



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA EN PLANTAS DE ESTRUCTURAS PROTOTIPO REFORZADAS CON DISIPADORES HISTERETICOS ANALIZADOS CON MÉTODO DE BALANCE ENERGÉTICO EN TACNA 2023

Línea de investigación:
**Desarrollo urbano-rural, catastro, prevención de riesgos, hidráulica y
geotecnia**

Tesis para optar el grado académico de Doctor en Ingeniera Civil

Autor

Mendoza Ramirez, Wilber Percy

Asesor

Pino Vargas, Edwin Martin

ORCID: 0000-0001-7432-4364

Jurado

Cancho Zúñiga, Gerardo Enrique

Infantes Rivera, Pedro Ricardo

García Urrutia Olavarría, Roque Jesús Leonardo

Lima - Perú

2025

DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA EN PLANTAS DE ESTRUCTURAS PROTOTIPO REFORZADAS CON DISIPADORES HISTERETICOS ANALIZADOS CON MÉTODO DE BALANCE ENERGÉTICO EN TACNA 2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

22%

INDICE DE SIMILITUD

21%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net	11%
Fuente de Internet		

2	repositorio.upt.edu.pe	2%
Fuente de Internet		

3	oa.upm.es	1%
Fuente de Internet		

4	www.dspace.uce.edu.ec	1%
Fuente de Internet		

5	1library.co	<1%
Fuente de Internet		

6	upcommons.upc.edu	<1%
Fuente de Internet		

7	repositorio.urp.edu.pe	<1%
Fuente de Internet		

8	vibdoc.com	<1%
Fuente de Internet		



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA SÍSMICA EN PLANTAS DE ESTRUCTURAS
PROTOTIPO REFORZADAS CON DISIPADORES HISTERETICOS ANALIZADOS
CON MÉTODO DE BALANCE ENERGÉTICO EN TACNA 2023

Línea de investigación:

Desarrollo urbano-rural, Catastro, Prevención de riesgos, Hidráulica y geotecnia

Tesis para optar el grado académico de Doctor en Ingeniera Civil

Autor

Mendoza Ramirez, Wilber Percy

Asesor

Pino Vargas, Edwin Martin

ORCID: 0000-0001-7432-4364

Jurado

Cancho Zúñiga, Gerardo Enrique

Infantes Rivera, Pedro Ricardo

García Urrutia Olavarría, Roque Jesús Leonardo

Lima – Perú

2025

DEDICATORIA

A mis padres Manuel (+) y Carmen (+) que siempre creyeron en mí e inspiraron mi deseo de superación.

A mi amada esposa Naldy y a mis queridas hijas Arleth y Gianella, por su paciencia y comprensión en el logro de mis objetivos, son la fuente de mi inspiración y fortaleza.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi asesor, el Dr. Edwin Pino Vargas, por su invaluable orientación y sabiduría a lo largo de este proceso, por su apoyo constante y por compartir sus conocimientos y experiencias de manera generosa.

ÍNDICE

RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Descripción del Problema	1
1.3. Formulación del Problema.....	3
1.3.1. Problema General.....	3
1.3.2. Problemas Específicos	3
1.4. Antecedentes	3
1.4.1. Internacionales	3
1.4.2. Nacionales.....	6
1.5. Justificación de la Investigación	8
1.6. Limitaciones de la Investigación.....	9
1.7. Objetivos	10
1.7.1. Objetivo General	10
1.7.2. Objetivos Específicos.....	10
1.8. Hipótesis	11
1.8.1. Hipótesis General.....	11
1.8.2. Hipótesis Específicas	11
II. MARCO TEÓRICO	12
2.1. Análisis Sísmico No lineal.....	12
2.2. Análisis Estático No Lineal o Pushover.....	12
2.3. Análisis Dinámico No Lineal.....	13
2.4. Comportamiento de Concreto Armado	14
2.5. Modelo inelástico para secciones y Elementos	17
2.5.1. Diagrama Momento-Curvatura	17
2.5.2. Diagrama Momento-Rotación.....	18
2.5.3. Diagrama Simplificado Momento-Rotación.....	19
2.6. Modelos no lineales	21
2.7. Curva de capacidad	21
2.8. Disipadores de Energía Sísmica.....	22
2.8.1. Contravientos Restringidos al Pandeo (CRP)	23
2.8.2. Respuesta de los disipadores de tipo CRP	26
2.9. Metodología de Diseño Sismorresistente Basado en Balance Energético	29
2.9.1. Balance Energético	29
2.9.2. Expresión del Daño.....	32
2.10. Proyecto de Estructuras con Disipadores Dependientes del Desplazamiento Según Nueva Norma Española EN 1998	33
2.10.1. Estructura Mixta Rígido-Flexible	33
2.11. Registros Sísmicos en Perú.....	35

