4	26.8281	22.4668
4	19/09/2017	CCCL	16.42	98.36	344.4979	7.4	49.2049	57.9299
5	20/03/2012	CI05	16.42	98.36	344.4979	7.4	49.2049	57.9299
6	20/03/2012	EX09	16.42	98.36	344.9038	7.4	43.4688	39.3388
7	20/03/2012	EX12	16.42	98.36	344.9038	7.4	45.9998	41.221
8	20/03/2012	LI58	16.42	98.36	345.1093	7.4	41.53	34.5384
9	24/01/1980	LOTS	18.03	98.29	178.6027	6.4	17.735	24.861
10	11/01/1997	LV17	17.9	103	445.0757	6.9	18.8653	23.6796

11	14/09/1995	PENR	16.31	98.88	336.8895	6.4	21.15	32.31
12	30/09/1999	PENR	15.95	97.03	432.7546	6.5	14.731	22.816
13	20/03/2012	S160	16.42	98.36	341.2609	7.4	22.9754	19.8473
14	16/02/2018	S160	16.21	98.01	374.2265	7.2	25.2772	32.1854
15	08/09/2017	SCT2	14.761	94.103	744.3436	8.2	25.3639	19.5449
16	18/04/2014	TL55	17.18	101.19	332.9439	7.2	25.4606	26.046
17	08/05/2014	TL55	17.11	100.87	318.4065	6.4	27.8344	27.8154
18	08/09/2017	TL55	14.85	94.11	740.8611	8.2	14.7271	21.2143
19	19/09/2017	TL55	18.4	98.72	125.4306	7.1	82.4566	69.196
20	15/06/1999	TL08	18.13	97.539	223.243	7	25.2928	20.8968

En la Figura 29 se muestran los espectros de respuesta de pseudo-aceleración (S_a) correspondientes a los registros seleccionados para el análisis de M15CRP ($T_1 = 1.505$ s, Tabla 19) y en la Tabla 25 se presentan las características principales de los registros sísmicos utilizados.

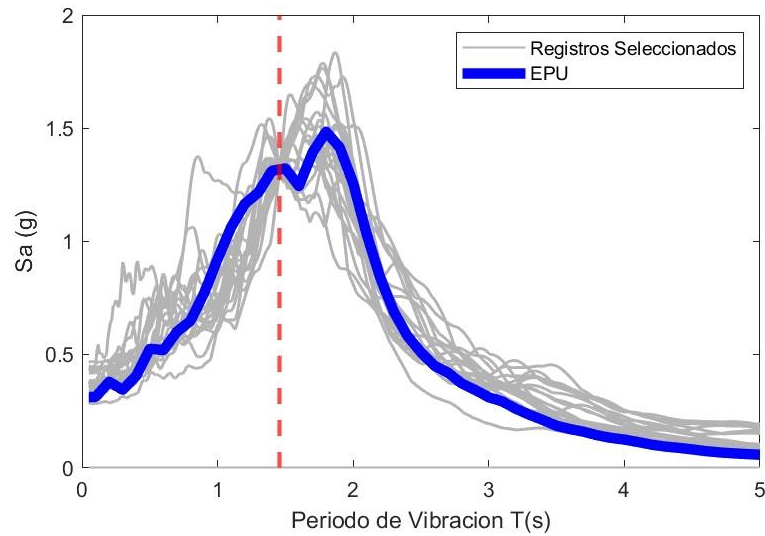


Figura 29. Registros seleccionados para M15CRP.

Tabla 25. Características de los registros sísmicos para M15CRP.

No. de Registro	Fecha	Estación	Coordenadas Epicentrales		Distancia epicentral (km)	Magnitud (Mw)	PGA (cm/s ²)	
			Latitud N	Longitud W			NS	EW
1	08/09/2017	AL01	14.85	94.11	739.712	8.2	27.3626	24.23
2	08/09/2017	CCCL	14.761	94.103	747.7316	8.2	19.6893	11.1149
3	19/09/2017	CCCL	18.3353	98.6763	133.247	7.1	85.5283	41.0016
4	22/01/2003	CI05	18.6	104.22	539.7244	6.5	14.7653	24.864
5	20/03/2012	CI05	16.42	98.36	344.4979	7.4	49.2049	57.9299

6	08/05/2014	CI05	17.11	100.87	313.8439	6.4	33.796	31.5633
7	08/09/2017	CI05	14.85	94.11	739.9697	8.2	34.1488	26.23
8	08/05/2014	CJ03	17.11	100.87	313.5601	6.4	28.0475	29.949
9	08/05/2014	CJ04	17.11	100.87	313.5753	6.4	29.0433	31.0346
10	18/04/2014	GA62	17.18	101.19	331.8399	7.2	43.7341	42.5746
11	14/09/1995	GC38	16.31	98.88	335.4556	7.2	31.13	19.63
12	29/11/1978	NONP	16	96.69	463.8366	7.8	24.571	18.959
13	20/03/2012	S160	16.42	98.36	341.2609	7.4	22.9754	19.8473
14	20/03/2012	SCT2	16.251	98.521	356.1901	7.4	36.9862	31.0591
15	18/04/2014	SCT2	17.18	101.19	327.5822	7.2	34.1147	28.34
16	08/09/2017	SCT2	14.761	94.103	744.3436	8.2	25.3639	19.5449
17	16/02/2018	SCT2	16.218	98.0135	373.4987	7.2	22.453	20.969
18	08/05/2014	TL55	17.11	100.87	318.4065	6.4	27.8344	27.8154
19	08/09/2017	TL55	14.85	94.11	740.8611	8.2	14.7271	21.2143
20	16/02/2018	TL08	16.21	98.01	379.7851	7.2	15.6688	25.8236

3.6 Modelo no lineal de los edificios en OpenSees

Para llevar a cabo una evaluación adecuada del desempeño sísmico de cada estructura y realizar los análisis dinámicos incrementales correspondientes, se emplearon los programas OpenSees y OpenSees Navigator [32], debido a su alta capacidad para efectuar análisis estructurales tanto estáticos como dinámicos, considerando el comportamiento lineal y no lineal de los materiales y elementos estructurales. Estas herramientas de simulación resultan especialmente apropiadas para el estudio del comportamiento sísmico de estructuras complejas, ya que permiten modelar con precisión los diferentes componentes estructurales y las condiciones de carga a las que están sometidos.

Para facilitar el proceso de modelado, en las etapas iniciales del trabajo se utilizó OpenSees Navigator, una interfaz gráfica de usuario (IGU) que permitió construir los modelos estructurales de forma más intuitiva. Esta herramienta facilitó la definición de la geometría del modelo, ya que cuenta con la opción de importar archivos .s2k, lo cual permitió generar la geometría de las estructuras previamente en el software SAP2000 [33], que ofrece la función de exportar este tipo de archivos. Una vez definida la geometría, con las conexiones entre vigas y columnas establecidas, se asignaron múltiples grados de libertad a los nodos. Estas conexiones se visualizan de manera más clara en la interfaz de OpenSees Navigator, como se muestra en las Figuras 30(a) y 30(b), correspondientes a M5 y a M5CRP,

respectivamente, en las Figuras 31(a) y 31(b), correspondientes a M10 y a M10CRP, en las Figuras 32(a) y 32(b), correspondientes a M15 y a M15CRP.

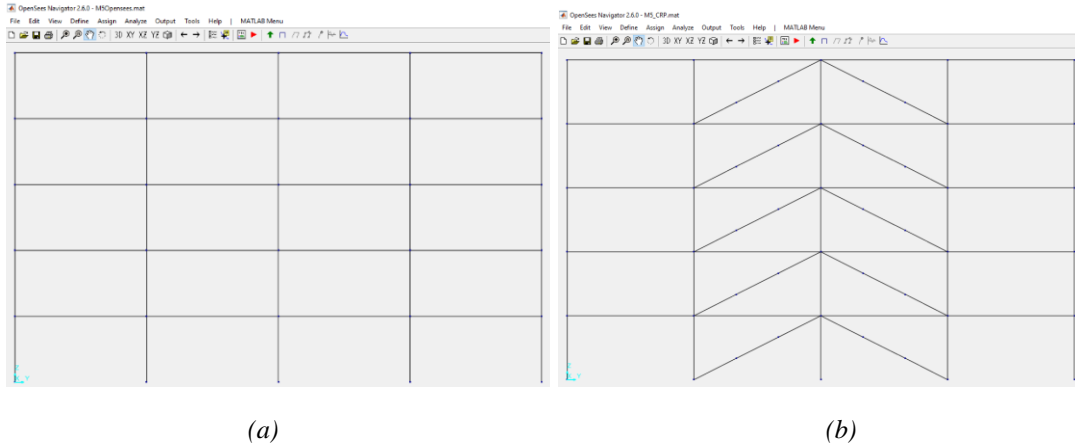


Figura 30. Vista en OpenSees Navigator a) M5 b) M5CRP

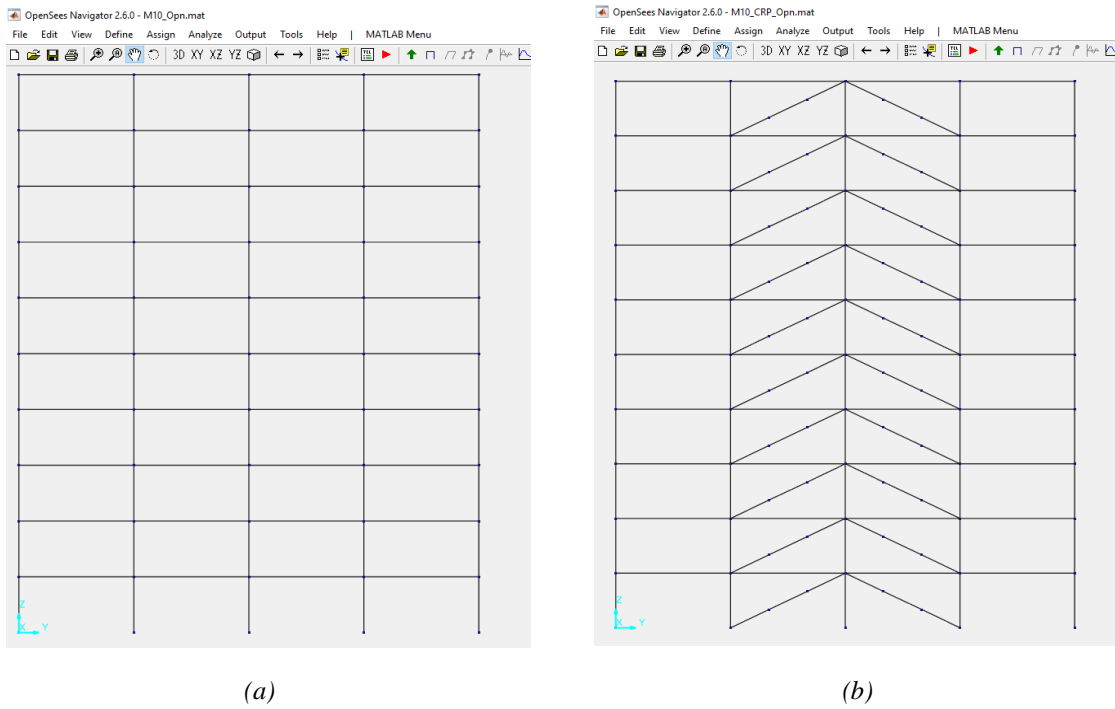


Figura 31. Vista en OpenSees Navigator a) M10 b) M10CRP

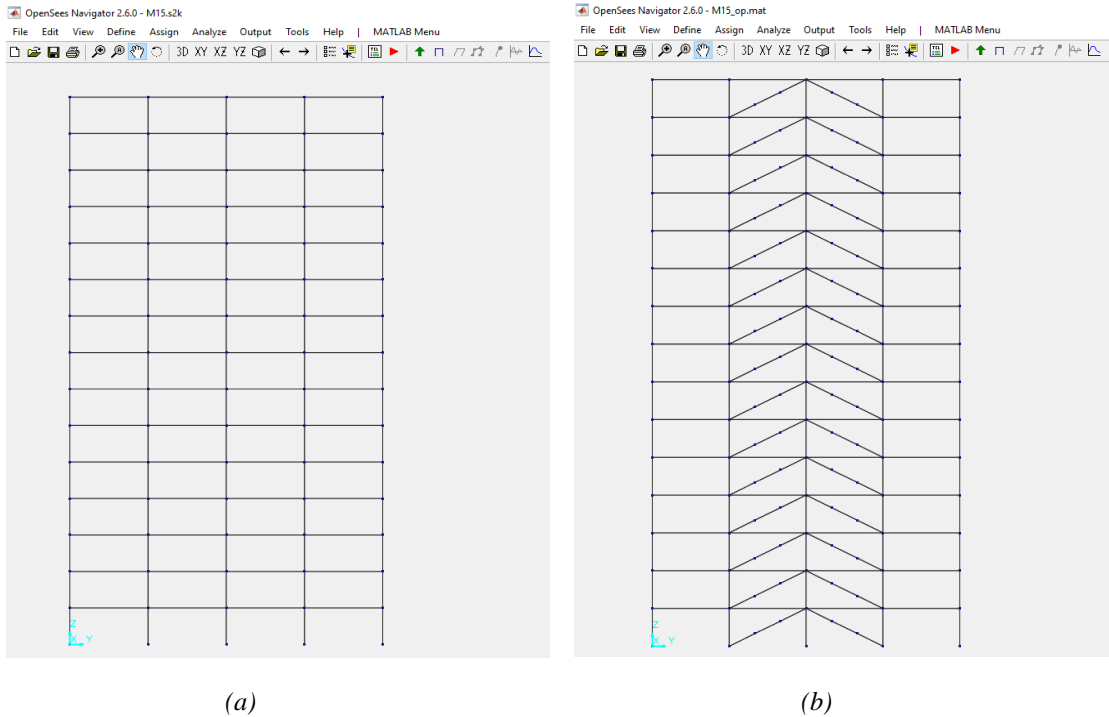


Figura 32. Vista en OpenSees Navigator a) M15 b) M15CRP

Asimismo, se consideró en los modelos que la base se encontrara empotrada y que las losas se modelaran como diafragmas rígidos, esto con el objetivo de garantizar que todos los nodos ubicados en un mismo nivel compartan una respuesta dinámica uniforme, es decir, presenten aceleraciones, velocidades y desplazamientos prácticamente iguales durante la acción sísmica. También nos permitió definir y asignar propiedades de materiales y secciones, aplicar cargas y visualizar los resultados de manera gráfica.

En cuanto a la modelación del comportamiento no lineal del acero estructural, se utilizaron materiales provenientes de la biblioteca de OpenSees. Para elementos estructurales principales (vigas y columnas), se empleó el material “Steel02”, basado en la formulación de Giuffrè–Menegotto–Pinto con degradación isotrópica [34]. Este modelo es ampliamente validado en la literatura para análisis histeréticos, ya que reproduce con precisión la rigidez inicial, el endurecimiento por deformación (strain hardening), el efecto Bauschinger y la degradación por ciclos de carga, aspectos fundamentales para representar la respuesta sísmica cíclica de estructuras de acero.

Para los elementos disipadores tipo contraviento restringido al pandeo (CRP), se utilizó el material “SteelMPF” [35], el cual incorpora mecanismos adicionales como fricción interna, pérdida de rigidez postpandeo y efectos de interacción axial-lateral. Este modelo es adecuado para capturar la respuesta no lineal altamente dependiente de la historia de carga que presentan los sistemas de disipación basados en pandeo restringido, permitiendo simular con mayor precisión el fenómeno de disipación de energía en los análisis dinámicos incrementales. Las propiedades asignadas a ambos materiales se presentan en las Figuras 33 y 34, respectivamente.

Define Steel02 Material	
Material Name :	AceroG50 Add
Yield Stress (Fy) :	35153481.31
Modulus of Elasticity (E) :	20389019158
Hardening Ratio (b) :	0.01
Transition Parameter (R0) :	18
Transition Parameter (cR1) :	0.925
Transition Parameter (cR2) :	0.15
Optional Parameters :	
Iso Hardening Parameter (a1) :	0
Iso Hardening Parameter (a2) :	1
Iso Hardening Parameter (a3) :	0
Iso Hardening Parameter (a4) :	1
Initial Stress (sig0) :	0

Figura 33. Definición de las propiedades del material Steel02 en OpenSees Navigator.

Define SteelMPF Material	
Material Name :	SteelMPF <input type="button" value="Add"/>
Yield Stress in Tension (Fyp) :	35150000
Yield Stress in Comp. (Fyn) :	35150000
Modulus of Elasticity (E) :	20390000000
Hardening Ratio in Tension (bp) :	0.01
Hardening Ratio in Comp. (bn) :	0.01
Transition Parameter (R0) :	18.5
Transition Parameter (cR1) :	0.925
Transition Parameter (cR2) :	0.15
Optional Parameters :	
Iso Hardening Parameter (a1) :	0
Iso Hardening Parameter (a2) :	1
Iso Hardening Parameter (a3) :	0
Iso Hardening Parameter (a4) :	1

Figura 34. Definición de las propiedades del material SteelMPF en OpenSees Navigator.

En particular, las secciones y CRP fueron modeladas como secciones tipo fibra (fiber sections) y se realizó la discretización de acuerdo con las recomendaciones de Kostic y Filippou [36] lo que permite representar de manera precisa el comportamiento no lineal distribuido en la sección transversal y capturar la formación de rótulas plásticas durante la respuesta sísmica. Cabe hacer mención que para la modelación de los CRP el elemento se secciona en tres partes donde se considera un núcleo central y sus respectivas conexiones, además para tomar en cuenta el daño en los contravientos se consideró el área del núcleo como $(A_{CRP}/4)$ y en la conexión (A_{CRP}) , y para conectar los extremos de los contravientos con los nodos del marco estructural, se empleó el comando EqualDOF de OpenSees, el cual permite igualar los desplazamientos entre dos nodos en grados de libertad específicos. Esta condición garantiza la compatibilidad de desplazamientos y una adecuada transmisión de esfuerzos, lo que permite representar correctamente el comportamiento conjunto entre los elementos.

Como parte del proceso del modelado en OpenSees Navigator, se asignaron transformaciones geométricas (comando GeomTransf) a los elementos estructurales, con el objetivo de definir adecuadamente la correcta formulación de los grados de libertad asociados a flexión, axial y rotación. Para los elementos tipo viga y para CRP se empleó la transformación geométrica de tipo Lineal (Linear), Este tipo de transformación realiza una conversión directa desde el sistema local al sistema global, Su uso es adecuado en elementos donde los desplazamientos y rotaciones son relativamente pequeños. Para las Columnas se utilizó la transformación de tipo P-Delta (PDelta) la cual realiza una transformación geométrica lineal de la rigidez de la viga y la fuerza de resistencia desde el sistema de coordenadas básico al sistema de coordenadas global, considerando los efectos P-Delta de segundo orden.

Para realizar la representación numérica de los elementos estructurales de acero se utilizó el comando (ForceBeamColum) este tipo de elemento es una formulación no lineal viga-columna que permite capturar de manera más precisa el comportamiento flexo-axial de miembros estructurales, incluyendo los efectos de interacción entre flexión y fuerza axial, además de usar la integración tipo Lobatto que es el método más común para evaluar la respuesta de elementos basados en fuerzas [37], ya que ubica un punto de integración en cada extremo del elemento, donde los momentos flectores son máximos en ausencia de cargas internas. Se ubican N puntos de integración de Gauss-Lobatto a lo largo del elemento. La ubicación y el peso de cada punto de integración se tabulan en las referencias sobre análisis numérico [38].

Posteriormente, el modelo generado en OpenSees Navigator fue exportado en formato .tcl (Tool Command Languages) para su análisis en el software OpenSees el cual permite modelar materiales, secciones estructurales, elementos finitos, condiciones de frontera y diversos tipos de análisis mediante la escritura de scripts en el lenguaje de programación Tcl, proporcionando así una gran flexibilidad y control sobre el modelo analítico. El uso combinado de OpenSees y OpenSees Navigator permitió realizar simulaciones dinámicas no lineales detalladas, facilitando la evaluación del comportamiento sísmico de la estructura bajo distintos niveles de demanda sísmica.

Dentro del análisis en OpenSees se realizó primeramente el análisis estático donde se utilizó el algoritmo de Newton para resolver la ecuación residual no lineal por lo que este método es el más utilizado y robusto para resolver ecuaciones algebraicas no lineales, adicionalmente se utilizó el comando Rayleigh para asignar amortiguamiento a todos los elementos y nodos previamente definidos, en el análisis dinámico no lineal se utilizó el algoritmo de Newton en conjunto con el método de integración Newmark el cual es un método implícito de un solo paso para resolver el problema transitorio. Este método se basa en una expansión en serie de Taylor para aproximar el comportamiento de la estructura en el tiempo, resolviendo en cada paso el sistema de ecuaciones que representa el equilibrio dinámico [39][40].

Para llevar a cabo los análisis dinámicos incrementales en OpenSees, se emplean veinte pares de registros sísmicos, considerando ambas componentes horizontales ortogonales. Las estructuras son sometidas a una serie de niveles de intensidad sísmica que varían desde 0.1g hasta 2.0g, con incrementos constantes de 0.1g. Este procedimiento se aplica a cada par de registros hasta alcanzar el punto de colapso en cada estructura.

Este proceso es fundamental para obtener la respuesta estructural de los modelos con contravientos restringidos al pandeo (CRP) en función de la intensidad sísmica, con el propósito de evaluar el comportamiento sísmico de los edificios mediante parámetros de interés como las distorsiones de entrepiso y las aceleraciones de piso. Esta evaluación constituye uno de los objetivos particulares de investigación de este proyecto.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados de los análisis dinámicos incrementales (IDAs) utilizando la medida de intensidad $Sa(T_1)$

4.1.1 Análisis dinámico incremental (IDAs)

Como se mencionó anteriormente los análisis dinámicos incrementales (IDAs) se realizaron utilizando el software OpenSees sometido a un conjunto de 20 pares de registros sísmicos por cada modelo estructural, estos registros sísmicos son consistentes con el peligro sísmico de la zona. Las estructuras fueron sometidas a una serie de análisis dinámicos incrementales hasta alcanzar el punto de colapso en cada estructura.

Los parámetros de demanda estructural, como las distorsiones de entrepiso y las aceleraciones de piso, son fundamentales para evaluar el desempeño sísmico de las estructuras. Esto se debe a que el daño en los elementos estructurales y no estructurales, así como las estimaciones de consecuencias asociadas (por ejemplo, costos de reparación, pérdida de funcionalidad o riesgo para los ocupantes) se calculan directamente a partir de estos parámetros.

Además, para verificar la seguridad contra el colapso, es necesario determinar la distorsión máxima de entrepiso en función de la intensidad sísmica obtenida del análisis sísmico no lineal y compararla con los límites establecidos en los códigos de diseño, como lo establece la Norma Técnica Complementaria para el Diseño por Sismo.

En las Figuras 35, 36 y 37 se presentan los resultados de los análisis dinámicos incrementales (IDA) en términos de distorsiones de entrepiso para M5CRP, M10CRP Y M15CRP, respectivamente.

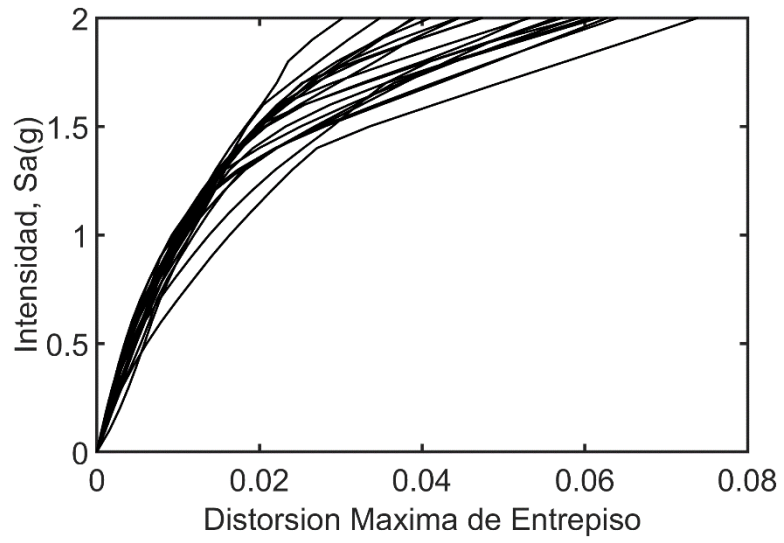


Figura 35. *Análisis dinámicos incrementales para M5CRP.*

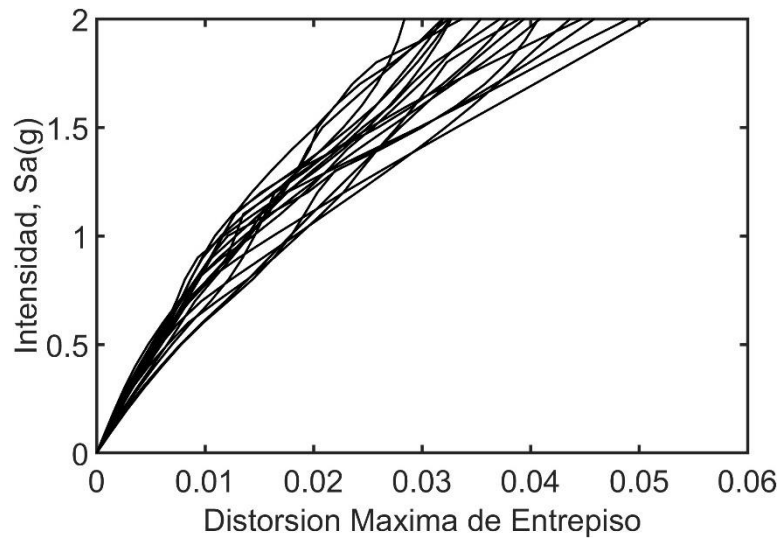


Figura 36. *Análisis dinámicos incrementales para M10CRP.*

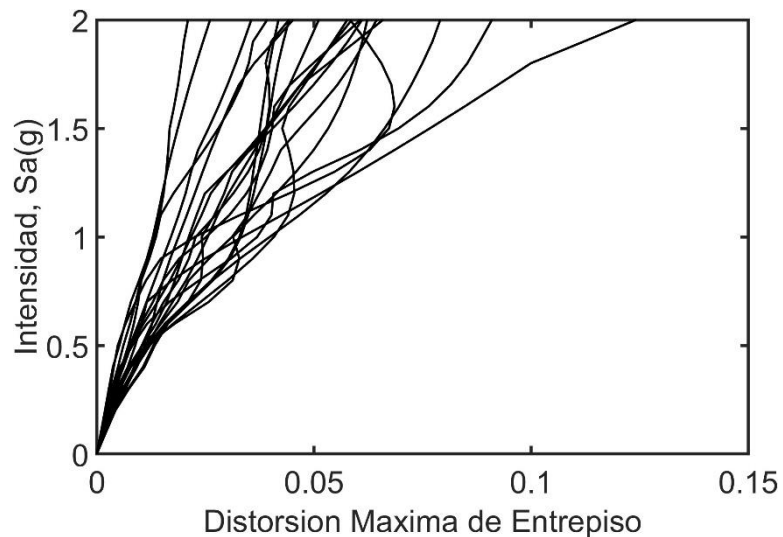


Figura 37. Análisis dinámicos incrementales para M15CRP.

En las Figuras 35, 36 y 37 se presentan las curvas de Intensidad-Respuesta (IDAs) obtenidas para diferentes modelos estructurales, en función de la distorsión máxima de entrepiso. Estas curvas permiten evaluar el comportamiento no lineal de los edificios ante distintos niveles de demanda sísmica.

En M5CRP (Figura 35) Se observa una respuesta relativamente rígida hasta aproximadamente una distorsión de 0.02, seguido de una transición suave hacia el colapso. Las curvas presentan una mayor dispersión en niveles altos de intensidad, lo cual indica un comportamiento más uniforme del sistema. Con respecto a M10CRP (Figura 36) se observa que la respuesta muestra mayor dispersión desde los niveles iniciales de intensidad, lo cual sugiere una mayor sensibilidad del sistema ante distintas características de los registros sísmicos. Se alcanza la distorsión de 0.02 a menores niveles de intensidad en comparación con el modelo M5CRP. Finalmente, en M15CRP (Figura 37) se identificó una mayor dispersión en toda la gama de intensidades, con una tendencia a alcanzar distorsiones de entrepiso elevadas hasta 0.1 o más, incluso en niveles de intensidad moderados. Esto refleja una menor capacidad de control de deformaciones y un posible comportamiento menos estable ante demandas severas.

Comparando los tres modelos se puede destacar que M5CRP muestra un mejor control de deformaciones y menor dispersión, lo que sugiere un mejor comportamiento ante diferentes

demandas sísmicas. En M10CRP se muestra mayor dispersión y vulnerabilidad al colapso, posiblemente debido a su mayor altura o flexibilidad. En M15CRP evidencio una respuesta más inestable, alcanzando niveles de distorsión superiores a los otros modelos.

4.1.2 Aceleraciones de piso

A partir de los resultados obtenidos en OpenSees, se extrajeron las aceleraciones absolutas máximas en cada nivel para cada combinación de registro sísmico e intensidad. Cabe señalar que las aceleraciones obtenidas fueron normalizadas dividiendo entre la aceleración de la gravedad ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$). Estas aceleraciones permiten analizar la demanda sísmica sobre cada piso, identificando los niveles con mayor demanda y su comportamiento frente a la intensidad del sismo.

A continuación, se presentan las gráficas de las aceleraciones de piso en las figuras 38, 39 y 40 para los tres edificios de este estudio correspondientes a 5,10 y 15 niveles, donde se relaciona la aceleración máxima registrada en cada nivel con la intensidad espectral $S_a(T_1)$. Estas curvas permiten visualizar el aumento progresivo de la demanda sísmica y la dispersión de la respuesta ante diferentes registros.

El eje horizontal “X” representa la aceleración máxima de piso, mientras que el eje vertical “Y” indica el número de nivel del edificio. Las líneas grises muestran los resultados individuales obtenidos de los 20 registros sísmicos por cada nivel de intensidad mientras que la línea azul indica la mediana de todos los registros para cada nivel.

Las gráficas presentan los resultados para seis niveles representativos de intensidad sísmica: 0.3g, 0.6g, 1.0g, 1.3g, 1.6g y 2.0g.

En M5CRP (Figura 38) se aprecia un comportamiento relativamente estable para intensidades de 0.3g y 0.6g, con baja dispersión entre registros hasta el nivel 3 y una distribución de aceleraciones que incrementa de manera uniforme desde la base hasta el nivel 5 siendo los niveles 4 y 5 los que presentan mayor dispersión. A estas intensidades, la mediana se mantiene por debajo de 0.5g incluso en los niveles superiores, y la diferencia

entre el nivel 1 y el nivel 5 no es muy significativa, lo que indica un comportamiento predominantemente elástico.

A partir de la intensidad de 1.0g, comienza a notarse una mayor dispersión en todos los niveles, especialmente en el nivel 4 y 5, donde algunas aceleraciones superan los 0.6g. Esta variabilidad aumenta conforme se incrementa la intensidad, siendo más evidente a partir de 1.3g, donde las aceleraciones en el nivel 5 alcanzan hasta 1.0g en ciertos registros, mientras que en los primeros niveles los valores permanecen mucho más bajos.

Para intensidades de 1.6g y 2.0g, la dispersión en todos los niveles especialmente en los niveles superiores es aún más claro, con aceleraciones que superan 1.2g en el nivel 5 en varios registros. Las aceleraciones máximas de piso también se incrementan de forma notable en los niveles 4 y 5, indicando un comportamiento no lineal más claro. En resumen, M5CRP presenta una respuesta uniforme a bajas intensidades, pero a partir de 1.0g se incrementa las aceleraciones máximas de piso y dispersión en los niveles superiores, concentrándose la mayor demanda en el nivel superior (azotea) de la estructura.

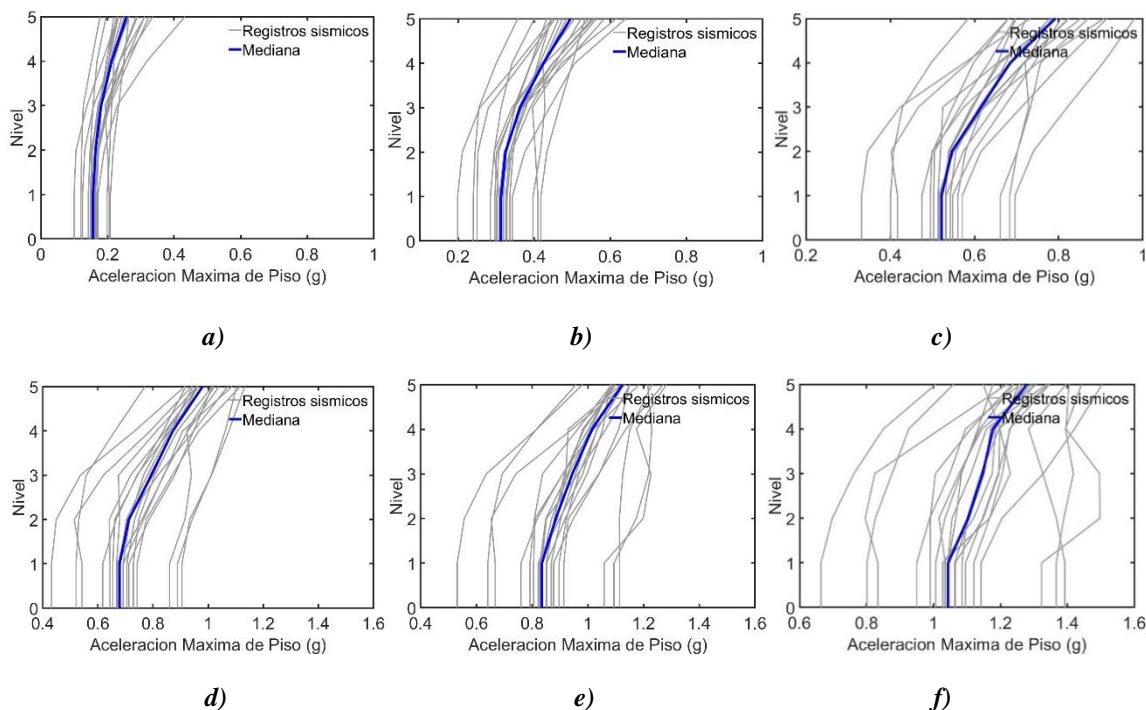


Figura 38. Aceleraciones de piso por nivel para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M5CPR.

Para M10CRP (Figura 39) se observa un comportamiento muy estable desde intensidades de 0.3g hasta 1.0g hasta el cuarto nivel. Posteriormente, la dispersión se mantiene constante en los niveles superiores, al igual que el aumento de las aceleraciones de piso, las cuales no superan 0.8g en estos casos. Sin embargo, a partir de 1.3g, se evidencia un ligero incremento en la dispersión en los primeros niveles, mientras que en los niveles 4 a 7 la dispersión es menor, pero aquí las aceleraciones de piso aumentan notablemente, pasando de 0.6g a 0.8g.

En los últimos niveles, las aceleraciones continúan aumentando gradualmente, al igual que las dispersiones. Cabe destacar que, en todas las intensidades, la mediana sigue un patrón similar crece de forma progresiva, se intensifica en los niveles intermedios de la estructura y se aumenta ligeramente en los niveles superiores. Nótese que, para las intensidades de 1.6g y 2.0g, el comportamiento se vuelve claramente no lineal.

Además, en el nivel 10, las aceleraciones superan 0.9g en algunos registros, y se aprecia una dispersión significativa entre los niveles 7 y 10, lo cual esta variabilidad no se presenta en los primeros niveles.

Por lo tanto, M10CRP muestra una transición más gradual hacia el comportamiento no lineal en comparación con M5CRP, pero con un patrón similar de incremento de aceleraciones en los últimos niveles bajo intensidades altas.

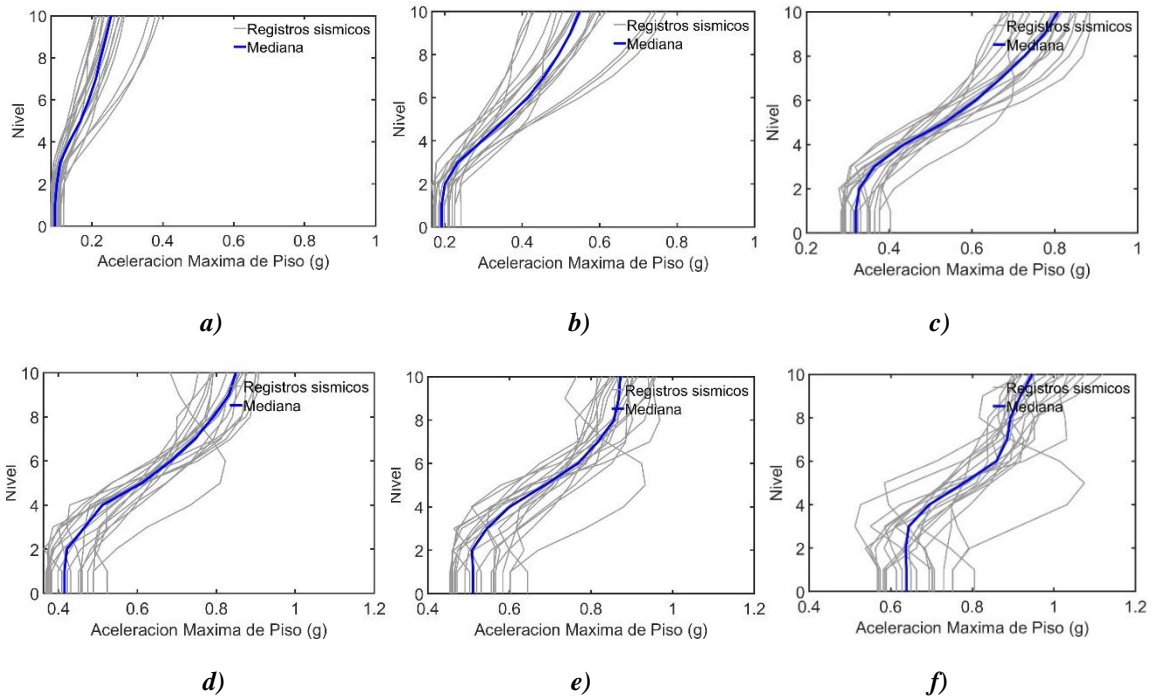


Figura 39. Aceleraciones de piso por nivel para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M10CRP.

En M15CRP (Figura 40) se observa que para intensidades de 0.3g, 0.6g y 1.0g se observa un crecimiento moderado de las aceleraciones desde la base hasta el nivel 15, con muy baja dispersión hasta el nivel 5 y aumentado hasta los niveles superiores. La aceleración máxima en el último nivel apenas supera los 0.6g, lo que indica que la estructura se mantiene en un rango elástico para estas intensidades.

Sin embargo, en la intensidad 1.3g este patrón se vuelve más evidente y la dispersión aumenta en todos los niveles, los registros amplían su dispersión de forma considerable a partir del nivel 8, con algunos alcanzando aceleraciones por encima de 0.6g en el último nivel, mientras los niveles inferiores aún se mantienen por debajo de 0.4g. A mayores intensidades de 1.6g y 2.0g, la dispersión y aceleraciones máximas se incrementa notablemente en los niveles superiores, donde se observan registros que superan los 0.6g en el nivel 15. Además, la pendiente de las curvas de mediana en los últimos niveles se vuelve más pronunciada y pierde linealidad indicando estar en el rango inelástico. Este comportamiento indica que, en estructuras más altas, el incremento de aceleraciones de piso y la dispersión se concentran principalmente en la parte superior del edificio conforme se incrementa la intensidad sísmica.

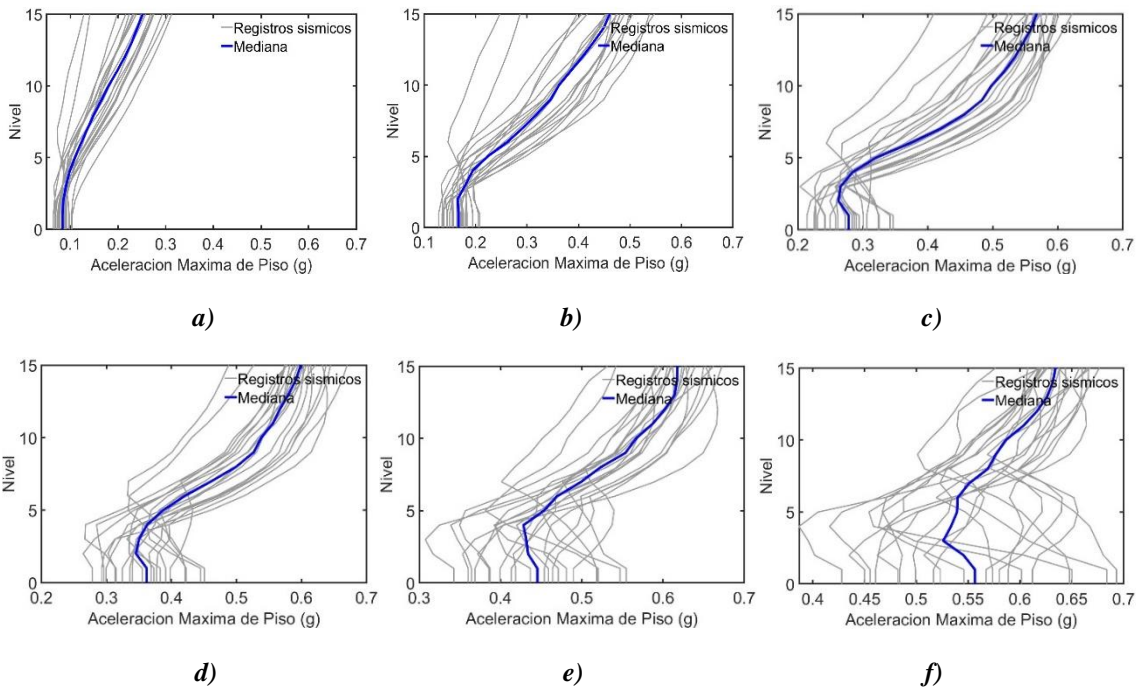


Figura 40. Aceleraciones de piso por nivel para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M15CRP.