2.11.1.	Magnitud sísmica	37
2.11.2.	Magnitud momento Mw.....	38
2.11.3.	Índice Sismológico ID	39
2.11.4.	Impulsividad	40
2.12.	Respuesta Sísmica de Edificaciones	41
2.12.1.	Fuerza Cortante Basal	41
2.12.2.	Desplazamientos y Distorsiones de Entrepiso	42
2.12.3.	Respuestas Dinámicas Ante Acción Sísmica.....	43
2.12.4.	Distorsión o Deriva β que Colapsa la Estructura	44
2.13.	Curva Histerética y Energía	45
2.14.	Distribución de Resistencia Óptima Según Proyecto de Nuevo EN 1998.....	46
III.	MÉTODO	52
3.1.	Tipo de Investigación.....	52
3.2.	Población y Muestra	52
3.3.	Operacionalización de Variables	53
3.4.	Instrumentos.....	55
3.5.	Procedimientos.....	55
3.6.	Análisis de Datos	56
IV.	RESULTADOS	57
4.1.	Modelos Analizados.....	57
4.2.	Análisis No Lineal Estático o Pushover.....	61
4.3.	Dimensionado de Disipadores CRP	64
4.3.1.	Resistencia y Dimensionado de Disipadores CRP Estructura de 3 Niveles.....	64
4.3.2.	Resistencia y Dimensionado de Disipadores CRP Estructuras de 6 y 9 Niveles	68
4.4.	Selección de Registros Sísmicos.....	69
4.5.	Análisis Dinámico Tiempo Historia	73
4.6.	Análisis No Lineal Dinámico Antes del Colapso	76
4.7.	Distribución de Energía Sísmica en Plantas de Estructuras EM.....	78
4.8.	Verificación con Propuesta de Fórmula de Akiyama.	82
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	85
5.1.	Resultados Para Hipótesis Específicas.....	85
5.1.1.	Hipótesis Específica 1	85
5.1.2.	Hipótesis Específica 2.....	86
5.1.3.	Hipótesis Específica 3	87
5.2.	Resultados Para Hipótesis General	88
VI.	CONCLUSIONES.....	89
6.1.	Cumplimiento del Objetivo General	89
6.2.	Cumplimiento del Objetivo Específico 1: En cuanto a determinar las curvas capacidad y resistencia.....	89
6.3.	Cumplimiento del Objetivo Específico 2: En cuanto a dimensionar disipadores histeréticos..	89
6.4.	Cumplimiento del Objetivo Específico 3: En cuanto a obtener la energía sísmica en plantas de estructura.....	90

VII. RECOMENDACIONES.....	91
VIII. REFERENCIAS.....	92
IX. ANEXOS.....	98
Anexo A. Matriz de Consistencia.....	99
Anexo B. OpenSeesPy análisis no lineal Pushover.....	100
Anexo C. OpenSeesPy análisis no lineal dinámico.....	105
Anexo D. Dimensionado de disipadores CRP estructuras de 6 niveles.....	111
Anexo E. Dimensionado de disipadores CRP estructuras de 9 niveles.....	112
Anexo F. Comparación OpenSeesPy y SAP2000.....	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación del índice de impulsividad	40
Tabla 2 Relación entre deriva de piso y daño	45
Tabla 3 Dimensionado de disipadores de estructura	47
Tabla 4 Distribución de resistencia optima	49
Tabla 5 Operacionalización de las Variables	54
Tabla 6 Secciones de elementos para modelos de 3, 6 y 9 niveles	60
Tabla 7 Dimensionado de resistencia de ED para modelo 3 niveles	65
Tabla 8 Distribución de resistencia optima estructura 3 niveles	66
Tabla 9 Dimensionado de los disipadores CRP para 3 niveles	67
Tabla 10 Registros sísmicos escalados al colapso de estructuras	69
Tabla 11 Registros sísmicos escalados al espectro objetivo	72
Tabla 12 Comparación de respuestas entre estructuras EP y EM de 3 niveles	73
Tabla 13 Comparación de respuestas entre estructuras EP y EM de 6 niveles	74
Tabla 14 Comparación de respuestas entre estructuras EP y EM de 9 niveles	75
Tabla 15 Distribución de energía EM de 3 niveles	79
Tabla 16 Distribución de energía EM de 6 niveles	80
Tabla 17 Distribución de energía EM de 9 niveles	81
Tabla 18 Comparación de distribución de energía según Akiyama	83
Tabla 19 Resumen de dimensionado de estructura ED 3 niveles.	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema del proceso del análisis estático no lineal	13
Figura 2 Análisis dinámico no lineal	14
Figura 3 Comportamiento no lineal del concreto	15
Figura 4 Modelos de comportamiento no lineal del acero.....	16
Figura 5 Diagrama momento-curvatura.....	18
Figura 6 Curvatura y rotación de elemento	19
Figura 7 Relaciones generalizadas fuerza-deformación	20
Figura 8 Modelos idealizados de plastificación de elementos	21
Figura 9 Curva de capacidad de una estructura	22
Figura 10 Respuesta típica de un contraviento convencional	24
Figura 11 Esquema de un disipador de tipo CRP	25
Figura 12 Respuesta típica de un CRP	26
Figura 13 Rigidez lateral brindada por el CRP a un marco	27
Figura 14 Valores de factor de forma f_k para distintos valores de γ y η	28
Figura 15 Concepto de estructura mixta rígido-flexible.....	33
Figura 16 Sistema de estructura mixta rígido-flexible en estructuras porticadas	34
Figura 17 Relación entre cortante y desplazamiento de una planta k según balance de energía	35
Figura 18 Registros de sismos del CISMID	36
Figura 19 Representación de registros sísmicos	37
Figura 20 Relación entre M_w y las escalas de magnitud M_s , m_b y M_L	39
Figura 21 Diagrama de distribución de fuerza cortante.....	42
Figura 22 Desplazamientos y distorsiones de entrepiso	43
Figura 23 Respuestas de edificación ante sismo.....	44
Figura 24 Curvas histeréticas de la estructura	46
Figura 25 Curvas de Resistencia de la Estructura Principal, Disipadores y Mixta	48
Figura 26 Estructura mixta idealizada	50
Figura 27 Ejemplo de curvas histeréticas de estructura.....	50
Figura 28 Vista en planta de edificaciones analizadas.....	57
Figura 29 Modelos a analizar de las 3 edificaciones	58
Figura 30 Modelo uniaxialMaterial (Concrete02) según OpenSeesPy	59
Figura 31 Modelo uniaxialMaterial (Steel02) según OpenSeesPy	59
Figura 32 Sección C1 de estructura de 3 niveles en fibras	60
Figura 33 Modelos de las estructuras definidas en OpenSeesPy	61
Figura 34 Curvas fuerza desplazamiento e idealización bilineal estructura de 3 niveles	62
Figura 35 Curvas fuerza desplazamiento e idealización bilineal estructura de 6 niveles	62
Figura 36 Curvas fuerza desplazamiento e idealización bilineal estructura de 9 niveles	63
Figura 37 Curvas de resistencia para estructura EP, ED y EM de 3 niveles.....	65