4.1.3 Distorsiones de entrepiso

La distorsión de entrepiso es uno de los principales parámetros utilizados para evaluar el desempeño sísmico de una estructura. Se define como la diferencia de desplazamientos laterales entre dos niveles consecutivos dividida por la altura del entrepiso correspondiente. Este valor permite identificar concentraciones de deformaciones y posibles zonas críticas de daño, siendo fundamental tanto para evaluar el comportamiento estructural como para verificar el cumplimiento de los límites establecidos en normativas de diseño sismo-resistente.

Para la presente investigación, se adopta como límite normativo de distorsión el valor de 0.02 como se mencionó en los apartados anteriores de acuerdo a las NTCDS-2020.

En las figuras 41,42 y 43, se muestran los perfiles de distorsión máxima de entrepiso obtenidos para tres modelos estructurales de 5, 10 y 15 niveles de altura, respectivamente,

analizados mediante el procedimiento de análisis dinámico incrementales (IDAs) con 20 registros sísmicos y correspondiente a la intensidad $Sa(T_1)$.

El eje horizontal “X” representa la distorsión máxima de entrepiso, mientras que el eje vertical “Y” indica el número de nivel del edificio. Las líneas grises muestran los resultados individuales obtenidos de los 20 registros sísmicos por cada nivel de intensidad. La línea azul representa la mediana de la distorsión en cada nivel, y la línea roja punteada vertical señala el límite normativo de distorsión.

Las gráficas presentan los resultados para seis niveles representativos de intensidad sísmica: 0.3g, 0.6g, 1.0g, 1.3g, 1.6g y 2.0g.

En M5CRP (Figura 41) se observa que para intensidades bajas de 0.3g y 0.6g Las distorsiones se mantienen por debajo del límite de normativo, con valores máximos alrededor de 0.005–0.01. La respuesta estructural es prácticamente lineal y uniforme entre niveles. La variabilidad entre registros es baja y la mediana sigue un patrón suave.

Para la intensidad 1.0g comienzan a observarse distorsiones significativas, especialmente en los niveles medios; además, la mediana aumenta notablemente, lo que indica que la estructura está entrando en el rango inelástico.

A mayores intensidades como 1.3g a 1.6g algunos de los registros superan el límite normativo. La distorsión máxima se concentra en los niveles intermedios y superiores. La mediana indica una respuesta inelástica significativa y un posible daño estructural. La dispersión entre registros también aumenta, esto implica que la respuesta o comportamiento de una estructura frente a un sismo es menos predecible.

Para la intensidad de 2.0g se muestra que la estructura sobrepasa el límite normativo de 0.02 en casi todos los registros sísmicos entrando en el rango inelástico y posiblemente sufriendo daños a elementos estructurales.

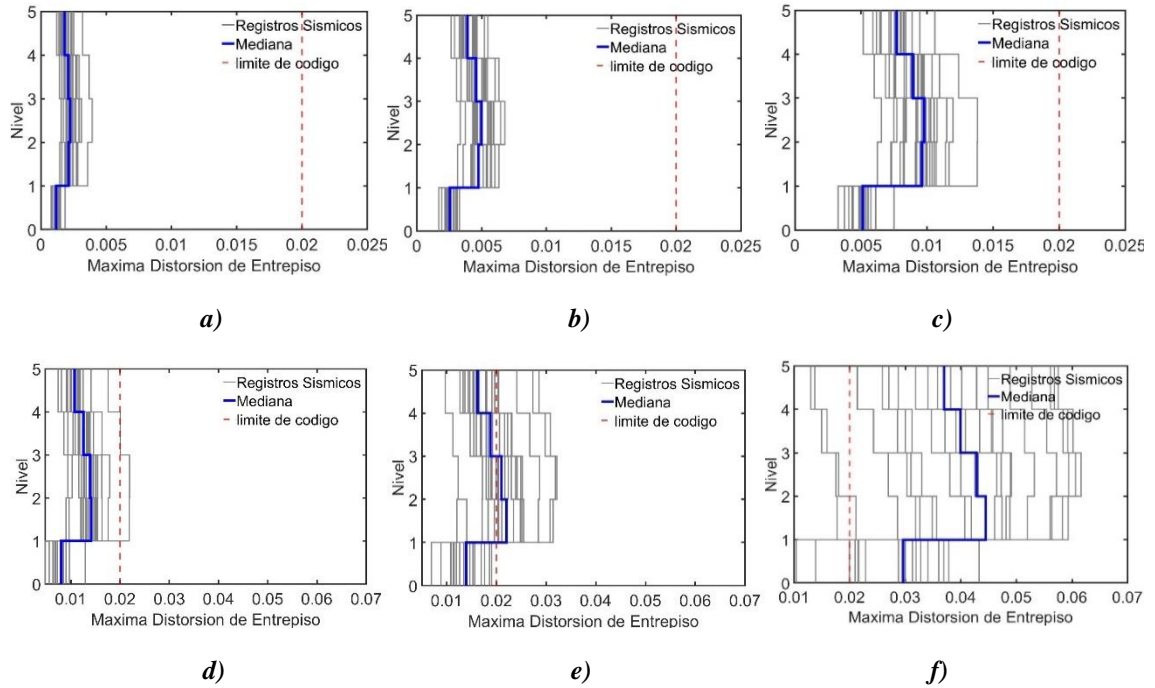


Figura 41. Distorsión de entrepiso para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M5CRP.

En M10CRP (Figura 42) podemos observar que para intensidades bajas de 0.3g y 0.6g al igual que en M5CRP, la distorsión permanece bajo el límite de normativo. El patrón de deformación es uniforme y la mediana es muy baja, lo que indica un comportamiento elástico. Para la intensidad de 1.0 g, comienzan a aparecer deformaciones significativas en los niveles medios; la mediana aumenta, aunque algunos registros aún se mantienen por debajo del límite normativo.

Para intensidades de 1.3g y 1.6g las distorsiones en niveles medios aumentan en algunos casos sobrepasando los límites normativos, la distorsión de la mediana continúa aumentando esto indica el posible comportamiento no lineal de la estructura y posible daño estructural.

En la intensidad de 2.0 g se aprecia claramente que la mediana pasa el límite normativo así como la mayoría de los registros entrando en la zona inelástica y con distorsiones muy grandes en niveles intermedios.

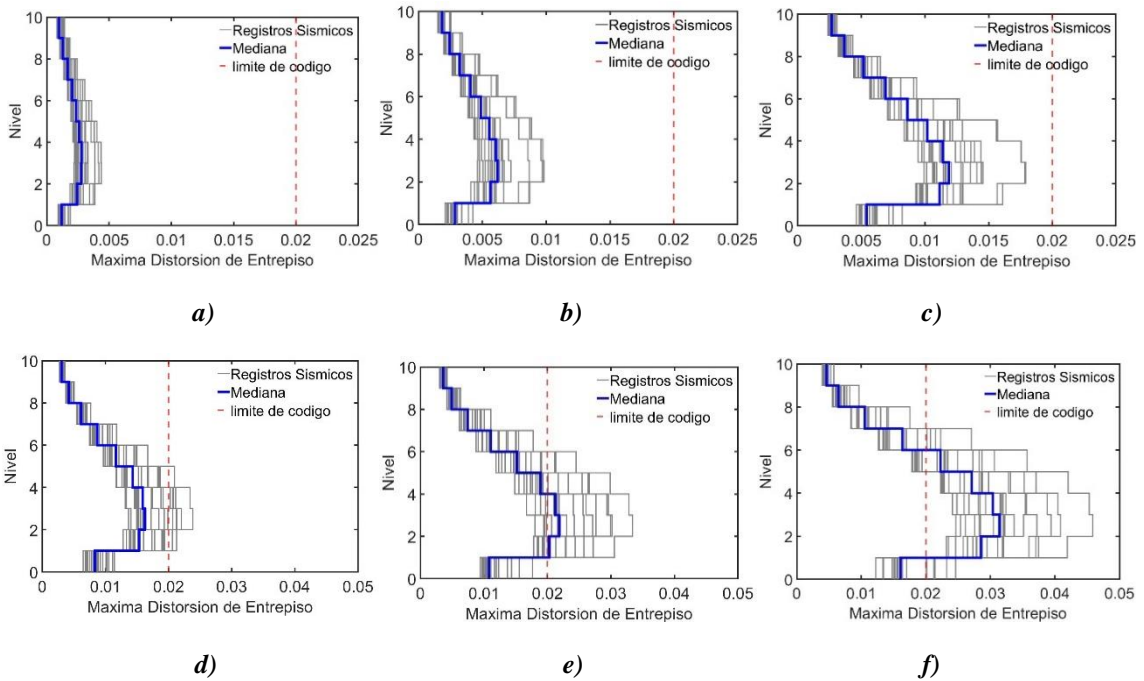
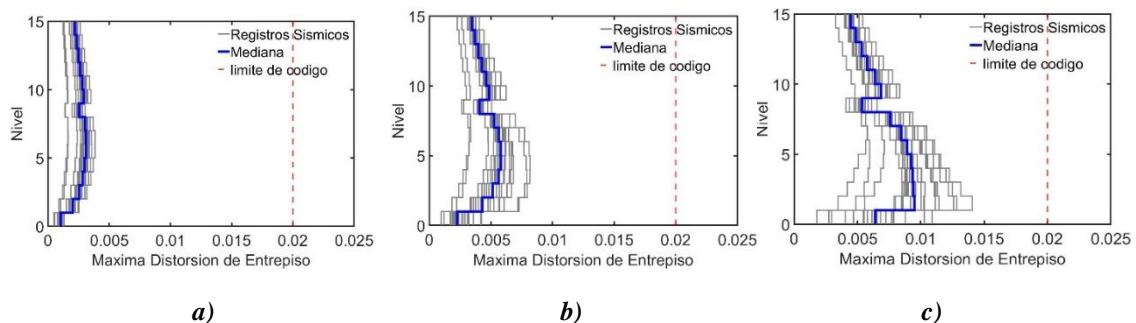


Figura 42. Distorsión de entrepiso para intensidades de a) 0.3g, b) 0.6g, c) 1.0g, d) 1.3g, e) 1.6g, f) 2.0g para M10CRP.

En M15CRP (Figura 43) se puede observar que las intensidades 0.3g, 0.6g y 1.0g se mantienen dentro del límite normativo, se aprecia que la mediana sigue un patrón casi lineal lo que indica que se mantiene en el rango elástico siendo en la intensidad 1.0g donde empieza a perder un poco ese patrón, pero manteniéndose dentro de la distorsión límite.

Para la intensidad de 1.3g las distorsiones son mayores en los niveles menores a 5 niveles y al aumentar la intensidad a 1.6 algunos registros superan la distorsión límite, pero su mediana sigue por debajo lo que indica que la estructura se comporta bastante estable a pesar de la intensidad y por último se puede ver que en la intensidad 2.0g la mediana y algunos registros pasan los límites de distorsión en los niveles 2 y 3.



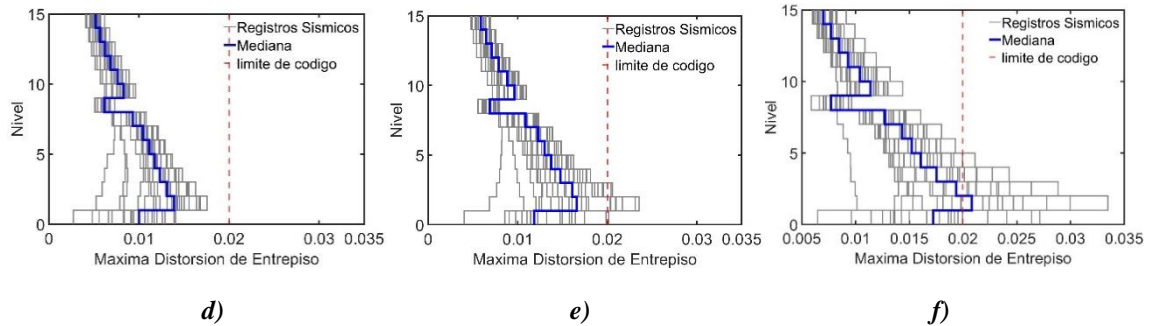


Figura 43. Distorsión de entrepiso para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M15CRP.

Se puede apreciar en los tres modelos que a medida que aumenta la intensidad sísmica, la dispersión asociada a las distorsiones de entrepiso aumenta, nótese que en M5CRP y M10CRP se tiene un comportamiento similar respecto a las distorsiones limite siendo que para la intensidad de 1.6g la mediana sobrepasa el límite permitido en los niveles 2 y 3 , pero en el modelo de 15 niveles a pesar de ser más alto la distorsión limite la sobrepasa hasta la intensidad 2.0g y en todos los casos las distorsiones máximas se presentan en los niveles 2 ,3 y 4.

4.1.4 Curvas de histéresis de los contravientos con restricción al pandeo (CRP) utilizando $Sa(T_1)$

El análisis de las curvas de histéresis de estos elementos permite evaluar su capacidad de disipación de energía y el nivel de degradación en sucesivos ciclos de carga. Este comportamiento influye directamente en las aceleraciones máximas de piso, ya que una mayor disipación tiende a suavizar la respuesta dinámica del edificio, especialmente en los niveles superiores. Asimismo, la presencia de CRP bien diseñados puede ayudar a controlar las distorsiones de entrepiso, reduciendo así el riesgo de daño estructural y contribuyendo al cumplimiento de los límites establecidos por los códigos de diseño sísmico.

En este apartado se presentan las curvas de histéresis obtenidas para los CRP en los distintos modelos analizados (ver en figuras 44, 45 y 46) lo cual permite verificar su desempeño bajo distintas intensidades de carga sísmica y su aporte en la mitigación de los efectos dinámicos en la estructura.

La Figura 44 correspondiente a M5CRP en el nivel 3 en dirección “X” fue donde mostro mayor distorsión la estructura, el CRP tiene un diseño de 40 Ton y en la primera gráfica, correspondiente a una intensidad de 0.3g, se observa el inicio del comportamiento histeréticos del CRP. Los ciclos son pequeños y reflejan un comportamiento predominantemente elástico, con mínima disipación de energía, lo cual es esperable en intensidades moderadas.

En la segunda gráfica, para una intensidad de 0.6g, los ciclos de carga y descarga se expanden de manera significativa, lo que indica que está iniciando en el rango inelástico también comienza a evidenciarse una mayor capacidad de disipación de energía.

En la tercera gráfica, bajo una intensidad de 1.0g, los ciclos de histéresis se vuelven más amplios y claramente definidos, donde podemos ver que llega a su máxima capacidad de 40 Ton. Esto demuestra que los CRP están trabajando como elementos disipadores, absorbiendo parte importante de la energía producida por el sismo, lo que contribuye a limitar las aceleraciones de piso y a controlar las distorsiones de entrepiso en la estructura.

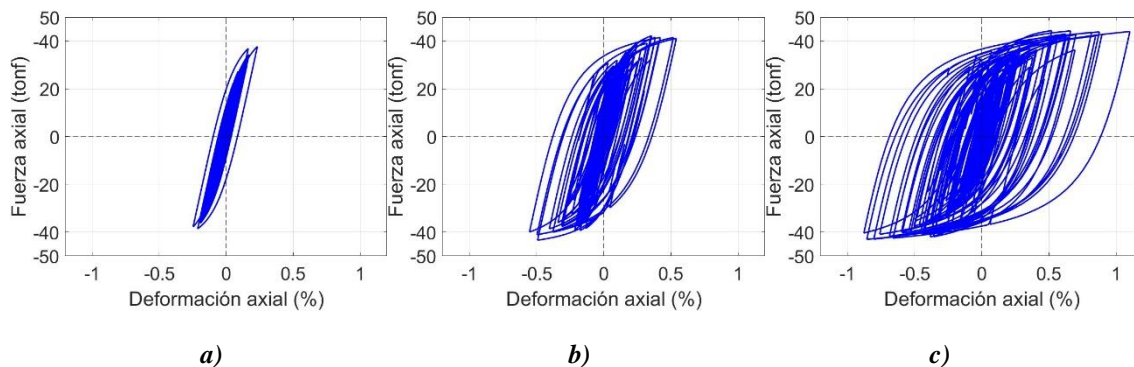


Figura 44. Curvas de Histéresis para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g para M5CRP.

La Figura 45 correspondiente a M10CRP en el nivel 3 en dirección “X” fue donde mostro mayor distorsión la estructura, el CRP tiene un diseño de 100 Ton y en la primera gráfica, muestra una tendencia similar al M5CRP, también se puede observar que para una intensidad de 0.3g los ciclos son pequeños y con una mínima disipación de energía por lo que el CRP todavía no llega a su máxima capacidad de diseño.

Para una intensidad de 0.6g, aumentan los ciclos de carga y descarga, así como la disipación de energía y por último en la intensidad 1.0g se muestra que tanto los ciclos de histéresis se amplían y son bien definidos esto nos indica que los CRP están cumpliendo su función de disipadore de energía.

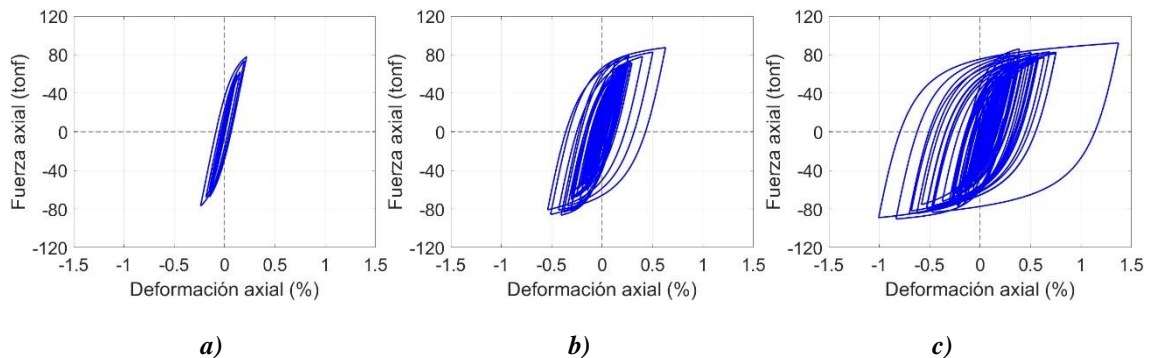


Figura 45. Curvas de Histéresis para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g para M10CRP.

La Figura 46 correspondiente a M15CRP en el nivel 6 en dirección “Y” fue donde mostro mayor distorsión la estructura, el CRP tiene un diseño de 220 Ton y en la primera gráfica, correspondiente a una intensidad de 0.3g, se observa que los ciclos histeréticos son más amplios debido a que el edificio es de mayor altura y necesito un CRP de mayor capacidad a los edificios anteriores, también se observa que a menor intensidad hay menor disipación de energía y sus ciclos de histéresis son menores y en aumento de la intensidad los ciclos toman una forma más definida indicando el correcto funcionamiento del sistema de disipación.

Estas curvas permiten verificar que los CRP en los modelos analizados mantienen una respuesta estable incluso ante demandas sísmicas crecientes, lo que valida su efectividad como mecanismo de control de daño y mejora del desempeño sísmico.

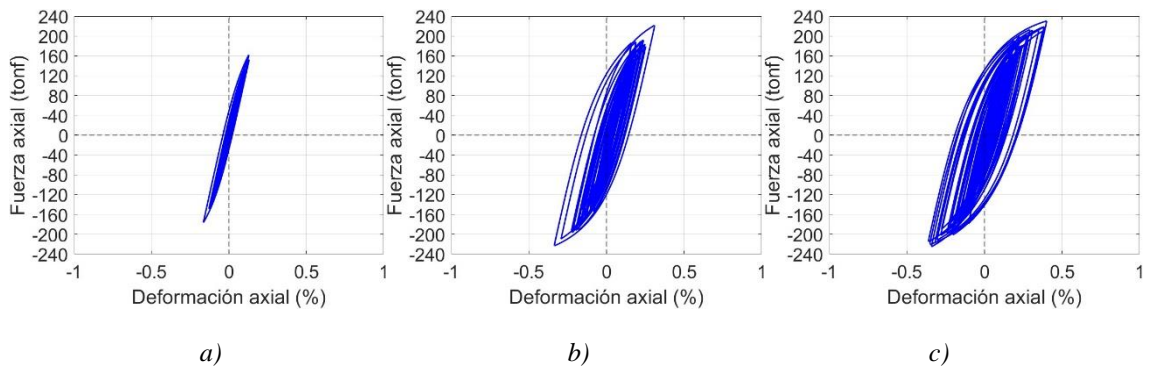


Figura 46. Distorsión de entrepiso para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g para M15CRP.

4.2 Resultados de los análisis dinámicos incrementales (IDAs) utilizando la medida de intensidad I_{Np}

4.2.1 Análisis dinámico incremental (IDAs)

En el presente estudio se llevó a cabo una comparación entre la medida de intensidad $Sa(T_1)$ y I_{Np} esto para evaluar la eficiencia de la respuesta sísmica en parámetros como distorsión de entrepiso y aceleración de piso. Como se comentó anteriormente la selección y escalamiento de la selección de registros sísmicos se realizó inicialmente en función de $Sa(T_1)$ y con el objetivo de comparar la eficiencia de la respuesta sísmica bajo diferentes medidas de intensidad, se utilizó la medida de intensidad I_{Np} , propuesta por Cordova [25] y extendida por Bojórquez y Iervolino [24], definida como la ecuación (Ec.7).

$$I_{Np} = Sa(T_1) \cdot N_p^\alpha \quad (7)$$

Donde $Sa(T_1)$ es la aceleración espectral en el período fundamental de la estructura, N_p representa un parámetro de demanda estructural y α exponente de ajuste que depende del tipo estructural y del nivel de daño (típicamente en el rango de 0.2 a 0.5, según Cordova [25], pero en esta investigación optaremos por utilizar $\alpha = 0.4$ a razón de los resultados obtenidos por Bojórquez y Iervolino [24] que han concluido que es el valor que minimiza la dispersión de esta medida de intensidad sísmica. Esta medida permite reducir la dispersión en la evaluación del desempeño estructural frente a sismos, al considerar tanto la severidad del movimiento como la respuesta inelástica de la estructura.

En las Figuras 47,48 y 49 se presentan las curvas de Intensidad-Respuesta (IDAs) obtenidas para diferentes modelos estructurales usando la medida de intensidad I_{Np} .

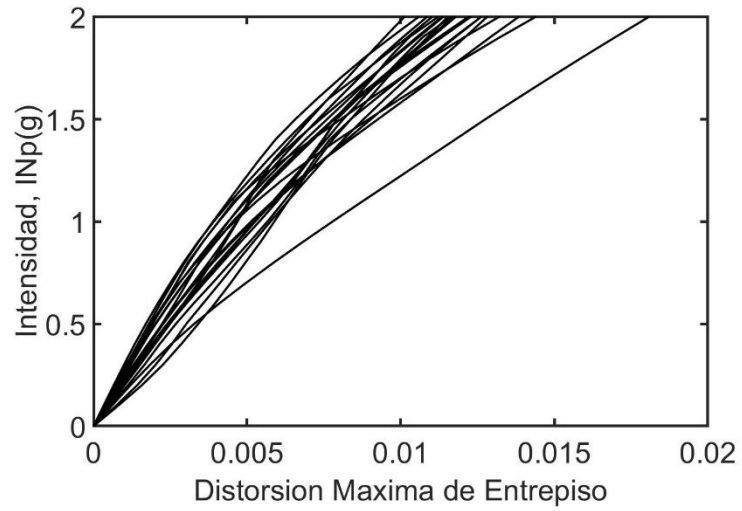


Figura 47. Análisis dinámicos incrementales para M5CRP.

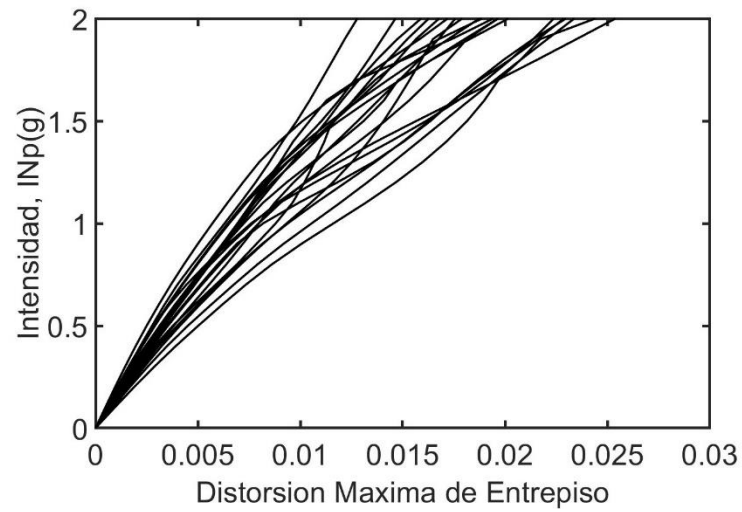


Figura 48. Análisis dinámicos incrementales para M10CRP.

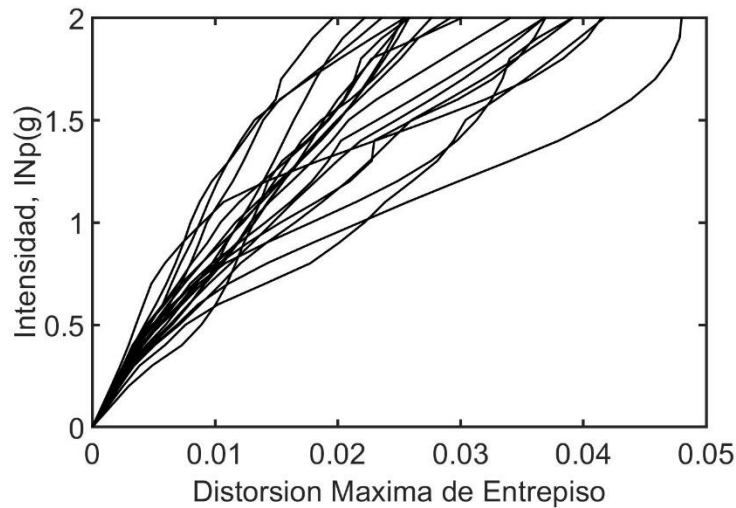


Figura 49. Análisis dinámicos incrementales para M15CRP.

En M5CRP (Figura 47) se observa un comportamiento casi lineal con muy poca dispersión y distorsiones de entrepiso relativamente bajas a medida que aumenta la intensidad la distorsión crece gradualmente, pero manteniéndose por debajo de los límites de distorsión respecto a la norma, por lo que podemos ver un buen comportamiento de la estructura bajo estas intensidades. Con respecto a M10CRP (Figura 48) se observa un poco más de dispersión a menor intensidades que M5CRP, pero manteniendo niveles bajos de distorsión siendo hasta a las intensidades mayores a 1.5 donde las distorsiones sobrepasan los límites normativos por lo que podemos apreciar que a medida que el edificio tiene mayor altura las distorsiones y dispersión se presentan de mayor manera. Finalmente, para M15CRP (Figura 49) se apreció una mayor distorsión en toda la gama de intensidades, así como distorsiones de entrepiso elevadas en comparación a M5CRP y M10CRP siendo que a intensidades menores a 1.0 se precia algunos registros que sobrepasan los límites normativos esto refleja que el edificio de mayor nivel tendría un comportamiento menos estable ante demandas sísmicas severas.

Al comparar los tres modelos, se observa que M5CRP presenta un control más eficiente de las distorsiones y una menor dispersión en las respuestas, lo que indica un desempeño más favorable frente a distintas demandas sísmicas. En el caso M10CRP, la respuesta muestra una mayor dispersión y distorsión lo que indica una probabilidad más alta al colapso, probablemente asociada a su mayor altura. Por su parte, M15CRP presenta un

comportamiento más inestable, alcanzando distorsiones máximas superiores a las registradas en los otros dos modelos.

4.2.2 Aceleraciones de piso

A partir de los resultados obtenidos en OpenSees, se extrajeron las aceleraciones absolutas máximas en cada nivel para cada combinación de registro sísmico e intensidad, los resultados se presentan en las gráficas de las aceleraciones de piso en las figuras 50, 51 y 52 para los tres edificios de estudio correspondientes a 5, 10 y 15 niveles, donde se relaciona la aceleración máxima registrada en cada nivel con la intensidad I_{Np} .

El eje horizontal “X” representa la aceleración máxima de piso, mientras que el eje vertical “Y” indica el número de nivel del edificio. Las líneas grises muestran los resultados individuales obtenidos de los 20 registros sísmicos por cada nivel de intensidad mientras que la línea azul indica la mediana de todos los registros para cada nivel.

Las gráficas presentan los resultados para seis niveles representativos de intensidad sísmica: 0.3g, 0.6g, 1.0g, 1.3g, 1.6g y 2.0g.

En M5CRP (Figura 50) se aprecia un comportamiento estable para intensidades de 0.3g hasta 1.0g, observándose muy poca dispersión y un crecimiento casi lineal de la mediana hasta el tercer nivel. Posteriormente, tanto las aceleraciones como la dispersión comienzan a intensificarse. A partir de intensidades de 1.3g a 2.0g, se observa una mayor dispersión y un incremento de las aceleraciones en los primeros niveles, aumentando conforme lo hace la intensidad. En estas intensidades, la mediana sigue aumentando con la altura, pero su curva se vuelve más pronunciada, alcanzando aceleraciones en azotea de 0.7g hasta 1.1g, lo que puede reflejar la aparición de efectos inelásticos. Nótese que en todos los casos las aceleraciones máximas ocurren a nivel a azotea.

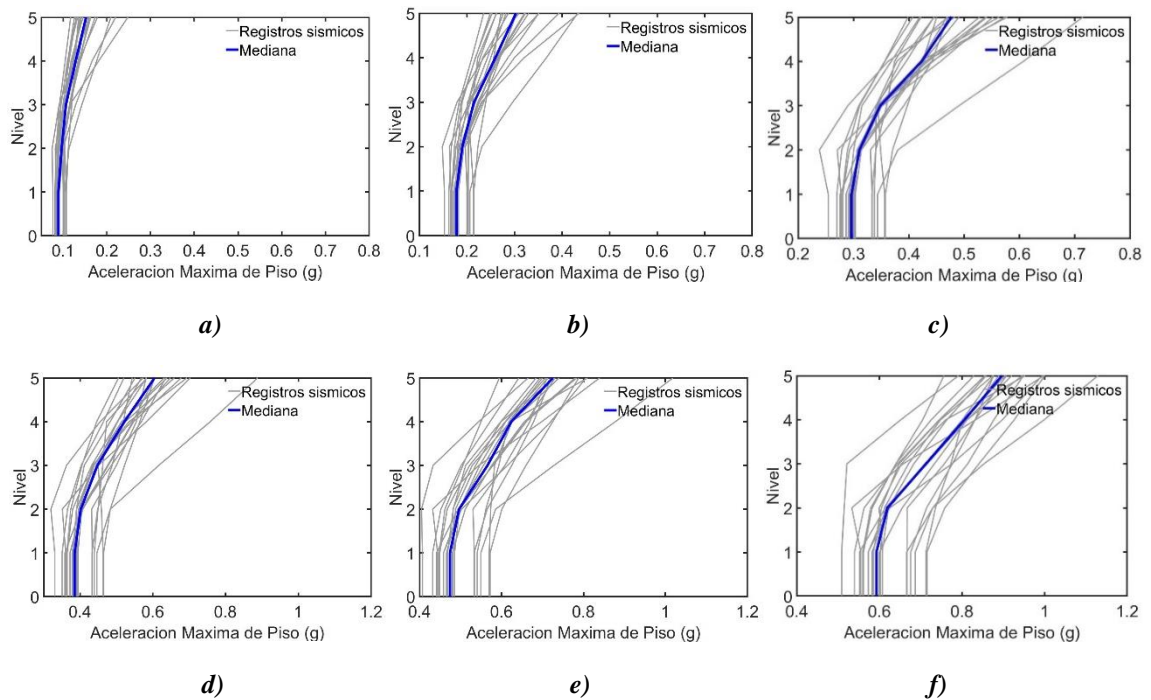


Figura 50. Aceleraciones de piso por nivel para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M5CRP.

En M10CRP (Figura 51) se observa que, para las primeras intensidades de 0.3g y 0.6g, hay poca dispersión, así como aceleraciones mínimas en los primeros niveles hasta el cuarto nivel, por lo que su mediana se mantiene casi lineal. Después del cuarto nivel, se empieza a presentar una mayor dispersión, así como un aumento constante de las aceleraciones, por lo que la mediana pierde la curvatura casi lineal que tenía en niveles inferiores y empieza a volverse irregular.

En la intensidad de 1.0g, se presentan dispersiones muy grandes y la mediana comienza a volverse irregular desde los pisos inferiores, lo que indica que se podría estar entrando en la zona inelástica. Esto se refleja en las intensidades de 1.3g a 2.0g, donde las aceleraciones aumentan de forma abrupta. En los primeros niveles, las aceleraciones aumentan y disminuyen drásticamente, mientras que en niveles superiores pierden totalmente el patrón constante que mostraban a intensidades menores.

Por lo tanto, podemos inferir que, a estas intensidades, la estructura entra en el rango inelástico y, al igual que en el modelo de 5 niveles, las aceleraciones máximas se concentran en el nivel de azotea.

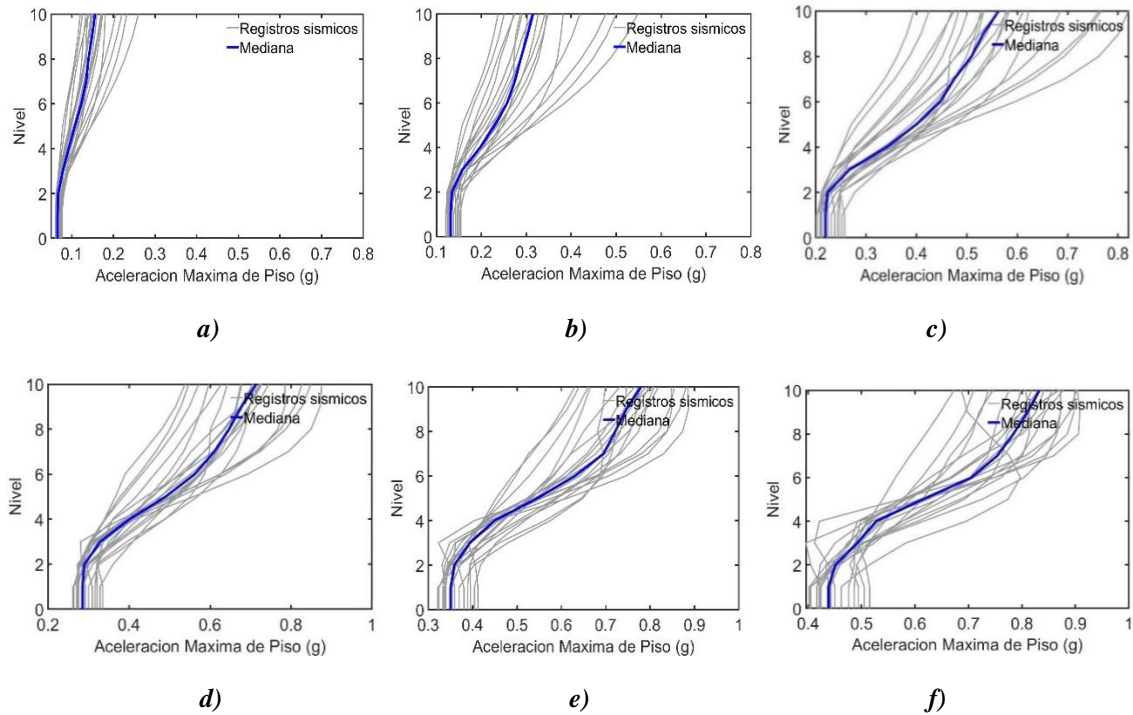


Figura 51. Aceleraciones de piso por nivel para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M10CRP.

En M15CRP (Figura 52) se observa que, para intensidades de 0.3 g y 0.6 g, existe poca dispersión y bajas aceleraciones en los primeros niveles, las cuales aumentan de manera constante con la altura, incrementándose también su dispersión. La mediana se mantiene casi lineal en los primeros tres niveles y, posteriormente, empieza a presentar curvatura conforme aumenta la altura. A partir de la intensidad de 1.0 g, se identifica un patrón más inestable en las aceleraciones, así como una mayor dispersión, notándose que las pendientes de las curvas de la mediana en los últimos niveles se vuelven más pronunciadas y pierden linealidad, lo que indica el inicio del comportamiento no lineal. Este comportamiento sugiere que, en estructuras más altas, el incremento de las aceleraciones de piso y de la dispersión se concentra principalmente en la parte superior del edificio conforme aumenta la intensidad sísmica.

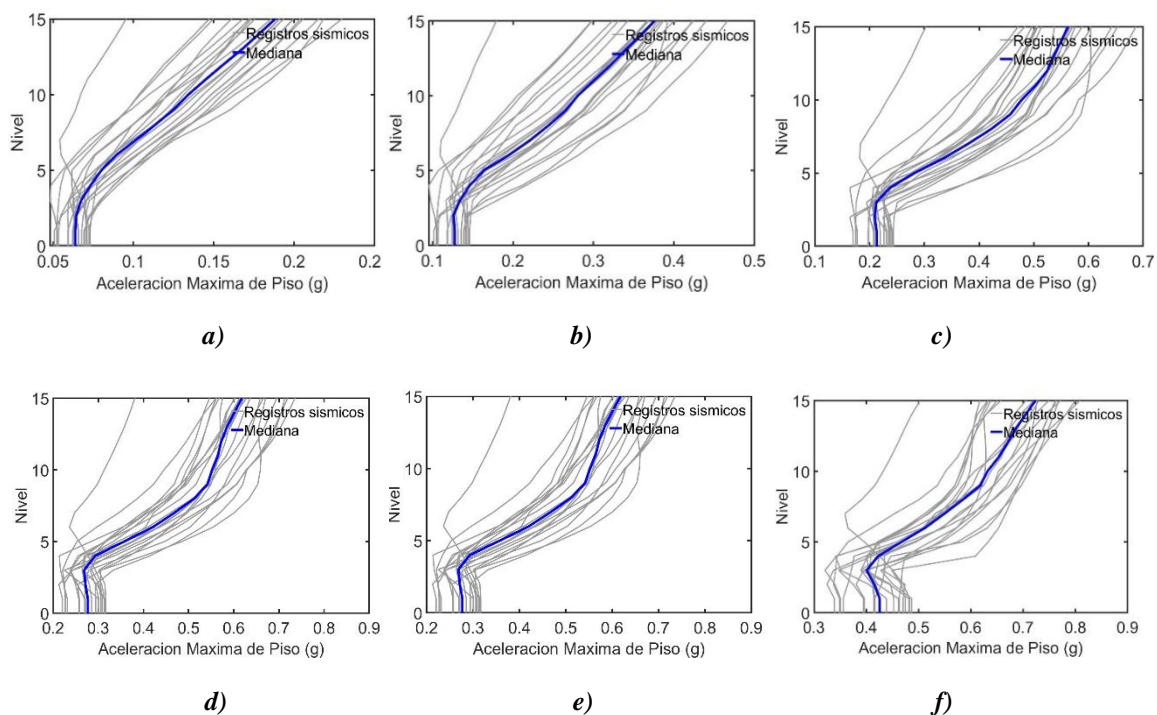


Figura 52. Aceleraciones de piso por nivel para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M15CRP.

4.2.3 Distorsiones de entrepiso

A partir de los resultados obtenidos en OpenSees, se extrajeron las distorsiones máximas de entrepiso para cada combinación de registro sísmico e intensidad, los resultados se presentan en las gráficas de las distorsiones de entrepiso en las figuras 53, 54 y 55 para los tres edificios de estudio correspondientes a 5, 10 y 15 niveles, donde se relaciona la distorsión máxima de entrepiso registrada en cada nivel correspondiente a la intensidad I_{Np} .

El eje horizontal “X” representa la distorsión máxima de entrepiso, mientras que el eje vertical “Y” indica el número de nivel del edificio. Las líneas grises muestran los resultados individuales obtenidos de los 20 registros sísmicos por cada nivel de intensidad mientras que la línea azul indica la mediana de todos los registros para cada nivel y la línea roja punteada el límite de normativo.

Las gráficas presentan los resultados para seis niveles representativos de intensidad sísmica: 0.3g, 0.6g, 1.0g, 1.3g, 1.6g y 2.0g.

En M5CRP (Figura 53) se observa que, para intensidades de 0.3 g, 0.6 g y 1.0 g, las distorsiones se mantienen por debajo del límite normativo, alcanzando valores máximos cercanos a 0.01, concentrándose principalmente en los niveles intermedios. A bajas intensidades, las distorsiones son reducidas y la mediana sigue un patrón suave, lo que refleja un comportamiento estable dentro de la zona elástico.