Figura 38 Modelo de EM de 3 niveles definida en OpenSeesPy	67
Figura 39 Modelos de EM de 6 y 9 niveles definida en OpenSeesPy	68
Figura 40 Registros sísmicos escalados al colapso de estructuras	70
Figura 41 Escalamiento del sismo 05	71
Figura 42 Espectros de sismos escalados al DBE.....	72
Figura 43 Distorsiones para estructuras EP y EM de 3 niveles	73
Figura 44 Distorsiones para estructuras EP y EM de 6 niveles	74
Figura 45 Distorsiones para estructuras EP y EM de 9 niveles	75
Figura 46 Respuesta histérica de EM de 3 niveles llevado al colapso por sismo 04.	77
Figura 47 Respuesta histérica de EM de 6 niveles llevado al colapso por sismo 05.	77
Figura 48 Respuesta histérica de EM de 9 niveles llevado al colapso por sismo 05.	78
Figura 49 Respuesta no lineal EM de 3 niveles por sismo 04.	78
Figura 50 Distribución de energía EM de 3 niveles.	80
Figura 51 Distribución de energía EM de 6 niveles.	81
Figura 52 Distribución de energía EM de 9 niveles.	82
Figura 53 Distribución de energía EM de 9 niveles.	84
Figura 54 Curvas de resistencia estructura de 3 niveles.	85
Figura 55 Resumen de curvas histérica de EM de 3 niveles por sismo 04.	87
Figura 56 Ratios de distribución de energía para EM de 3, 6 y 9 niveles.....	88

RESUMEN

La presente tesis tuvo como objetivo determinar la distribución de energía sísmica en plantas de estructuras prototipo reforzadas con disipadores histeréticos analizados con método de balance energético. El enfoque de la investigación es cuantitativo, porque se recolecta, analiza e interpreta datos cuantitativos para responder el planteamiento del problema. Se analizaron 3 estructuras de 3, 6 y 9 niveles, se determinó sus curvas de resistencia, posteriormente fueron reforzadas con disipadores del tipo CRP, considerando el método de balance de energía. Se realizaron dos tipos de análisis dinámico no lineal, el primero aplicando 3 sismos escalados al sismo de diseño, dando como resultado una reducción muy significativa de las distorsiones al ser reforzadas las estructuras con disipadores CRP, y el segundo análisis, aplicando los 25 sismos escalados hasta llevar a las estructuras reforzadas cerca al colapso. Se obtuvo las historias de respuesta de desplazamientos y fuerza de corte para cada planta debido a cada sismo escalado, mediante el método numérico del Trapecio, se hizo la integración, dando como resultado la energía producida por la acción sísmica. Se concluyo que los promedios más altos de distribución de energía se dan en los niveles inferiores, para la estructura de 3 niveles para la planta 1 es 69,88%, planta 2 es 26,69; para estructura de 6 niveles la planta 1 es 40,04%, planta 2 es 28,94%, planta 3 es 19,94%; para la estructura de 9 niveles, planta 1 es 54,82%, planta 2 es 22,39%.

Palabras clave: curvas de resistencia, balance de energía, distribución de energía.

ABSTRACT

The objective of this thesis was to determine the seismic energy distribution in prototype structures reinforced with hysteretic dampers analyzed using an energy balance method. The research approach is quantitative because quantitative data is collected, analyzed, and interpreted to answer the problem statement. Three structures of 3, 6, and 9 levels were analyzed, their resistance curves were determined, and then they were reinforced with CRP-type dampers, considering the energy balance method. Two types of nonlinear dynamic analysis were performed: the first applying 3 earthquakes scaled to the design earthquake, resulting in a very significant reduction in distortions when the structures were reinforced with CRP dampers. The second analysis, applying the 25 earthquakes scaled until the reinforced structures were close to collapse. The displacement and shear force response histories for each floor due to each scaled earthquake were obtained using the numerical Trapezium method; the integration was performed, resulting in the energy produced by the seismic action. It was concluded that the highest averages of energy distribution occur at the lower levels; for the 3-level structure, floor 1 is 69,88%, floor 2 is 26,69%; for the 6-level structure, floor 1 is 40,04%, floor 2 is 28,94%, floor 3 is 19,94%; for the 9-level structure, floor 1 is 54,82%, floor 2 is 22,39%.

Keywords: strength curves, energy balance, energy distribution.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

La distribución de energía en las plantas de una estructura cuando sucede un sismo no siempre es de forma equitativa, es importante identificar que planta absorberá mayor energía sísmica para su reforzamiento, una técnica para reforzar estructuras es incorporar disipadores de energía, la implementación de estos dispositivos se puede realizar mediante una nueva metodología basado en Balance de Energía, en tal sentido la investigación se centra en comprender la “Distribución de Energía Sísmica en Plantas de Estructuras Prototipo Reforzadas con Disipadores Histeréticos Analizados con Método de Balance Energético en Tacna 2023”

1.2. Descripción del Problema

A nivel mundial muchos países carecen de normativas de diseño sísmico de edificaciones, y otros países que, si lo tienen, no existe una aplicación cabal de estos reglamentos, y a la vez una supervisión constante por parte de los organismos del estado de dichos países, esto se vio claramente en el sismo de Turquía y Siria el 6 febrero del 2023 con una magnitud de Mw 7.8, en el cual colapsaron edificaciones nuevas, supuestamente contruidos bajo normativa sísmica. A nivel mundial en muchos países falta conciencia de diseño sismorresistente y actualización de las normas vigentes.

El Perú está ubicado en una de las regiones sísmicamente más activas del mundo, ya que se ubica prácticamente sobre una gran falla sismológica, la interacción entre las placas Sudamericana y la de Nazca. En los últimos 25 años hemos tenido grandes sismos que han dejado a su vez gran cantidad de perdidas como lo son el sismo del 23 de junio del 2001 el cual afecto 6 departamentos del Perú, incluido el departamento de Tacna, con Mw 8.2 y otro evento

telúrico catastrófico fue el sismo del 15 de agosto del 2007, en Chíncha y Pisco, el cual fue el más fuerte instrumentado ocurrido en el Perú por su intensidad y duración, con Mw 7.9.