Para intensidades mayores, como 1.3 g, 1.6 g y 2.0 g, se aprecia una mayor dispersión en los resultados de las distorsiones máximas de entrepiso, aunque aún dentro de los límites normativos. Las distorsiones máximas continúan presentándose en los niveles intermedios, con valores que oscilan entre 0.01 y 0.018. En este rango, la mediana muestra cambios más drásticos entre pisos; sin embargo, la estructura todavía se mantiene en el rango elástico.

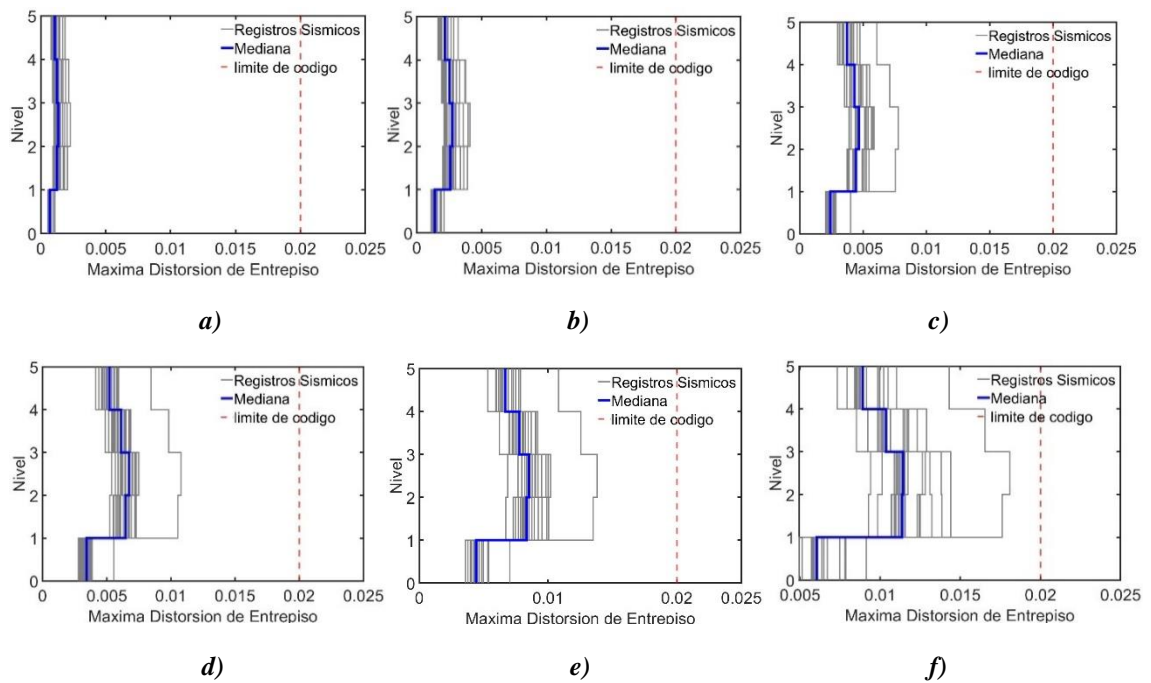


Figura 53. Distorsión de entrepiso para intensidades de a) 0.3g, b) 0.6g, c) 1.0g, d) 1.3g, e) 1.6g, f) 2.0g para M5CRP.

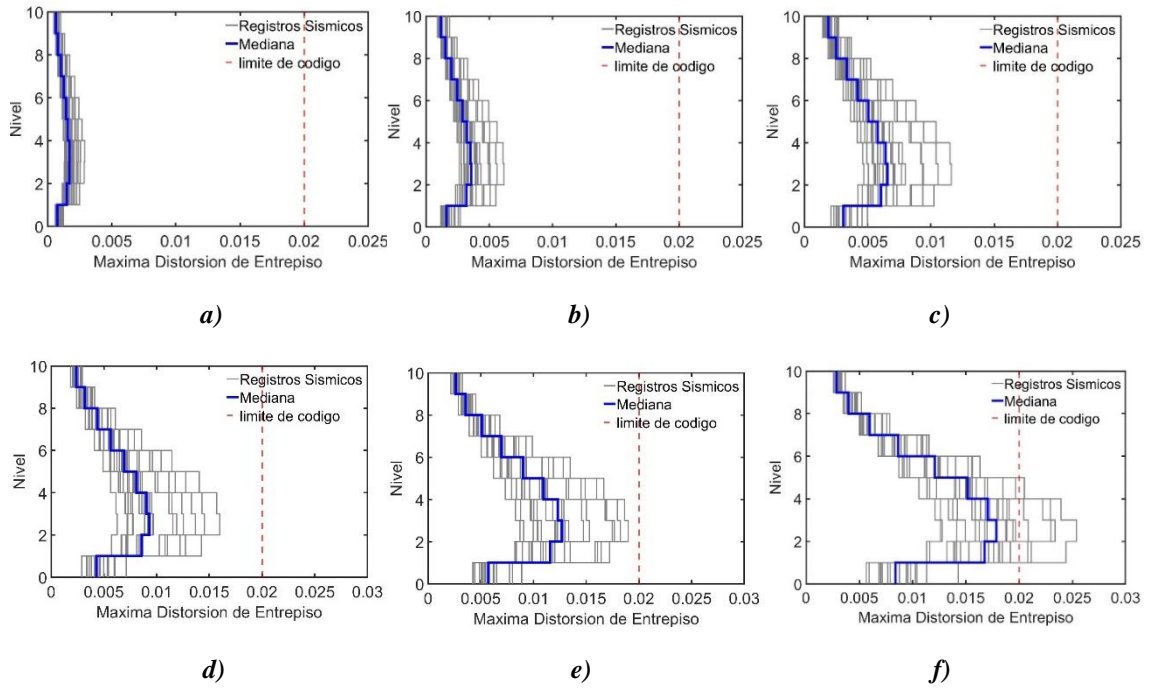


Figura 54. Distorsión de entrepiso para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M10CRP.

En M10CRP (Figura 54) podemos observar que para intensidades 0.3g a 0.6g las distorsiones son menores a 0.005 y las distorsiones máximas se presentan en los niveles 3 y 4 presentándose muy poca dispersión, la mediana presenta una forma suave y sin cambios abruptos.

Para las intensidades de 1.0g a 1.6g la dispersión aumenta y se puede notar de mayor manera en los niveles intermedios donde se presentan las distorsiones máximas llegando desde 0.01 hasta 0.018 manteniéndose dichos valores aún por debajo del límite normativo por lo que podemos asumir que hasta esta intensidad la estructura tiene un comportamiento estable y se encuentra dentro del rango elástico. Para la intensidad de 2.0g podemos apreciar que en algunos registros la distorsiones sobrepasan el límite normativo posiblemente entrando al rango inelástico pero su mediana aún se mantiene dentro de ese límite, nótese que en todas las intensidades las distorsiones máximas de entrepiso se intensifican en los niveles 3 y 4, por lo que en general este modelo también presenta un comportamiento estable bajo altas intensidades sísmicas.

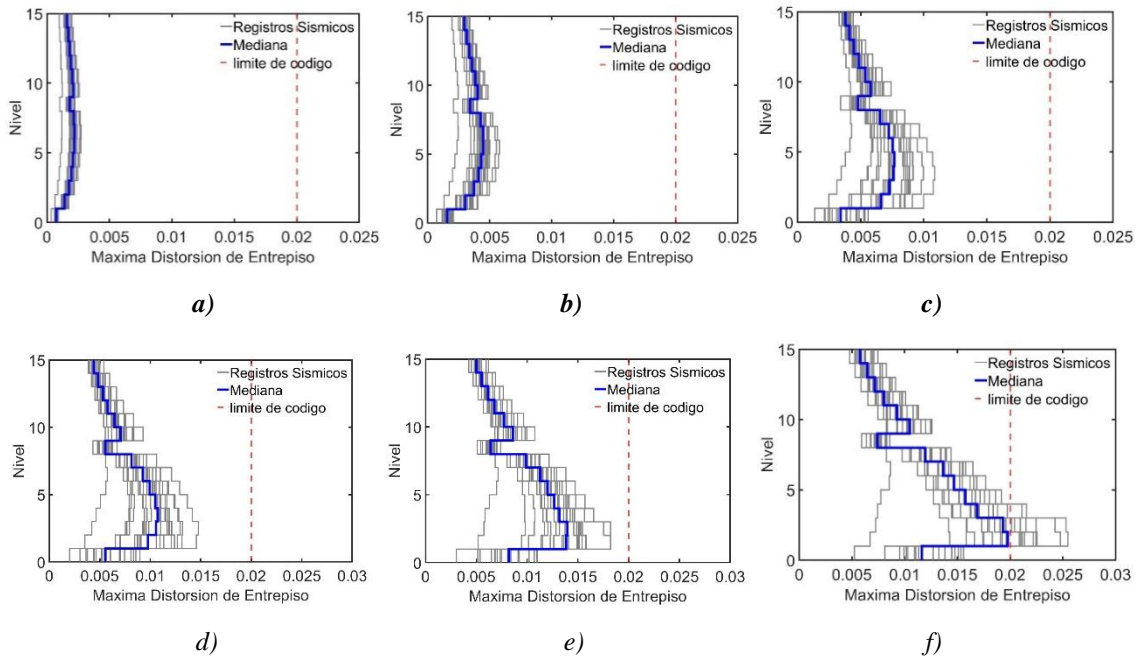


Figura 55. Distorsión de entrepiso para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g, d)1.3g, e)1.6g, f)2.0g para M15CRP.

En M15CRP (Figura 55) se aprecia que a intensidades bajas como 0.3g a 0.6g se obtiene baja dispersión con distorsiones que alcanzan hasta valores de 0.005 y se presentan las máximas distorsiones en los niveles 5 y 6 manteniéndose por debajo de las distorsiones límites permitidas, al aumentar la intensidad a 1.0g se muestra como empiezan a mostrar más dispersión en los resultados y llegando hasta 0.01 la distorsión, para intensidades de 1.3g y 1.6g la distorsión en los entrepisos aumenta concentrándose máximos en los niveles 3 y 4, la mediana ya genera algunos cambios abruptos en las distorsiones pero ninguna registro excede el límite normativo. Sin embargo, para la intensidad de 2.0g se observa como las distorsiones aumentan hasta ver algunos registros sobrepasar el límite normativo, también se observa una gran dispersión en los valores por lo que se puede notar que a esta intensidad probablemente el edificio está entrando en un rango inelástico lo que podría ocasionar daños estructurales e inestabilidad.

4.2.4 Curvas de histéresis de los contravientos restringidos al pandeo (CRP) utilizando I_{Np}

En este apartado se presentarán las curvas de histéresis obtenidas para los CRP en los distintos modelos analizados correspondientes a la medida de intensidad I_{Np} (ver figura 56, 57 y 58) esto con el objetivo de realizar la comparación de ambas medidas de intensidad y ver el comportamiento de bajo distintas intensidades de carga sísmica.

Las gráficas presentan los resultados para tres intensidades sísmicas: 0.3g, 0.6g, 1.0g, 1.3g, 1.6g y 2.0g, mostrando en el eje “X” la deformación axial y en el eje de las “Y” la fuerza Axial, las curvas de histéresis se representan con el color azul.

La Figura 56 corresponde a M5CRP en el nivel 3 en dirección “X” que fue donde mostros mayor distorsión la estructura, el CRP tiene un diseño de 40 Ton y en la primera gráfica, correspondiente a una intensidad de 0.3g, se observa el inicio del comportamiento histeréticos del CRP. Los ciclos son pequeños y reflejan un comportamiento predominantemente elástico, con mínima disipación de energía, lo cual es esperable en intensidades moderadas.

En la segunda gráfica, para una intensidad de 0.6g, los ciclos de carga y descarga se expanden de manera significativa, lo que significa mayor disipación de energía, pero sin llegar al límite de diseño del CRP.

Como podemos observar en la tercer grafica para la intensidad de 1.0g los ciclos de histéresis se vuelven más amplios y el CRP llego a su máxima capacidad de diseño por lo cual esos contravientos ya fluyeron alcanzando su máxima capacidad lo que indica que elementos estructurales como vigas y columnas empezaran a trabajar. Esto demuestra que los CRP están haciendo su función principal de servir como primera defensa bajo acciones sísmicas.

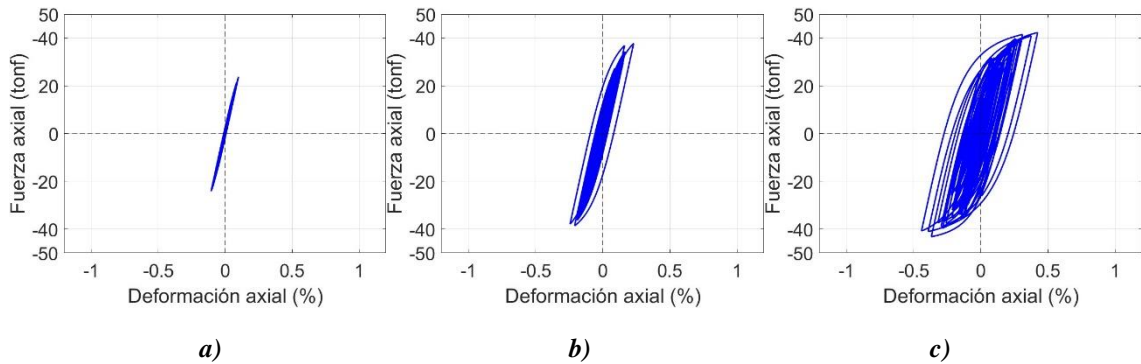


Figura 56. Curvas de Histéresis para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g para M5CRP.

La Figura 57 correspondiente a M10CRP en el nivel 3 en dirección “X” que fue donde mostros mayor distorsión la estructura, el CRP tiene un diseño de 100 Ton , se puede apreciar que para la intensidad de 0.3g el CRP ha disipado poca energía viéndose reflejada en los ciclos histeréticos que son muy amplios y la capacidad de carga alcanza casi las 40 Ton indicando que el CRP aún tiene más de un 50% de capacidad de carga, posteriormente en la intensidad de 0.6g se observa como los ciclos histeréticos son más amplios y definidos pero aún no llega al límite de diseño del CRP , por último en la intensidad de 1.0g podemos ver que el CRP lleo a un 90% de su capacidad de carga mostrando ciclos de histéresis totalmente definidos, por lo tanto a intensidades mayores podemos concluir que el CRP estará fluyendo totalmente.

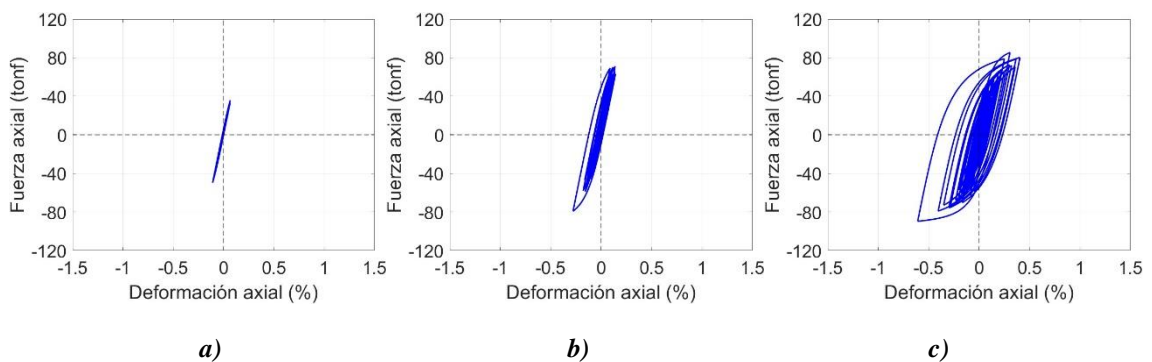


Figura 57. Curvas de Histéresis para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g para M10CRP.

En la Figura 58 correspondiente a M15CRP en el nivel 6 en dirección “Y” que fue donde mostros mayor distorsión la estructura, el CRP tiene un diseño de 220 Ton y en la primera

gráfica se muestra que para la intensidad 0.3g los ciclos de histéresis son pequeños y aun no llega a disipar energía de acuerdo a su diseño, en la segunda grafica podemos ver que para la intensidad de 0.6g los ciclos tienen mayor amplitud indicando una mayor disipación de energía casi llegando al límite de diseño del CRP, por último en la tercera grafica correspondiente a la intensidad de 1.0g se observa como los ciclos son más amplios y claramente más definidos llegando a superar la capacidad de diseño, por lo anterior podemos llegar a la conclusión de que en cada modelo los CRP actúan según lo esperado como la primera defensa antes las intensidades sísmicas, disipando una gran cantidad de energía.

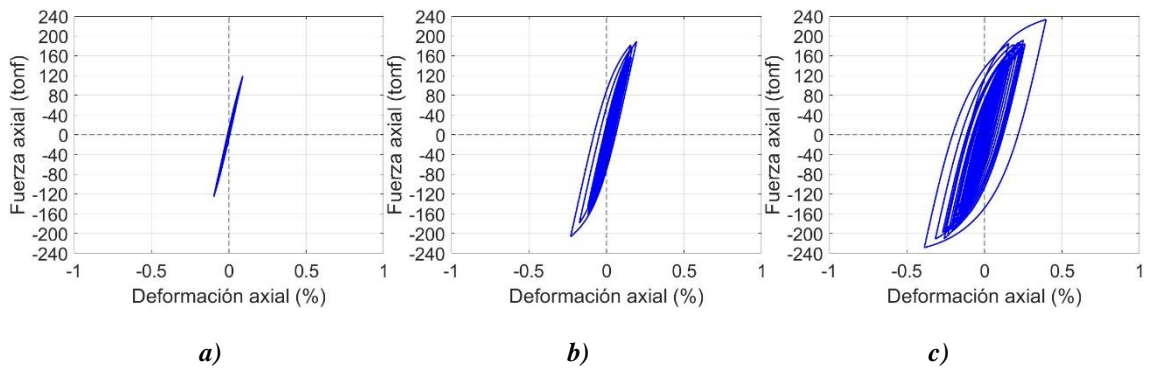


Figura 58. Curvas de Histéresis para intensidades de a) 0.3g, b)0.6g, c)1.0g para M15CRP.

4.3 Comparación de aceleración de piso y distorsión de entrepiso para las medidas de intensidad I_{Np} vs $Sa(T_1)$

A continuación, se presenta una comparación entre los parámetros de aceleración de piso y distorsión de entrepiso obtenidos a partir de las medidas de intensidad sísmica $Sa(T_1)$ e I_{Np} . El objetivo es evaluar cuál de las dos medidas de intensidad predice de mejor manera la respuesta sísmica de los edificios considerados.

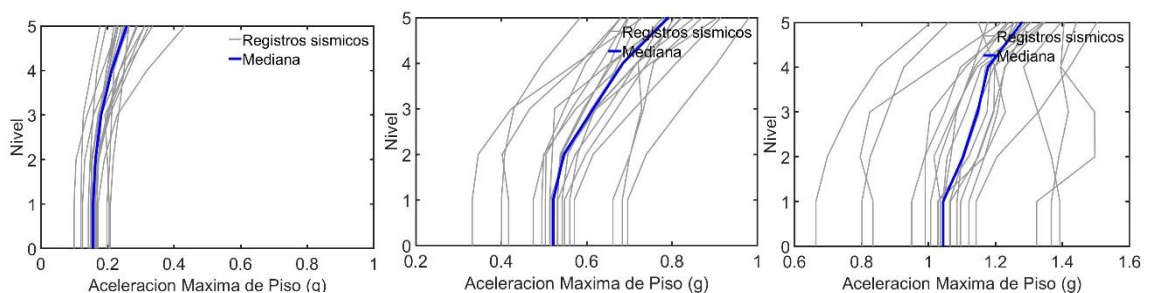
4.3.1 Comparación de aceleración de piso

En las figuras presentadas a continuación (figura 59, 60 y 61) se realiza las comparaciones de las medidas de intensidad $Sa(T_1)$ e I_{Np} , para M5CRP, M10CRP y M15CRP. Donde en el eje horizontal “X” representa la aceleración máxima de piso, mientras que el eje vertical “Y” indica el número de nivel del edificio. Las líneas grises muestran los resultados individuales

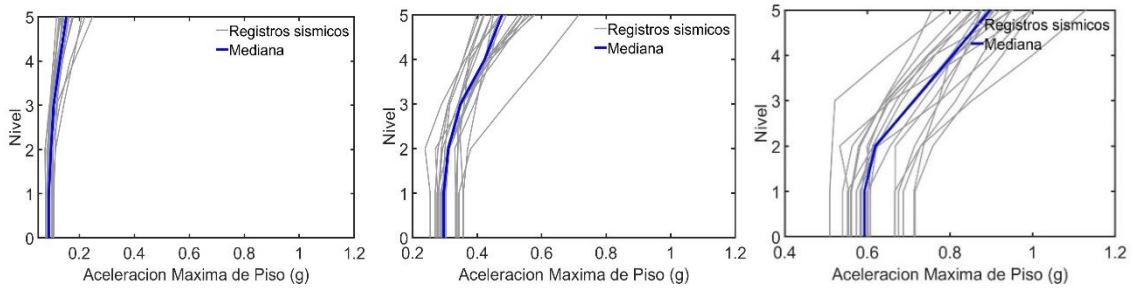
obtenidos de los 20 registros sísmicos por cada nivel de intensidad mientras que la línea azul indica la mediana de todos los registros para cada nivel. Las gráficas presentan los resultados para seis niveles representativos de intensidad sísmica: 0.3g, 1.0g, 2.0g.