La región de Tacna se encuentra considerado dentro de la zona con alto peligro sísmico del Perú, esperando la venida de un sismo altamente severo, por el silencio sísmico en que se encuentra la región, esperando el retorno del sismo del 13 de agosto 1968, con una magnitud aproximada de Mw 9.0. Por otro lado, un alto porcentaje de las edificaciones en la ciudad de Tacna fueron construidos sin supervisión técnica y falta de expedientes técnicos, aumentando el peligro de colapso de dichas edificaciones ante venida de sismos raros, es por ello la necesidad de estudiar formas de reforzamiento de las edificaciones.

Hay que tener en claro que los efectos adversos generados por los terremotos son producto del mecanismo del sismo y de las fallas o mal comportamiento sísmico de estructuras construidas por el ser humano. En tal sentido es conveniente reforzar las estructuras con sistemas de protección sísmica como son los disipadores histeréticos, en la actualidad el Perú no cuenta con normativa para el diseño de disipadores.

El colapso de estructuras ocurre por la falla de elementos estructurales concentrados en una planta de la estructura, esto se debe a que la energía sísmica no se distribuye de manera equitativa entre las plantas, por lo cual es necesario conocer la distribución de energía sísmica en plantas de una estructura para poder identificar cuál de las plantas se debe reforzar o dotar de mayor resistencia.

Es muy conocido el diseño sísmico de edificaciones basado en fuerzas o desplazamientos, pero poco se conoce del diseño basado en balance de energía. En la actualidad en Europa se viene implementado el diseño basado en balance de energía, el cual ya fue desarrollado en Japón, en la investigación se sigue los conceptos de esta metodología propuestas por Housner (1956) y Akiyama (1985).

1.3. Formulación del Problema

1.3.1. Problema General

¿Como se distribuye la energía sísmica en plantas de estructuras prototipo reforzadas con disipadores histeréticos analizados con método de balance energético en Tacna 2023?

1.3.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo se determinan las curvas de capacidad y resistencia de las plantas de estructuras prototipo en Tacna 2023?
- ¿Cómo dimensionar disipadores histeréticos bajo el método de balance energético en Tacna 2023?
- ¿Cómo obtener la energía sísmica en plantas de estructura prototipo reforzadas con disipadores histeréticos en Tacna 2023?

1.4. Antecedentes

1.4.1. Internacionales

Según Velasco (2021) en su trabajo de fin de máster de la Universidad Politécnica de Valencia “Diseño óptimo del refuerzo estructural, mediante disipadores CRP, para la adecuación del desempeño sísmico de estructuras aporticadas de hormigón armado”, cuyo objetivo general fue determinar el diseño más adecuado del sistema de protección sísmica mediante disipación de energía, con el propósito de reforzar una estructura de hormigón armado. En dicha investigación se analiza una estructura sin CRP, y cuatro configuraciones distintas de colocado de CRP’s en la estructura. Los resultados más relevantes para la presente investigación son: El periodo fundamental sufre una reducción promedio de 1.18 s. a 0.70 s. al implementar el colocado de CRP’s; La estructura sin CRP’s, las distorsiones se concentraron principalmente en el primer nivel. Esta condición se corrige en los modelos M0, SA2 y SAM2.

Además, se observa que en los modelos SA2 y SAM2 las distorsiones registradas en los niveles de la estructura presentan magnitudes muy similares.

Según Mota (2017) en su tesis doctoral de la Universidad Politécnica de Madrid “Reacondicionamiento Sísmico de Edificios de Hormigón Armado con el Primer Piso Blando Mediante Disipadores de Energía: aplicación a la República Dominicana”, concluyó que el análisis no lineal realizado sobre los tres prototipos de estructuras, sometidos a treinta (30) registros sísmicos lejanos y cuarenta y ocho (48) registros cercanos a la falla, correspondientes a terremotos históricos, evidenció que el desempeño sísmico de las estructuras reacondicionadas mediante la solución desarrollada y dimensionada con el método energético propuesto es satisfactorio. Este enfoque protege el pórtico existente y previene daños frente a sismos severos, incluyendo aquellos asociados a registros de campo cercano con efectos impulsivos.

Según Riascos (2021) en su trabajo de fin de máster de la Universidad Politécnica de Madrid “Distribución de la Energía de Deformación Plástica entre Estructura Principal y Disipadores Histeréticos y su Aplicación en los Métodos Energéticos” tuvo por objetivo estudiar el reparto real de energía a nivel de cada planta entre estructura principal y disipadores en escenarios realistas de estructuras sometidas a terremotos históricos.

En la investigación la distribución de la demanda de energía de deformación plástica que imponen los terremotos en cada planta, entre estructura principal y disipadores de energía. Para ello se proyectaron varios prototipos de estructuras porticadas de hormigón armado, a las que se les añadieron disipadores de energía de tipo histeréticos. De los resultados de los cálculos dinámicos se concluye lo siguiente: 1. Dentro de la inevitable dispersión de resultados debida

a la propia naturaleza de la acción sísmica, se puede ver que la distribución de energía entre estructura principal y disipadores a nivel de cada planta sigue un patrón bastante regular para todos los terremotos; 2. La fórmula que emplea la normativa japonesa para predecir la distribución de la demanda de disipación de energía en cada planta, entre estructura principal y disipadores da resultados del lado de la seguridad en todos los casos y para todas las plantas de los prototipos estudiados. Esta fórmula sobreestima la demanda de disipación de energía en aproximadamente un 50%, siendo esta sobreestimación superior en las plantas superiores.

Según Garcés (2021) en su trabajo de fin de máster UPC Barcelonatech “Comparación de métodos de diseño basado en balance energético y desplazamientos aplicado a estructuras de muros estructurales” tuvo por objetivo evaluar la viabilidad de aplicar la metodología de diseño sismorresistente basada en el balance energético para edificaciones con muros de corte, y realizar una comparación con un enfoque de diseño por desempeño actualmente aceptado, basado en desplazamientos. Para ello, en una primera etapa se llevó a cabo la verificación de una estructura aporticada de tres niveles, previamente analizada por Benavent-Climent et al. (2001), con el propósito de validar la correcta aplicación del enfoque energético. Posteriormente, se procedió al diseño y análisis comparativo de un edificio de diez niveles con sistema de muros estructurales, empleando ambas metodologías. La comparación principal se centró en la fuerza cortante en la base del edificio, observándose diferencias significativas entre los resultados obtenidos mediante cada método.

La metodología de diseño sismorresistente basada en el balance de energía, desarrollada por Housner (1956) y posteriormente ampliada por Akiyama (1985), se basa en la estimación de la energía que una estructura es capaz de disipar. Este enfoque permite obtener información

relevante sobre el nivel de vibración y la acumulación progresiva de daño en los distintos elementos estructurales.

1.4.2. Nacionales

Según Maza (2019) en su tesis doctoral de UNFV “Efectos del Disipador Sísmico Metálico de Fluencia en Estructuras de Edificaciones Sociales en la Ciudad de Huaraz” el objetivo principal del estudio fue analizar el impacto de la incorporación de disipadores de energía sísmica metálicos de fluencia en el comportamiento estructural de edificaciones sociales ubicadas en la ciudad de Huaraz. Entre las conclusiones más relevantes del trabajo se destacan las siguientes: 1. La implementación de disipadores metálicos de fluencia (DMF) mejora notablemente el desempeño sísmico de las edificaciones, al incrementar la capacidad de amortiguamiento estructural. Esto se traduce en una reducción significativa de los desplazamientos, de las fuerzas internas, de los esfuerzos inducidos y de los momentos generados en los marcos estructurales evaluados; 2. La instalación de estos dispositivos permite optimizar los costos estructurales, ya que evita la necesidad de reforzar la estructura mediante el aumento de las secciones de columnas o el uso adicional de materiales como acero, concreto o encofrado. El costo adicional por la incorporación de los disipadores es mínimo, dado que su fabricación requiere únicamente perfiles de acero estándar en forma de “I” y “U”, pernos, placas de acero reutilizadas y soldadura.; 3. La notable disminución en los desplazamientos máximos del edificio al incorporar los DMF se debe a su función de amortiguador, ya que estos elementos disipan de forma eficaz la energía sísmica inducida. Dado que los desplazamientos de entrepiso están estrechamente vinculados al nivel de daño en los componentes estructurales, su reducción implica una mejora significativa en la protección sísmica de la edificación.

Según Fuentes (2019) en su tesis de maestría de PUCP “Procedimientos para el Análisis y Diseño de Estructuras con Sistemas de Disipación de Energía en el Perú” tuvo como objetivo establecer procedimientos de análisis y diseño para estructuras equipadas con sistemas de disipación de energía, con el propósito de aportar una base técnica para el desarrollo de una futura normativa nacional en este ámbito. Para ello, se realizó un estudio comparativo de normativas internacionales relevantes, como la ASCE 7 y FEMA. Se concluye lo siguiente: Los métodos simplificados propuestos en la norma ASCE 7-16 resultaron adecuados para estimar respuestas inelásticas aproximadas en estructuras regulares equipadas con disipadores tanto dependientes de la velocidad como del desplazamiento; En el caso de una estructura de concreto de cinco niveles equipada con disipadores TADAS, los métodos simplificados ofrecieron predicciones conservadoras de los desplazamientos máximos de entrepiso. El análisis de respuesta espectral (ARE) sobreestimó estos desplazamientos en un 33 % y las derivas de entrepiso en un 23 %. Además, los métodos simplificados permitieron estimar con buena precisión la fuerza cortante basal inducida por sismo, con un margen de error máximo del 11 % al emplear el procedimiento de fuerza lateral equivalente (FLE). El proceso de dimensionamiento mediante prueba y error de las placas triangulares de los disipadores TADAS fue adecuado para alcanzar la deriva objetivo establecida en el diseño; En función de los resultados obtenidos, el autor concluye que los métodos simplificados analizados presentan un buen desempeño y deberían considerarse como parte de una futura norma peruana para estructuras que incorporen sistemas de disipación de energía.

Según Narváez (2019) en su tesis de maestría de PUCP “Análisis Comparativo Técnico-Económico de una Edificación de 12 Pisos, Empleando Amortiguadores de Fluido Viscoso y Disipadores Histeréticos” tuvo como objetivo contribuir al conocimiento técnico sobre la implementación de sistemas de disipación sísmica pasiva. El estudio consistió en una

comparación técnica y económica entre el uso de disipadores histeréticos tipo ADAS y amortiguadores de fluido viscoso en una edificación de 12 niveles con sistema porticado, ubicada en la ciudad de Lima. La investigación analizó las características mecánicas y principios de funcionamiento de ambos dispositivos, así como el comportamiento estructural de la edificación frente a excitaciones sísmicas con un periodo de retorno de 2475 años. Se estableció como deriva objetivo un valor de 6‰, asociado al nivel de daño moderado según los parámetros definidos por Hazus para eventos sísmicos de esa magnitud. Asimismo, se evaluaron las demandas de ductilidad aplicando los criterios establecidos por el ATC-40 para cada tipo de disipador y el costo de ellos.

Los resultados obtenidos evidenciaron que la incorporación de amortiguadores de fluido viscoso permitió alcanzar la deriva objetivo, logrando una reducción aproximada del 50 % tanto en las derivas como en la demanda de ductilidad. En contraste, al emplear disipadores histeréticos, fue necesario incrementar las secciones de los elementos estructurales con el fin de acercarse al valor objetivo de deriva. Aunque este tipo de disipadores no logró cumplir estrictamente con dicho valor, las derivas se mantuvieron por debajo del límite establecido en la normativa E.030 para un sismo con un periodo de retorno de 2475 años. Además, se logró reducir la ductilidad demandada a aproximadamente el 75 % del valor inicial. Se concluye que, pese a sus limitaciones en el control de derivas, los disipadores histeréticos representan una alternativa económicamente viable para la protección sísmica de edificaciones.