Para M5CRP (Figura 59) los resultados muestran que, en general, las aceleraciones de piso presentan una tendencia creciente con la altura del edificio en ambos casos, siendo más pronunciadas conforme se incrementa la intensidad sísmica. Para intensidades bajas (0.3g), los valores obtenidos con $Sa(T_1)$ tienden a ser ligeramente mayores que los obtenidos con I_{Np} , aunque las diferencias no resultan significativas. Sin embargo, conforme aumenta la intensidad (1.0g y 2.0g), se observa que las aceleraciones estimadas a partir de $Sa(T_1)$ son consistentemente superiores a las obtenidas mediante I_{Np} , lo que indica que esta última medida proporciona resultados más precisos en intensidades altas.

Asimismo, la dispersión de los registros individuales es similar a baja intensidad, pero a medida que esta aumenta, se aprecia una diferencia considerable en los casos de 1.0g y 2.0g, siendo I_{Np} más preciso. Esto se debe a que, en intensidades mayores, los edificios entran en la zona inelástica, donde I_{Np} es un mejor predictor de la respuesta sísmica. Las medianas calculadas con I_{Np} muestran un comportamiento más uniforme y menor sensibilidad al incremento de la intensidad, en comparación con las obtenidas con $Sa(T_1)$. Esto sugiere que la medida de intensidad I_{Np} puede ofrecer mejores resultados en términos de aceleraciones de piso para intensidades sísmicas severas.



a) $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.



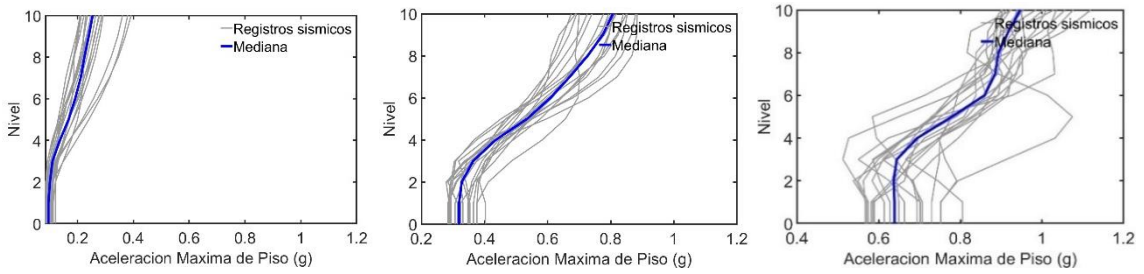
b) I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

Figura 59. Comparación de aceleraciones de piso para M5CRP, a) resultados con $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

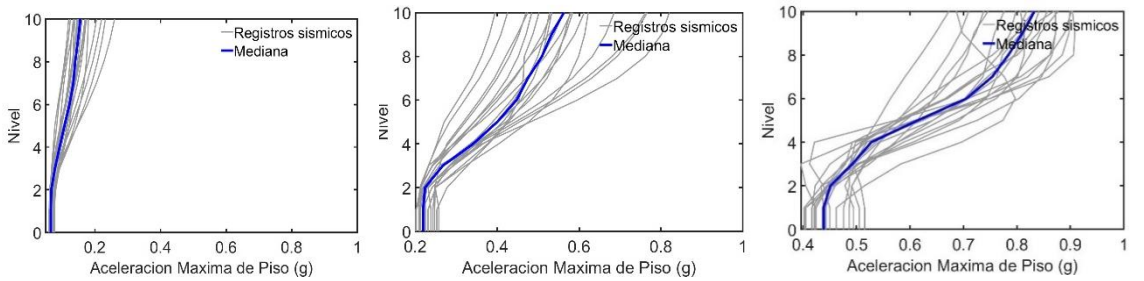
Para M10CRP (Figura 60), se observa que las aceleraciones de piso incrementan progresivamente con la altura del edificio en ambos casos, siendo este efecto más evidente a medida que aumenta la intensidad sísmica. Para intensidades bajas (0.3g), los resultados obtenidos con $Sa(T_1)$ y con I_{Np} muestran un comportamiento similar, con diferencias poco significativas en los valores de las aceleraciones.

No obstante, conforme la intensidad aumenta (1.0g y 2.0g), las aceleraciones derivadas de $Sa(T_1)$ resultan consistentemente mayores que las obtenidas con I_{Np} . Esto refleja que, bajo demandas sísmicas severas, $Sa(T_1)$ tiende a sobreestimar la respuesta en comparación con I_{Np} .

En cuanto a la dispersión, a baja intensidad esta es comparable en ambos casos; sin embargo, en intensidades intermedias y altas se aprecia que los registros con $Sa(T_1)$ presentan mayor variabilidad. Sin embargo, los resultados con I_{Np} muestran medianas más uniformes y menor sensibilidad al incremento de la intensidad. Lo anterior sugiere que I_{Np} proporciona una caracterización más estable y precisa de la respuesta sísmica en M10CRP, especialmente en el rango inelástico, donde se espera un desempeño más realista frente a movimientos sísmicos intensos.



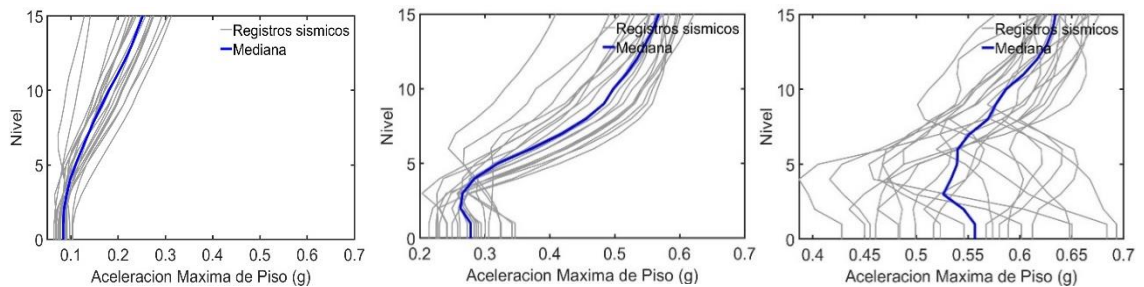
a) $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.



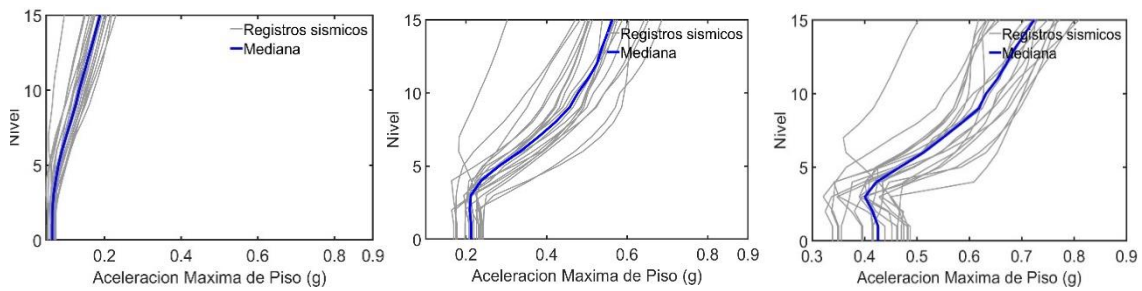
b) I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

Figura 60. Comparación de aceleraciones de piso para M10CRP, a) resultados con $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

Para M15CRP (Figura 61) se observa que a intensidades bajas (0.3g) las medidas de intensidad $Sa(T_1)$ y I_{Np} muestran resultados similares tanto en aceleración como en distorsión, para una intensidad intermedia (1.0g) podemos ver como ambas medidas de intensidad mantienen rango de aceleración similares, pero I_{Np} presenta menor dispersión a esa intensidad mostrando una mediana más uniforme y con menor sensibilidad al incremento de la intensidad.



a) $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.



b) I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

Figura 61. Comparación de aceleraciones de piso para M15CRP, a) resultados con $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

4.3.2 Comparación de distorsión de entrepiso

En las figuras presentadas a continuación (figura 62, 63 y 64) se realiza la comparación de distorsión de entrepiso de las medidas de intensidad $Sa(T_1)$ y I_{Np} , para M5CRP, M10CRP y M15CRP.

El eje horizontal “X” representa la distorsión máxima de entrepiso, mientras que el eje vertical “Y” indica el número de nivel del edificio. Las líneas grises muestran los resultados individuales obtenidos de los 20 registros sísmicos por cada nivel de intensidad. La línea azul representa la mediana de la distorsión en cada nivel, y la línea roja punteada vertical señala el límite normativo de distorsión.

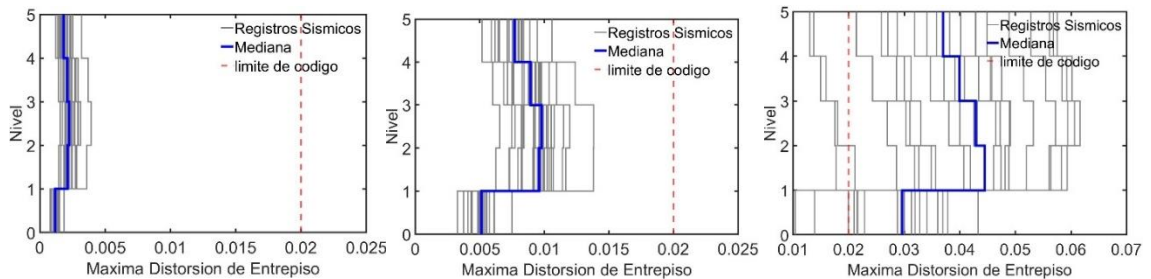
Las gráficas presentan los resultados para seis niveles representativos de intensidad sísmica: 0.3g, 1.0g, 2.0g.

Para M5CRP (Figura 62) los resultados indican que la distorsión máxima de entrepiso aumenta conforme se incrementa la intensidad sísmica, observándose diferencias relevantes entre $Sa(T_1)$ e I_{Np} . Para bajas intensidades (0.3g), tanto $Sa(T_1)$ como I_{Np} presentan valores de distorsión similares, además de una dispersión reducida, lo que evidencia un comportamiento estructural dentro del rango elástico y un desempeño satisfactorio.

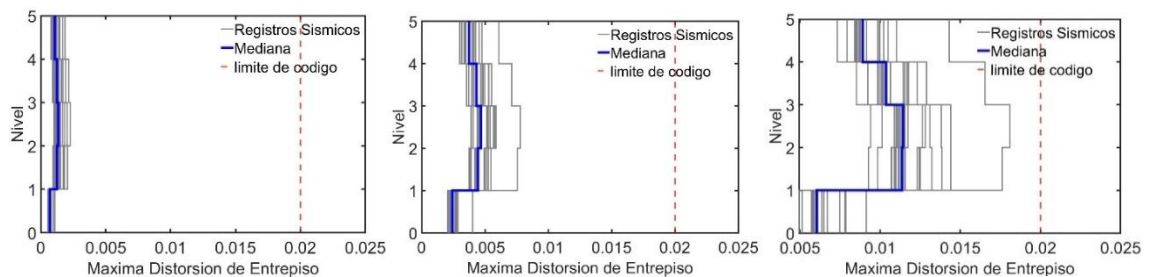
En intensidades intermedias (1.0g), ambas medidas de intensidad se mantienen por debajo del límite normativo donde se observa que $Sa(T_1)$ tiende a generar distorsiones mayores que I_{Np} , además de mostrar una dispersión más amplia entre los registros, lo cual refleja una menor

presión en la respuesta estructural ante demandas sísmicas intermedias. Por otra parte, I_{Np} mantiene valores ligeramente menores y una distorsión más controlada, sugiriendo una representación más estable del comportamiento del edificio.

Finalmente, en altas intensidades (2.0g), $Sa(T_1)$ tiende a superar los límites normativos de distorsión, indicando un comportamiento inelástico severo exhibiendo distorsiones significativamente más grandes y una mayor dispersión, mientras que I_{Np} conserva un patrón más uniforme y sigue dentro del límite normativo, mostrando que a intensidades altas donde la estructura entra en una zona inelástica es una medida de intensidad con mayor precisión.



a) $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.



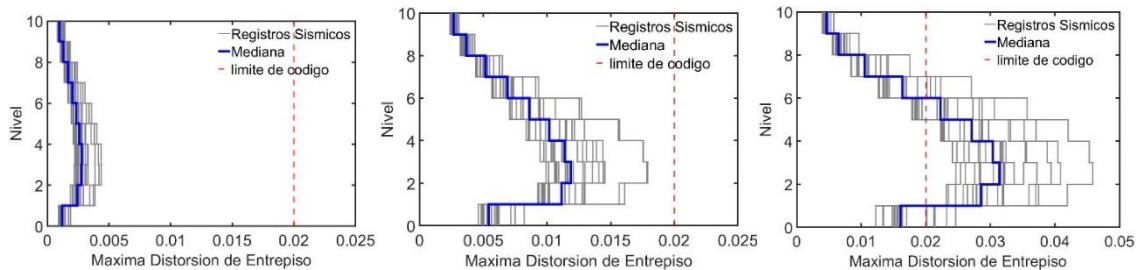
b) I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

Figura 62. Comparación de distorsión de entrepiso para M5CRP, a) resultados con $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

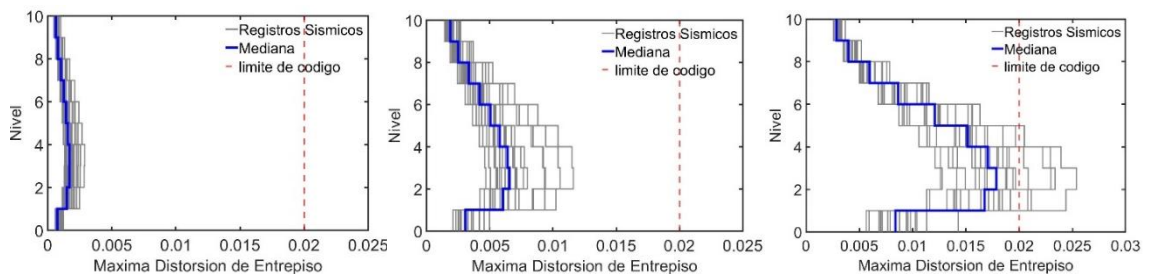
Para M10CRP (Figura 63) los resultados muestran que la distorsión máxima de entrepiso se incrementa conforme aumenta la intensidad sísmica, presentando diferencias notables entre $Sa(T_1)$ e I_{Np} . En bajas intensidades (0.3g), ambas medidas de intensidad presentan valores reducidos y similares de distorsión, con poca dispersión entre registros. Esto refleja un comportamiento estructural dentro del rango elástico y un desempeño adecuado frente a demandas sísmicas.

En intensidades intermedias (1.0g), tanto $Sa(T_1)$ como I_{Np} permanecen en valores menores al límite normativo; sin embargo, $Sa(T_1)$ tiende a presentar distorsiones ligeramente superiores y con mayor dispersión en comparación con I_{Np} . Este último presenta una mediana más estable y controlada.

En altas intensidades (2.0g), $Sa(T_1)$ supera el límite normativo de distorsión, mostrando un comportamiento inelástico severo y una mayor dispersión entre los registros. En cambio, I_{Np} mantiene valores más precisos donde solo algunos registros superan el límite normativo y su mediana se mantiene dentro del límite permitido, presentando menor dispersión, lo que resalta su capacidad de representar de forma más precisa el desempeño de la estructura.



a) $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.



b) I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

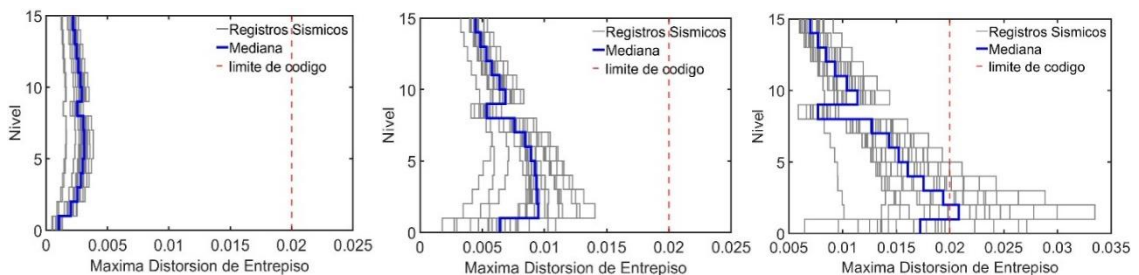
Figura 63. Comparación de distorsión de entrepiso para M10CRP, a) resultados con $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

Para M15CRP (Figura 64) los resultados muestran que la distorsión máxima de entrepiso aumenta progresivamente con la intensidad sísmica, evidenciando diferencias claras entre $Sa(T_1)$ e I_{Np} .

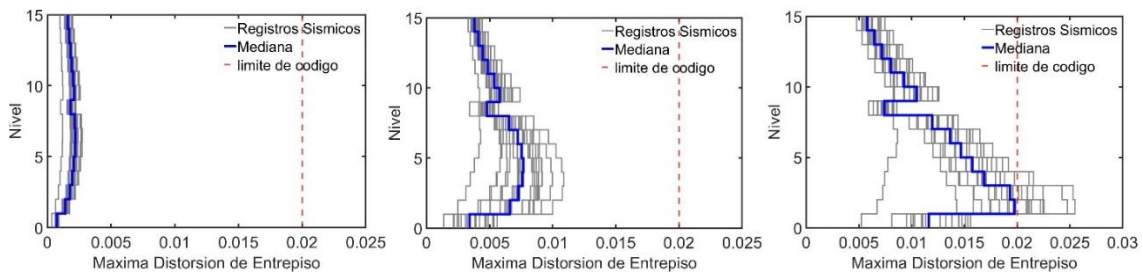
En bajas intensidades (0.3g), ambas medidas de intensidad presentan valores muy reducidos y presentando gran similitud, así como dispersión mínima entre los registros. Esto refleja un comportamiento estructural predominantemente elástico y un desempeño sísmico estable.

En intensidades intermedias (1.0g), tanto $Sa(T_1)$ como I_{Np} se mantienen en valores inferiores al límite normativo; donde $Sa(T_1)$ tiende a producir distorsiones ligeramente más elevadas y con mayor dispersión, mientras que I_{Np} conserva una mediana más estable y con menor dispersión, lo que evidencia una mejor capacidad de esta medida para predecir la respuesta sísmica.

En altas intensidades (2.0g), $Sa(T_1)$ presenta distorsiones significativamente más grandes en algunos registros, donde la mediana supera el límite normativo, mostrando además una dispersión considerable, lo que indica un comportamiento inelástico severo. Donde I_{Np} mantiene valores menos dispersos, donde solo algunos registros exceden el límite de normativo, mientras que la mediana permanece dentro o muy próxima a dicho límite, con una dispersión más controlada.



a) $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.



b) I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

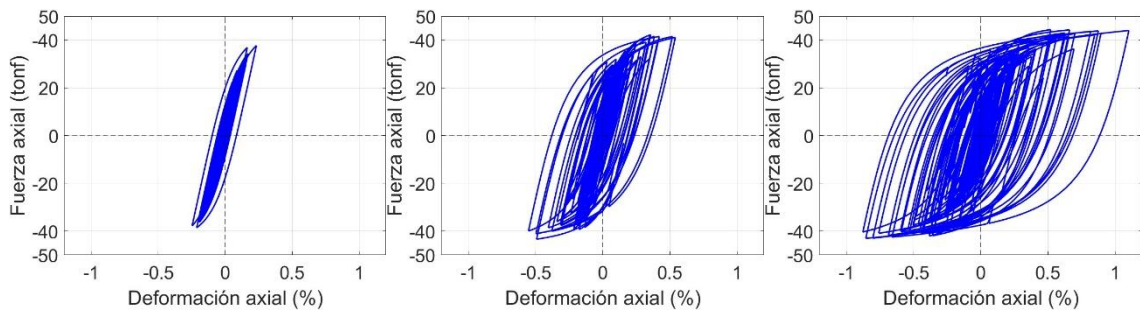
Figura 64. Comparación de distorsión de entrepiso para M15CRP, a) resultados con $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

En términos generales, la comparación entre $Sa(T_1)$ e I_{Np} revela que, aunque ambas medidas reflejan el incremento progresivo de la distorsión con la intensidad sísmica, I_{Np} proporciona una representación más precisa, estable y menos dispersa de la distorsión máxima de entrepiso, constituyéndose como una medida de intensidad más confiable para la evaluación del desempeño sísmico de edificios de baja y mediana altura sometidos a intensidades sísmicas severas.