1.5. Justificación de la Investigación

Social, la construcción de edificaciones en la ciudad de Tacna experimenta un crecimiento constante, lo que hace cada vez más relevante garantizar la seguridad estructural y la protección de la vida humana. En este contexto, es esencial proponer soluciones que

respondan a esta problemática actual, en la investigación se refuerza las estructuras con disipadores, y se muestra la reducción de desplazamientos laterales que esta sufren al incorporar sistema de protección sísmica, de tal forma de darle la seguridad de vida a los ocupantes.

Teórico, muy poco se conoce de la distribución de energía sísmica entre plantas, por lo cual, la comunidad de ingeniería civil, puede acceder al conocimiento y bases teóricas de método basado en Balance de Energía propuesto por Housner-Akiyama.

Técnico, la ingeniería nacional debe demostrar sus capacidades mediante el uso de tecnologías que optimicen significativamente la calidad, la seguridad y el desempeño estructural ante acciones sísmicas severas. Mediante esta propuesta se ofrece una nueva forma de evaluación sísmica, considerando la distribución de energía sísmica controlada en plantas de edificaciones.

1.6. Limitaciones de la Investigación

Normas y/o Códigos de diseño. Debido a que en Perú no se tiene una normativa para la implementación de disipadores histeréticos metálicos, para la presente investigación se empleó diferentes códigos para su implementación como la norma E.030, ATC 40, ASCE 7.

Data de Sismos. Debido a la falta de sismos de magnitud superior a 6.0 Mw, en la zona sur de Perú, se consideró 25 registros sísmicos ocurridos en todo el Perú hasta diciembre del 2024 de la página web de El Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres-CISMID,

Propiedades mecánicas de los materiales. No se llevaron a cabo ensayos experimentales en laboratorio para la determinación de las propiedades mecánicas de los

materiales, ya que no es un objetivo de la presente investigación, por lo cual se consideró valores conservadores para las propiedades mecánicas de los materiales.

Parámetros sísmicos. No se realizaron ensayos de campo, para determinar el tipo de suelo, por lo cual se consideró valores conservadores para la clasificación del tipo de suelo.

Análisis en el plano. Se considero para los análisis el eje más crítico de cada edificación, ya que el objetivo de la investigación se centra en determinar la distribución de energía en diferentes plantas, el cual puede ser determinado por el análisis en el plano, además que la distribución de energía sería proporcional, si se considera un análisis en el espacio. Y también para viabilizar el tiempo de análisis no lineal, ya que se avaluaron 3 edificaciones cada uno sometido a 25 sismos.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General

Determinar la distribución de energía sísmica en plantas de estructuras prototipo reforzadas con disipadores histeréticos analizados con método de balance energético en Tacna 2023.

1.7.2. Objetivos Específicos

- Determinar las curvas de capacidad y resistencia de las plantas de estructuras prototipo en Tacna 2023.
- Dimensionar disipadores histeréticos bajo el método de balance energético en Tacna 2023.
- Obtener la energía sísmica en plantas de estructura prototipo reforzadas con disipadores histeréticos en Tacna 2023.

1.8. Hipótesis

1.8.1. Hipótesis General

Mediante el análisis no lineal dinámico se obtiene la energía sísmica en las diferentes plantas de estructuras prototipo y estas se distribuyen de acuerdo a la resistencia que ofrecen la estructura principal más la estructura con disipadores histeréticos analizados con método de balance energético en Tacna 2023.

1.8.2. Hipótesis Específicas

- Realizando un análisis no lineal Pushover se determinan las curvas de capacidad y resistencia de las plantas de estructuras prototipo en Tacna 2023.
- Aplicando la metodología de balance energético de Housner-Akiyama se dimensionan los disipadores histeréticos para reforzar las estructuras prototipo en Tacna 2023.
- Mediante un análisis no lineal dinámico se determinan la historia de desplazamientos y fuerzas de corte con los cuales se obtienen la energía sísmica en las diferentes plantas de las estructuras prototipo en Tacna 2023.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Análisis Sísmico No lineal

El análisis lineal permite determinar la capacidad elástica de las estructuras para prever zonas donde se producirá la primera fluencia. Por otro lado, el análisis no lineal permite obtener una respuesta general de la estructura dentro del rango inelástico considerando la formación de rotulas plásticas, la zona de plastificación de los elementos y evaluar la degradación de los elementos estructurales. Se pueden realizar dos tipos de análisis no lineal: el análisis no lineal estático de carga incremental, también llamado Análisis No Lineal Pushover, y el Análisis No Lineal Dinámico.

2.2. Análisis Estático No Lineal o Pushover

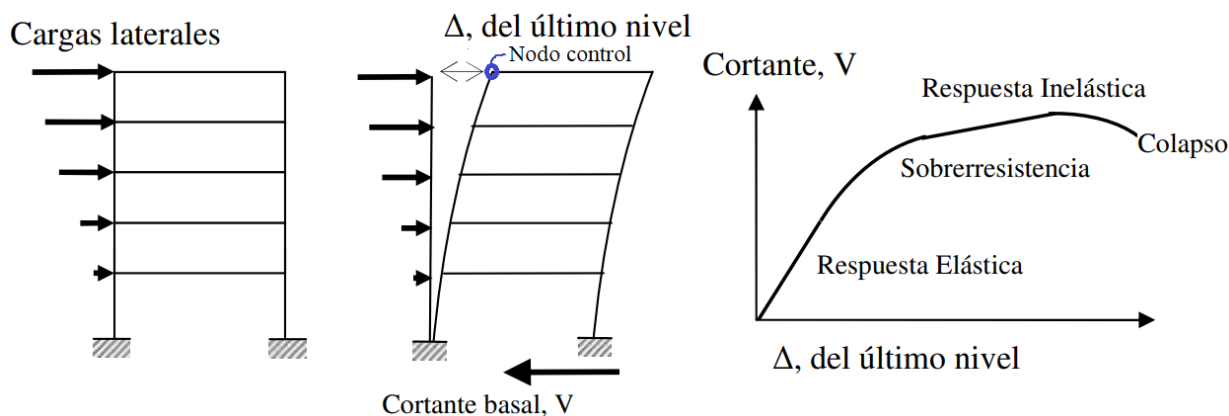
Fue el método de análisis no lineal más usado en las décadas pasadas, por su simpleza, precisión y puede ser modelado en software, consiste en construir un modelo incorporando propiedades no lineales de los materiales para posteriormente analizarlo mediante la aplicación de cargas laterales ubicadas en el centro de masa de los niveles de la estructura, existen diferentes formas de distribución de cargas laterales que se puede aplicar a las estructuras para el funcionamiento de este análisis.