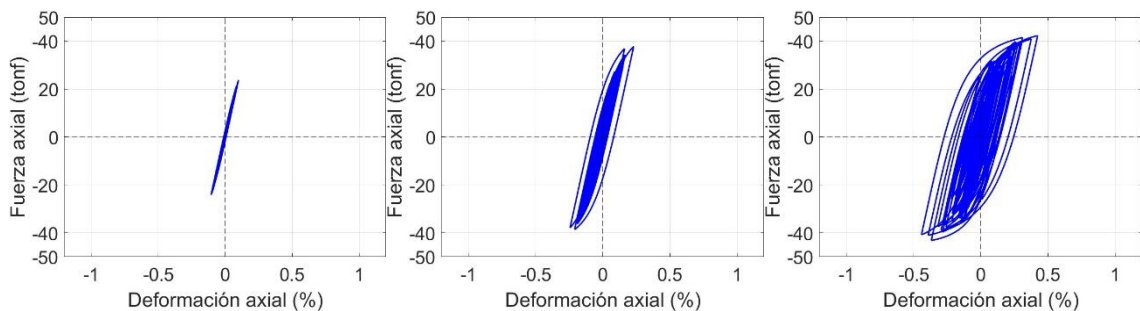
4.3.3 Comparación de curvas de histéresis de los contravientos con restricción al pandeo entre I_{Np} vs $Sa(T_1)$

Comparar las curvas de histéresis generadas con base en I_{Np} frente a las obtenidas mediante $Sa(T_1)$ permite determinar la eficacia de cada medida de intensidad sísmica para capturar la respuesta no lineal de los CRPs. A continuación, se muestran los resultados en las figuras 65, 66 y 67, correspondiente a M5CRP, M10CRP y M15CRP.

Para M5CRP (Figura 65) se presenta la comparación de las curvas de histéresis obtenidas, empleando las medidas de intensidad $Sa(T_1)$ e I_{Np} . Se observa que, a bajas intensidades 0.3g, ambos parámetros muestran un comportamiento prácticamente lineal con deformaciones reducidas y ciclos poco desarrollados, siendo en I_{Np} menores las amplitudes y las fuerzas axiales. Conforme la intensidad sísmica aumenta a 1.0g, las curvas presentan una respuesta no lineal más evidente, con formación de ciclos de histéresis amplios que reflejan una mayor capacidad de disipación de energía, aunque ambas graficas llegan al límite de diseño de 40 Ton, $Sa(T_1)$ muestra ciclos histéricos más dispersos. Para la intensidad máxima analizada 2.0g, $Sa(T_1)$ muestra ciclos más dispersos y con una amplitud mayor en comparación con I_{Np} , el cual mantiene una respuesta más consistente y concentrada.



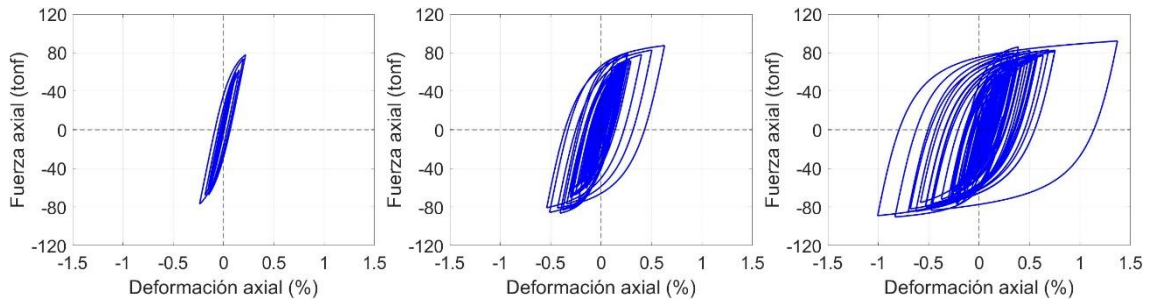
a) $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.



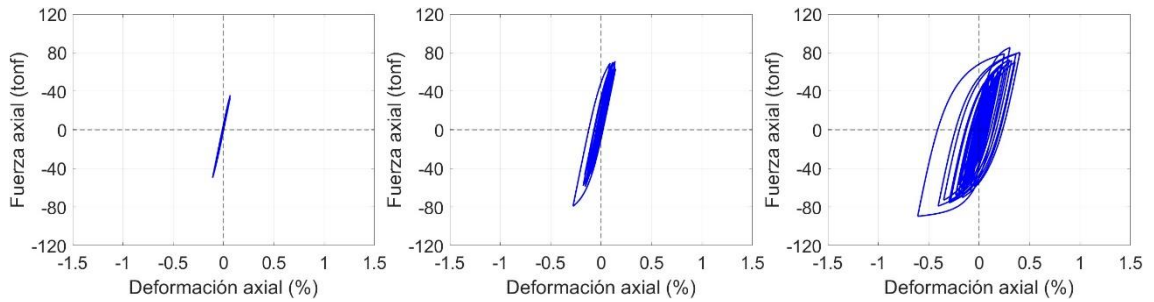
b) I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

Figura 65. Comparación de Curvas de Histéresis para M5CRP, a) resultados con $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

Para M10CRP (Figura 66) se puede observar que para la intensidad de 0.3g se presenta un comportamiento prácticamente lineal con deformaciones reducidas y ciclos poco desarrollados siendo en I_{Np} menor amplitud tanto al igual que fuerza axial muy similar a M5CRP, pero aun en ambos casos se mantiene por debajo del límite de diseño de 100 Ton. A medida que la intensidad sísmica aumenta a 1.0g, las curvas presentan una respuesta no lineal más evidente, con formación de ciclos de histéresis amplios que reflejan una mayor capacidad de disipación de energía, siendo en el caso de $Sa(T_1)$ donde el CRP casi alcanza su límite de diseño. Para la intensidad máxima analizada 2.0g, $Sa(T_1)$ muestra ciclos más dispersos y con una amplitud mayor en comparación con I_{Np} , el cual mantiene una respuesta más consistente y concentrada, además podemos observar que para I_{Np} el CRP aun no llega al límite de diseño en comparación de $Sa(T_1)$ donde sobrepasa ya ese límite.

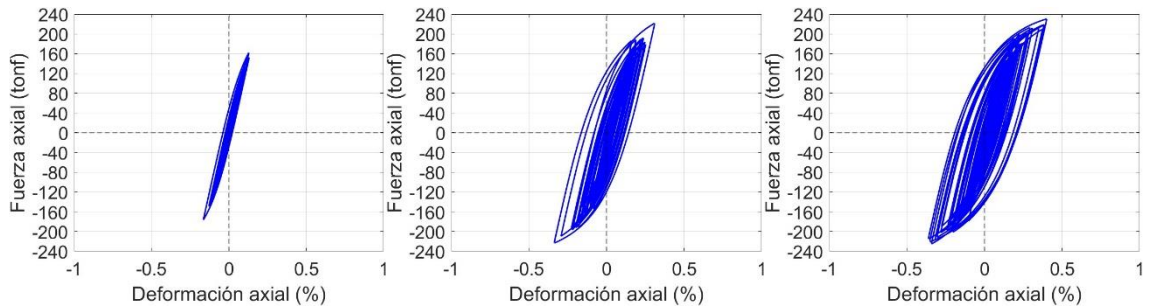


a) $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

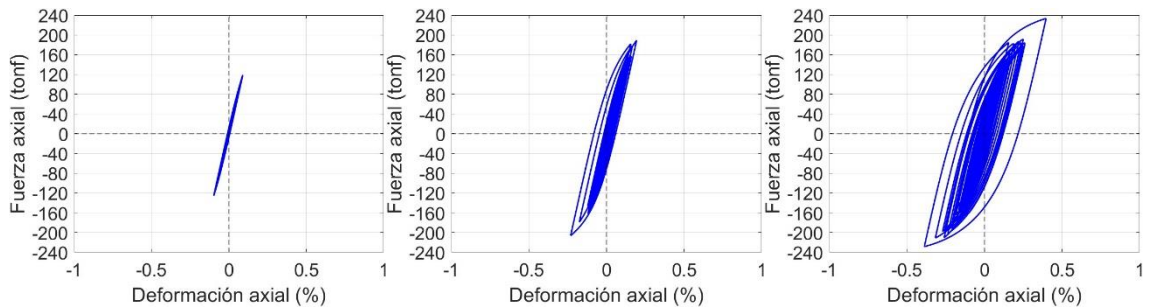


b) I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

Figura 66. Comparación de Curvas de Histéresis para M10CRP, a) resultados con $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.



a) $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.



b) I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

Figura 67. Comparación de Curvas de Histéresis para M15CRP, a) resultados con $Sa(T_1)$ para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g; b) resultados con I_{Np} para intensidades de 0.3g, 1.0g y 2.0g.

Por último para M15CRP (Figura 67) se puede observar como para intensidades bajas 0.3g los ciclos histéricos son muy pequeños y casi lineales lo que indica poca disipación de energía además de que el contraviento diseñado para 220 Ton no llega a su máximo funcionamiento tanto para $Sa(T_1)$ como I_{Np} , al aumentar la intensidad podemos ver que para ambas medidas de intensidad sus graficas histéricas son bastantes similares tanto en la amplitud de los ciclos histéricos como en fuerza axial indicando una mayor disipación de energía. Por último, para la intensidad de 2.0g podemos ver graficas casi idénticas sin embargo I_{Np} muestra una mejor respuesta a presentar ciclos menos dispersos y claramente definidos.

Estos resultados indican que I_{Np} proporciona una representación más estable del comportamiento no lineal de los CRPs bajo demandas sísmicas crecientes, mientras que $Sa(T_1)$ tiende a presentar mayor dispersión en intensidades elevadas.

4.4 Análisis de eficiencia I_{Np} vs $Sa(T_1)$

En esta sección se lleva a cabo el análisis de eficiencia de las medidas de intensidad $Sa(T_1)$ y I_{Np} a partir de los registros de aceleración absoluta y distorsiones de entrepiso obtenidos de los análisis dinámicos incrementales, donde para cada medida de intensidad se realizó su escalamiento correspondiente, se calcularon parámetros estadísticos como la mediana para asegurar una mejor caracterización del comportamiento estructural promedio y la desviación estándar que refleja mayor consistencia en la predicción de demandas estructurales, la eficiencia de una medida de intensidad sísmica es su capacidad de proporcionar una estimación más precisa y confiable de la respuesta estructural en una estructura bajo acciones sísmicas.

4.4.1 Aceleración de piso

En las figuras 68, 69 y 70 se muestran los resultados obtenidos para M5CRP , M10CRP y M15CRP en términos de aceleración absoluta donde en el eje “X” se muestra la mediana normalizada en términos de gravedad (g) y en el eje vertical “Y” se representa la desviación estándar, denotada por el símbolo σ , la cual cuantifica la dispersión de los valores de

aceleración normalizados en términos de g respecto a la mediana, donde la medida de intensidad $Sa(T_1)$ se representa de color Azul y la medida de intensidad I_{Np} de color naranja.

Para M5CRP (Figura 68) Se observa que para un valor medio se aceleración máxima de piso menor que 0.5g ambas medidas presentan niveles de dispersión similares, sin embargo, I_{Np} muestra valores de desviación estándar que son consistentemente menores que $Sa(T_1)$, indicando una mayor estabilidad en la representación de la respuesta estructural en este rango. Conforme la aceleración de piso aumenta, la tendencia general refleja una disminución en la dispersión, hasta alcanzar valores mínimos alrededor de 1.0g, donde nuevamente se aprecia que I_{Np} mantiene un comportamiento más concentrado y uniforme en comparación con $Sa(T_1)$. En aceleraciones mayores, $Sa(T_1)$ tiende a presentar un incremento de la desviación estándar, lo que evidencia una mayor dispersión en los registros y, por ende, una menor eficiencia para caracterizar la respuesta estructural bajo demandas sísmicas severas. En contraste, I_{Np} conserva valores más reducidos de dispersión, mostrando una mejor respuesta sísmica.

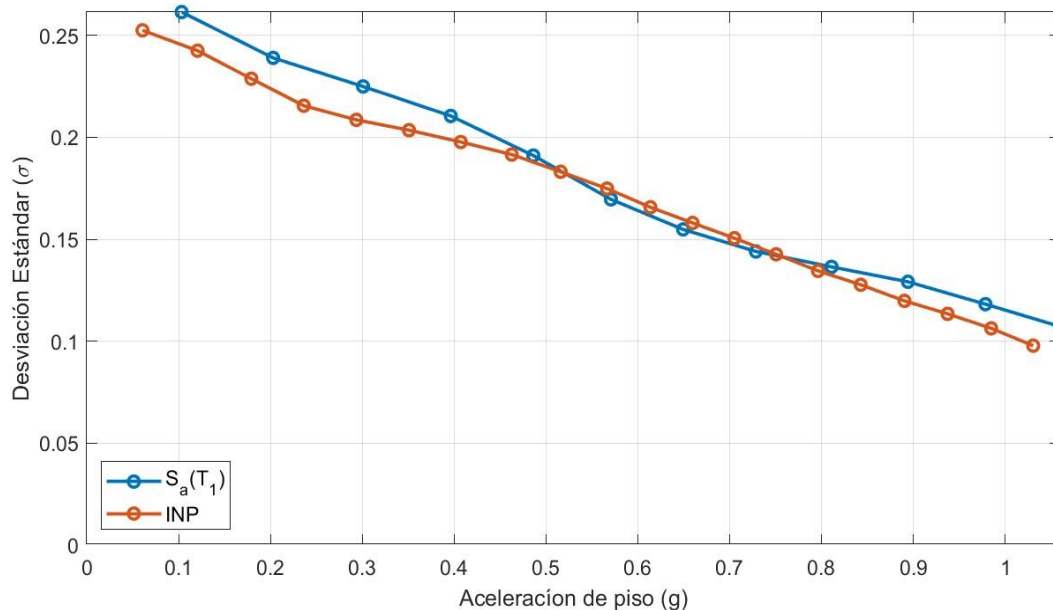


Figura 68. Mediana de la aceleración de piso vs desviación estándar para M5CRP.

Para M10CRP (Figura 69) se muestra la relación entre la desviación estándar y aceleración de piso para las medidas de intensidad $Sa(T_1)$ e I_{Np} . Se observa que, en general, los valores

de la desviación estándar son mayores para $Sa(T_1)$ en comparación con I_{Np} a lo largo de la mayoría del rango de intensidades. En aceleraciones bajas menores a 0.5g, ambas medidas presentan una variabilidad relativamente constante, aunque ligeramente más alta en $Sa(T_1)$. Conforme las aceleraciones aumentan de 0.5g hasta 0.7g, la dispersión disminuye de manera significativa en ambos casos, alcanzando los valores mínimos cercanos a 0.75g. Posteriormente, en $Sa(T_1)$ se aprecia un ligero incremento de la dispersión en intensidades mayores. Estos resultados muestran que la medida de intensidad I_{Np} presenta menor dispersión que $Sa(T_1)$, lo que indica un comportamiento sísmico más eficiente frente a distintas intensidades sísmicas.

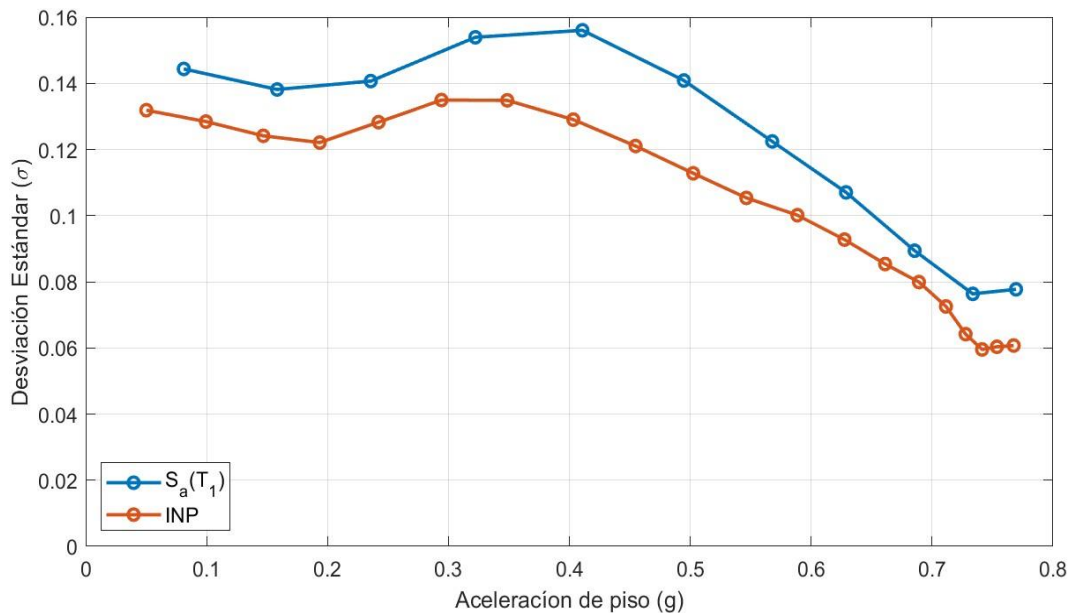


Figura 69. Mediana de la aceleración de piso vs desviación estándar para M10CRP.

Para M15CRP (Figura 70) se observa que en general, la desviación estándar asociada a I_{Np} es consistentemente menor en comparación con $Sa(T_1)$, lo cual refleja una menor dispersión en los resultados al utilizar dicha medida. Particularmente para intensidades entre 0.35 g y 0.40 g, ambas medidas muestran una reducción notable en la dispersión, sin embargo, I_{Np} alcanza valores más bajos, evidenciando un mejor desempeño estadístico. Estos resultados sugieren que I_{Np} proporciona una medida más estable y confiable frente a $Sa(T_1)$ para caracterizar la respuesta estructural en el rango de intensidades analizado.

En términos generales, el análisis de eficiencia evidencia que independientemente del número de niveles de la estructura ambas medidas capturan adecuadamente la relación entre la intensidad sísmica y la respuesta estructural, pero I_{Np} ofrece una representación más eficiente, al reducir la dispersión de los datos y proporcionar una caracterización más confiable del comportamiento estructural, especialmente bajo sismos de alta intensidad.

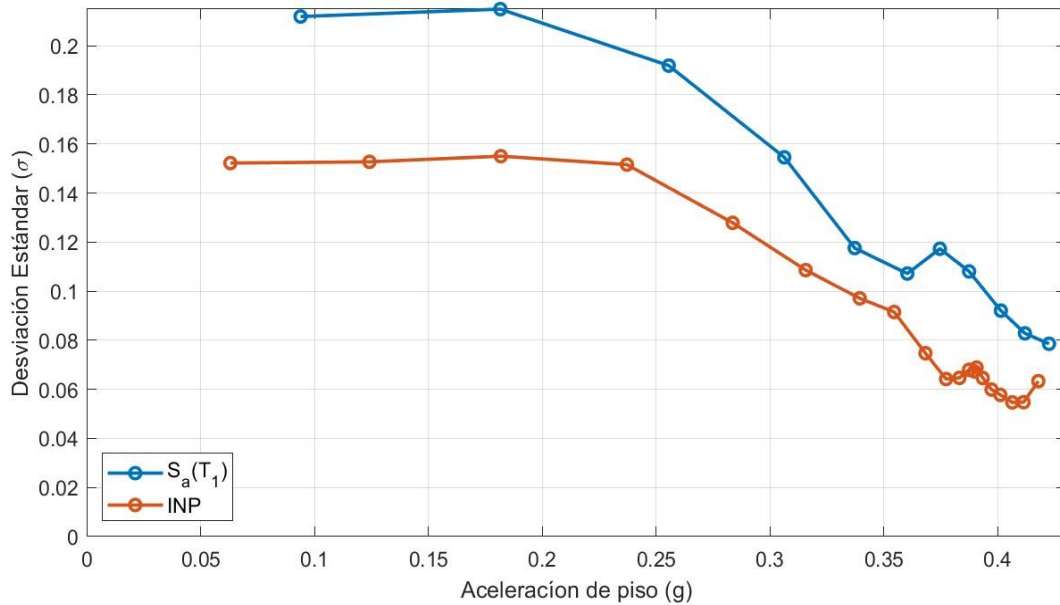


Figura 70. Mediana de la aceleración de piso vs desviación estándar para M15CRP.

4.4.2 Distorsión de entrepiso

En las figuras 71,72 y 73 se mostrarán los resultados obtenidos para M5CRP, M10CRP y M15CRP en términos de distorsión de entrepiso donde en el eje “X” se muestra la distorsión de entrepiso y en el eje vertical “Y” se representa la desviación estándar, denotada por el símbolo σ , la cual cuantifica la dispersión de los valores de distorsión normalizados respecto a la mediana donde la medida de intensidad $S_a(T_1)$ se representa de color Azul y la medida de intensidad I_{Np} de color naranja.