Las cargas laterales se aplican siguiendo un patrón de distribución previamente definido y se aplican de manera monótona en una única dirección, la magnitud de las fuerzas incrementa progresivamente, manteniéndose constante el patrón de fuerza lateral hasta completar el proceso, a medida que el patrón de cargas va aumentando se toma lecturas de las fuerzas internas absorbidas y desplazamientos laterales de los entrepisos, en este proceso los elementos estructurales poco a poco empezaran a entrar en comportamiento no lineal hasta el punto que

la estructura llegue al colapso. El análisis Pushover da como resultado una curva de capacidad de un nodo control que se elija, generalmente del último nivel, como se ilustra en la Figura 1.

Figura 1

Esquema del proceso del análisis estático no lineal

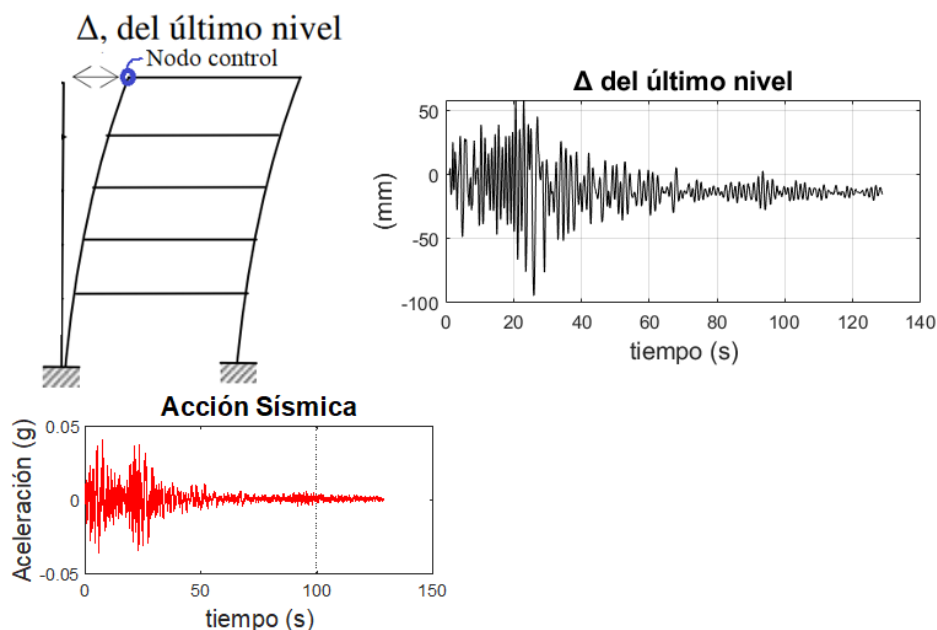


Nota. El nodo control puede estar ubicado en cualquier nivel, dando así la curva de capacidad del nivel respectivo. Extraído de artículo de Revista EIA, por Arango-Paz et al. (2009).

2.3. Análisis Dinámico No Lineal

En la última década es el método de análisis no lineal más empleado, se basa en someter un registro sísmico, muchas veces escalada a los sismos de diseño que definen los reglamentos de cada país, o escaladas hasta que se genere el comportamiento no lineal de alguno o todos los elementos estructurales de la edificación, el colapso, el resultado final es obtener un registro histórico de respuesta dinámica en función del tiempo, de alguna variable de interés, que puede ser desplazamientos, velocidades, aceleraciones o alguna fuerza interna de algún punto o elemento específico de la estructura, como se puede observar en la Figura 2, la respuesta de desplazamiento del último nivel producto de la carga dinámica o acción sísmica..

En la Figura 2 claramente se observa que la respuesta esta en comportamiento no lineal, debido al desfase de los desplazamientos con respecto al eje neutro de los desplazamientos.

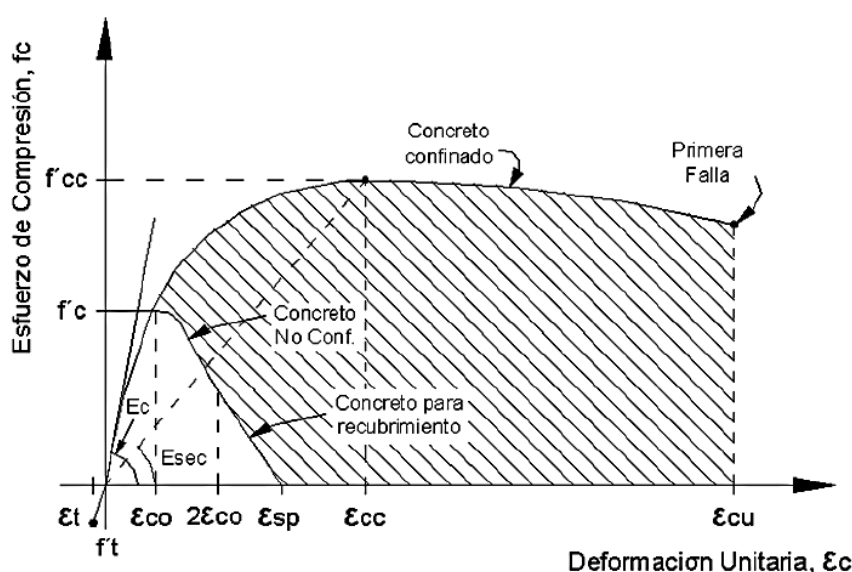
Figura 2*Análisis dinámico no lineal*

Nota. El nodo control puede estar ubicado en cualquier nivel, la respuesta dinámica, desplazamiento, se observa que el entrepiso ha sufrido una deformación permanente, distorsión, lo que indica que los elementos estructurales han entrado en comportamiento no lineal.