Para M5CRP (Figura 71) se presenta la relación entre la desviación estándar y la distorsión de entrepiso considerando las medidas de intensidad $S_a(T_1)$ e I_{Np} . Se aprecia que I_{Np} mantiene valores de dispersión menores y relativamente estables en todo el rango de distorsiones,

permaneciendo por debajo de 0.012. En cambio, $Sa(T_1)$ muestra un pequeño incremento progresivo y en la desviación estándar a partir de una distorsión cercana a 0.008, alcanzando valores considerablemente mayores. Estos resultados evidencian que I_{Np} ofrece una representación más precisa y consistente del desempeño estructural, reduciendo la incertidumbre asociada en comparación con $Sa(T_1)$.

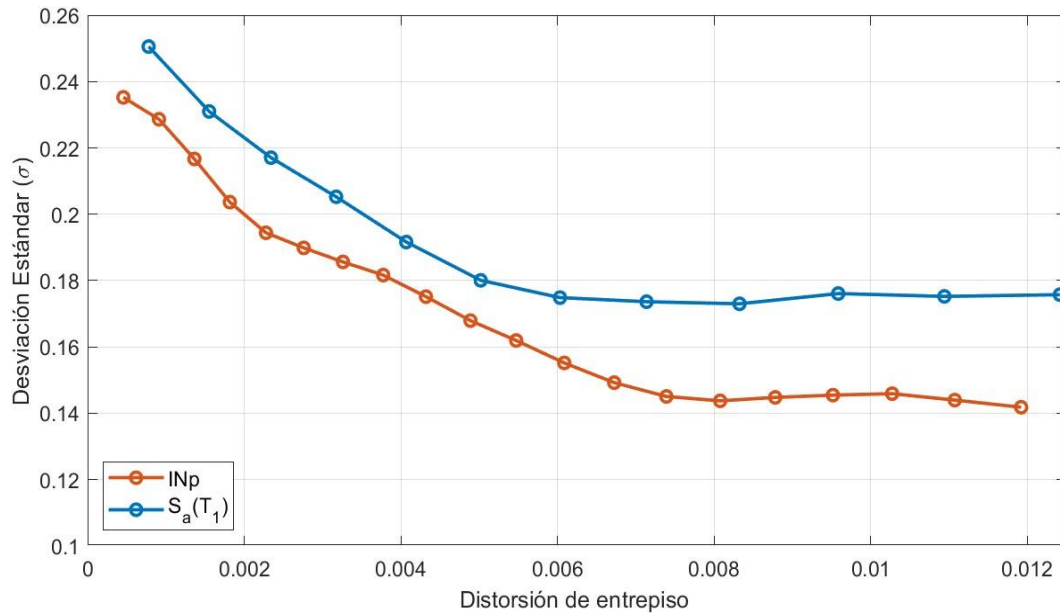


Figura 71. Mediana de distorsión de entrepiso vs desviación estándar para M5CRP.

Para M10CRP (Figura 72) se presenta la relación entre la desviación estándar y la distorsión de entrepiso considerando las medidas de intensidad $Sa(T_1)$ e I_{Np} . En este caso, ambas medidas muestran valores iniciales relativamente bajos y estables de desviación estándar, sin embargo, a partir de una distorsión aproximada de 0.007 se observa un incremento en ambas curvas. Dónde I_{Np} alcanza valores más elevados que $Sa(T_1)$ es en el rango de 0.010 a 0.017, lo que indica una mayor dispersión en ese intervalo. Estos resultados sugieren que, aunque I_{Np} ofrece menor incertidumbre en los niveles iniciales, su precisión disminuye en el rango intermedio, mientras que $Sa(T_1)$ muestra una mayor variabilidad en intensidades más altas.

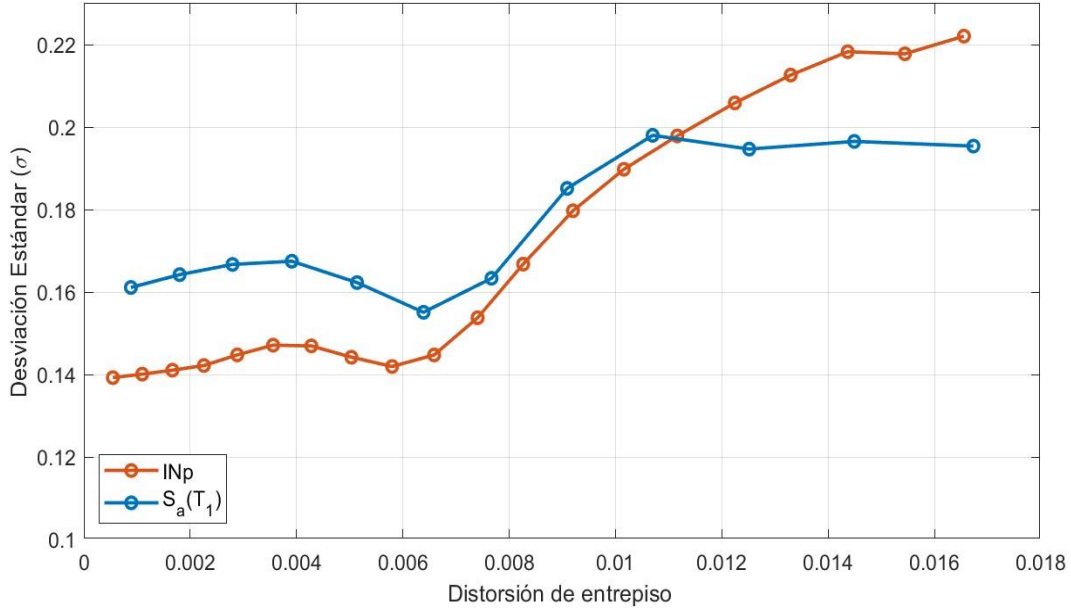


Figura 72. Mediana de distorsión de entrepiso vs desviación estándar para M10CRP.

Para M15CRP (Figura 73) se observa que, en este caso, ambas medidas muestran desviación estándar relativamente pequeñas en los valores iniciales de distorsión, sin embargo, $S_a(T_1)$ presenta valores más elevados de desviación estándar que I_{Np} , se aprecia que a medida que los valores de distorsión incrementan ambas medidas de intensidad presenta una desviación estándar creciente. Por otra parte, en el rango de valores de distorsión de 0.007 a 0.013, se notable que I_{Np} presenta valores de desviación estándar de hasta 0.22, al contrario, a $S_a(T_1)$ que alcanza valores de desviación estándar de 0.24 por lo cual se puede notar que en este caso en particular la medida de intensidad I_{Np} presenta un mejor desempeño sobre la medida de intensidad $S_a(T_1)$.

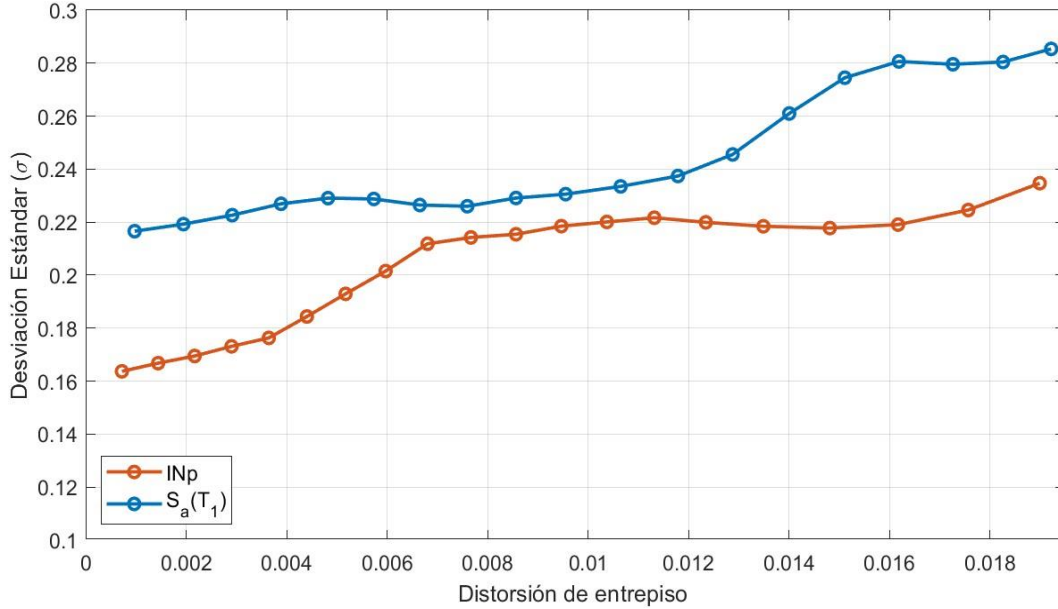


Figura 73. Mediana de distorsión de entrepiso vs desviación estándar para M15CRP.

En términos generales, sobre el análisis de eficiencia correspondiente a distorsiones de entrepiso, podemos observar que la intensidad sísmica I_{Np} ofrece una representación más eficiente respecto a $S_a(T_1)$, donde se muestran valores más estables respecto a su desviación estándar, así como su mediana, independientemente del número de niveles de la estructura. Aunque $S_a(T_1)$ también captura adecuadamente la relación entre la intensidad sísmica y la respuesta estructural, tiende a presentar valores crecientes a medida que aumentan las intensidades sísmicas, donde se presentan valores de aceleración de piso y distorsión mayores.

5 CONCLUSIONES

En esta investigación se abordó el análisis del desempeño sísmico de estructuras con un sistema dual a base de marcos de acero resistentes a momento y contravientos restringidos al pandeo usando dos medidas de intensidad sísmica comúnmente usadas: $S_a(T_1)$ e I_{Np} . Se generaron modelos tridimensionales no lineales de cada estructura y su respuesta se evaluó usando análisis dinámicos incrementales en términos de parámetros estructurales de interés como distorsiones de entrepiso y aceleraciones de piso. Finalmente, se llevó a cabo un análisis de la eficiencia de las medidas de intensidad usadas para identificar aquella que es

mejor predictora de la respuesta sísmica de este tipo de estructuras. Derivado de los resultados obtenidos durante esta investigación se pueden mencionar las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos muestran un comportamiento favorable en los edificios con CRP, particularmente en términos de distorsiones de entrepiso y fuerzas cortantes, además estas configuraciones mejoran la rigidez lateral de las estructuras.
- El estudio demuestra la eficacia de los CRP para optimizar el desempeño estructural, resaltando su capacidad para disipar energía y controlar deformaciones laterales, así como ser la primera línea de defensa ante acciones sísmicas. Estos hallazgos destacan la importancia de considerar elementos de contraviento en el diseño de estructuras de acero, especialmente en zonas de alta actividad sísmica.
- La comparación de curvas de histéresis derivadas de I_{Np} y $Sa(T_1)$ evidencia que I_{Np} reproduce de manera más precisa la disipación de energía de los contravientos, especialmente en las etapas de grandes deformaciones. Esto sugiere que I_{Np} es un indicador confiable para evaluar la capacidad de absorción de energía en edificios de acero equipados con CRPs.
- La medida de intensidad sísmica I_{Np} se mostró más representativa y estable que $Sa(T_1)$ en la relación entre la intensidad del movimiento sísmico y la respuesta no lineal en los edificios de acero equipados con CRPs. En particular, I_{Np} presentó menor dispersión y valores medianos más estables, independientemente del número de niveles del edificio, lo que evidencia ser una medida de intensidad sísmica más confiable al predecir de mejor manera la respuesta sísmica de los edificios considerados.
- Los resultados de esta investigación están limitados a estructuras con características específicas, ubicadas en una zona de suelo blando de la Ciudad de México. Para trabajos futuros, sería relevante analizar estructuras con diferentes configuraciones, sistemas sismorresistentes, niveles de ductilidad y ubicaciones geográficas, con el objetivo de ampliar y generalizar los resultados obtenidos.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] NTCDS, “NTCDS. Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo. Ciudad de México, México., 2020.” 2020.
- [2] “OpenSees -- User Download.” Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://opensees.berkeley.edu/OpenSees/user/download.php>
- [3] CIRES, “Centro de Instrumentación y Registro Sísmico, A. C.” Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <http://www.cires.org.mx/>
- [4] UNAM, “Centro de Instrumentación y Registro Sísmico del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM).” Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/Default.aspx>
- [5] Federico Valenzuela-Beltrán *et al.*, “(PDF) EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS PROVOCADAS POR SISMO EN EDIFICIOS DE CONCRETO REFORZADO UBICADOS EN SUELO BLANDO DE LA CIUDAD DE MÉXICO.” Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/361040621_EVALUACION_DE_PERDIDAS_PROVOCADAS_POR_SISMO_EN_EDIFICIOS_DE_CONCRETO_REFORZADO_UBICADOS_EN_SUELO_BLANDO_DE_LA_CIUADAD_DE_MEXICO
- [6] E. Bojórquez Mora, R. Chávez López, S. E. Ruiz Gómez, and A. Reyes Salazar, “UNA MEDIDA DE INTENSIDAD SÍSMICA QUE PREDICE EL COMPORTAMIENTO NO LINEAL Y EL EFECTO DE LOS MODOS SUPERIORES A GROUND MOTION INTENSITY MEASURE TO PREDICT NONLINEAR BEHAVIOR AND HIGHER MODE EFFECTS,” 2014.
- [7] Morihisa FUJIMOTO, Akira WADA, Eiichiro SAEKI, Toru TAKEUCHI, and Atsushi WATANABE, “Morihisa F., Akira W. (1990). Development of Unbonded Brace,” 1990, Accessed: Jun. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/269764676>
- [8] C. Chou, J. Liu, and D. Pham, “Steel buckling-restrained braced frames with single and dual corner gusset connections: seismic tests and analyses,” *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 41, no. 7, pp. 1137–1156, Jun. 2012, doi: 10.1002/eqe.1176.
- [9] R. G. David and N. Sarif, “Seismic performance of eccentrically braced frames,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/989/1/012021.

- [10] D. D. Ahiwale, D. P. N. Kontoni, and P. L. Darekar, “Seismic performance assessment of reinforced concrete frames with different bracing systems,” *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 8, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.1007/s41062-023-01071-3.
- [11] L. Zheng *et al.*, “Seismic performance of different chevron braced frames,” *J Constr Steel Res*, vol. 200, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107680.
- [12] Jayarajan P, Formerly Chief Engineer, Tecnimont India Private Limited, Mumbai, and India, “Seismic Evaluation of Concentric Braced Frames using Nonlinear Static and Dynamic Time History analysis,” *International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering (IJERMCE)*, vol. 4, no. 7, 2019, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/334735243>
- [13] J. Lawrence. Von Thun, *Earthquake engineering and soil dynamics II : recent advances in ground-motion evaluation : proceedings of the specialty conference*. The Society, 1988.
- [14] E. Bojórquez Mora, I. Iervolino, A. Reyes Salazar, H. Rodríguez Lozoya, and L. Rivera Salas, “PARÁMETRO PARA CARACTERIZAR LA FORMA ESPECTRAL DENOMINADO N_p ,” 2012.
- [15] J. W. Baker and C. A. Cornell, “A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon,” *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 34, no. 10, pp. 1193–1217, 2005, doi: 10.1002/eqe.474.
- [16] R. Chávez-López and E. Bojórquez-Mora, “Análisis de peligro sísmico probabilístico usando una nueva medida de intensidad sísmica,” *DYNA (Colombia)*, vol. 83, no. 195, pp. 206–215, Feb. 2016, doi: 10.15446/dyna.v83n195.50231.
- [17] R. Chávez and E. Bojórquez, “Seismic hazard maps based on the intensity measure IN_p ,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 247–256, Jan. 2018, doi: 10.1007/s12205-017-1371-6.
- [18] H. Rajabnejad *et al.*, “Effect of Intensity Measure on the Response of a 3D-Structure under Different Ground Motion Duration,” *International Journal of Engineering*, vol. 34, no. 10, pp. 2219–2237, 2021, doi: 10.5829/ije.2021.34.10a.4.
- [19] O. Payán-Serrano *et al.*, “Seismic Performance Prediction of RC, BRB and SDOF Structures Using Deep Learning and the Intensity Measure IN_p ,” *AI (Switzerland)*, vol. 5, no. 3, pp. 1496–1516, Sep. 2024, doi: 10.3390/ai5030072.

- [20] G. A. MacRae, Y. Kimura, and C. Roeder, "Effect of Column Stiffness on Braced Frame Seismic Behavior," *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, no. 3, pp. 381–391, Mar. 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:3(381).
- [21] C. Izvernari, M. Lacerte, and R. Tremblay, "SEISMIC PERFORMANCE OF MULTI-STOREY CONCENTRICALLY BRACED STEEL FRAMES DESIGNED ACCORDING TO THE 2005 CANADIAN SEISMIC PROVISIONS," Ottawa, Ontario, Canada, Jun. 2007.
- [22] E. Tapia-Hernández and A. Tena-Colunga, "Code-Oriented Methodology for the Seismic Design of Regular Steel Moment-Resisting Braced Frames," *Earthquake Spectra*, vol. 30, no. 4, pp. 1683–1709, Nov. 2014, doi: 10.1193/032012EQS100M.
- [23] P. W. Clark, I. D. Aiken, F. F. Tajirian, K. Kasai, E. Ko, and I. Kimura, "DESIGN PROCEDURES FOR BUILDINGS INCORPORATING HYSTERETIC DAMPING DEVICES," Cheju, Korea, Aug. 1999.
- [24] E. Bojórquez and I. Iervolino, "Spectral shape proxies and nonlinear structural response," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, no. 7, pp. 996–1008, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.soildyn.2011.03.006.
- [25] P. P. Cordova, G. G. Deierlein, S. S. F. Mehanny, and C. A. Cornell, "DEVELOPMENT OF A TWO-PARAMETER SEISMIC INTENSITY MEASURE AND PROBABILISTIC ASSESSMENT PROCEDURE," 2001.
- [26] N. (2011). Buratti, "Confronto tra le performance di diverse misure di intensità dello scuotimento sismico. Atti del XIV Convegno Nazionale ANIDIS," 2011.
- [27] N. Buratti, "A comparison of the performances of various ground-motion intensity measures," 2012.
- [28] "CSI Spain | ETABS." Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.csiespana.com/software/5/etabs>
- [29] "SASID. Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño. 2024. CDMX." Accessed: May 27, 2025. [Online]. Available: <https://sasid.unam.mx/webNormasCDMX/default.aspx>
- [30] F. Valenzuela-Beltrán, A. Reyes-Salazar, E. Bojórquez, R. Chávez, J. Bojórquez, and M. D. Llanes-Tizoc, "Ground motion selection for the evaluation of residual inter-story drifts in moment-resisting reinforced concrete frame buildings," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 136, p. 106217, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.SOILDYN.2020.106217.

- [31] “MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico.” Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- [32] “COPYRIGHT - OpenSees NavigatorOpenSees Navigator.” Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: https://openseesnavigator.berkeley.edu/?page_id=14
- [33] “CSI Spain | SAP2000.” Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.csiespana.com/software/2/sap2000#>
- [34] “Material Steel02: Modelo Giuffré-Menegotto-Pinto con endurecimiento por deformación isótropa - OpenSeesWiki.” Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php?title=Steel02_Material_-_Giuffr%C3%A9-Menegotto-Pinto_Model_with_Isotropic_Strain_Hardening
- [35] “SteelMPF - Menegotto and Pinto (1973) Model Extended by Filippou et al. (1983) - OpenSeesWiki.” Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: [https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php?title=SteelMPF_-_Menegotto_and_Pinto_\(1973\)_Model_Extended_by_Filippou_et_al._\(1983\)](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php?title=SteelMPF_-_Menegotto_and_Pinto_(1973)_Model_Extended_by_Filippou_et_al._(1983))
- [36] S. M. Kostic and F. C. Filippou, “Section Discretization of Fiber Beam-Column Elements for Cyclic Inelastic Response,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 138, no. 5, pp. 592–601, May 2012, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000501.
- [37] A. Neuenhofer and F. C. Filippou, “Evaluation of Nonlinear Frame Finite-Element Models,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 123, no. 7, pp. 958–966, Jul. 1997, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(1997)123:7(958).
- [38] Milton Abramowitz and Irene A. Stegun, “abramowitz_and_stegun,” Dec. 1972.
- [39] Nathan M. Newmark and F. ASCE, “Newmark_A Method of Computation for Structural Dynamics”.
- [40] S. Mazzoni, N. Gregor, L. Al Atik, Y. Bozorgnia, D. P. Welch, and G. G. Deierlein, “Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Selecting and Scaling of Ground-Motion Records A Report for the ‘Quantifying the Performance of Retrofit of Cripple Walls and Sill Anchorage in Single-Family Wood-Frame Buildings’ Project,” 2020.