2.4. Comportamiento de Concreto Armado

Se emplea una representación simplificada del acero y concreto, desarrollado a partir de datos obtenidos mediante ensayos experimentales.

Para el modelo no lineal se utiliza el modelo Mander, considerado uno de los más empleados. En la Figura 3 se representa este modelo, donde se comparan las curvas correspondientes al concreto confinado y no confinado, la zona sombreada entre ambas curvas evidencia el incremento de capacidad que aporta el acero de confinamiento al concreto, permitiéndole una mayor acumulación de energía a través de la deformación.

Figura 3*Comportamiento no lineal del concreto*

Nota. E_c es el módulo de elasticidad que relaciona el esfuerzo y deformación unitaria lineal durante el comportamiento lineal del concreto, E_{sec} es el módulo secante del concreto no confinado en el esfuerzo máximo. Obtenido de Journal of Structural Engineering, por Mander-Priestley et al. (1988),

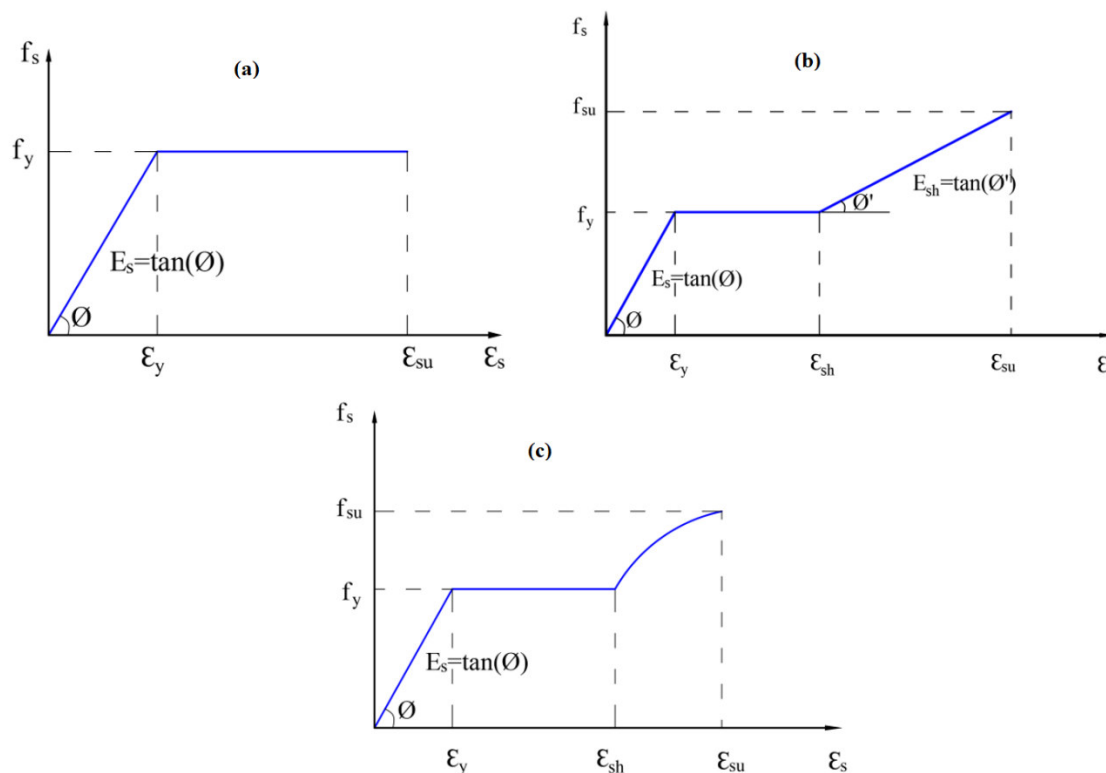
Donde: f'_c es resistencia máxima del concreto no confinado, ϵ_{co} deformación unitaria máxima del concreto no confinado f_{cc} Resistencia máxima alcanzada por el concreto confinado, ϵ_{cu} deformación unitaria última de concreto confinado.

En los modelos no lineales del acero, dada la complejidad de su comportamiento real, se emplean representaciones simplificadas de las curvas tensión-deformación, como el modelo bilineal con límite elástico, ilustrado en la Figura 4(a). Por esta razón, resulta fundamental determinar los esfuerzos que actúan sobre el acero cuando las deformaciones superan el umbral elástico, a fin de estimar con precisión la resistencia del material bajo condiciones inelásticas. Este enfoque es particularmente relevante en el diseño sismorresistente, donde se exige una ductilidad que implica deformaciones mayores a la deformación de fluencia. Las Figuras 4(b)

y 4(c) presentan idealizaciones más detalladas y precisas de la relación tensión-deformación del acero.

Figura 4

Modelos de comportamiento no lineal del acero



Nota. Se muestra en la figura (a) Modelo Elastoplástico Perfecto; en la figura (b) Modelo Trilineal con endurecimiento por deformación, según Ottazzi (2011); y en la figura (c) Modelo elastoplástico con endurecimiento por deformación según Park y Paulay (1975).

Donde: f_y es esfuerzo de fluencia del acero; ϵ_y : corresponde a la deformación unitaria en el punto de fluencia; ϵ_{sh} indica la deformación unitaria a partir de la cual se inicia el endurecimiento por deformación; f_{su} es el esfuerzo último alcanzado por el acero; ϵ_{su} deformación unitaria máxima del material; y E_s módulo de elasticidad del acero.

2.5. Modelo inelástico para secciones y Elementos

2.5.1. Diagrama Momento-Curvatura

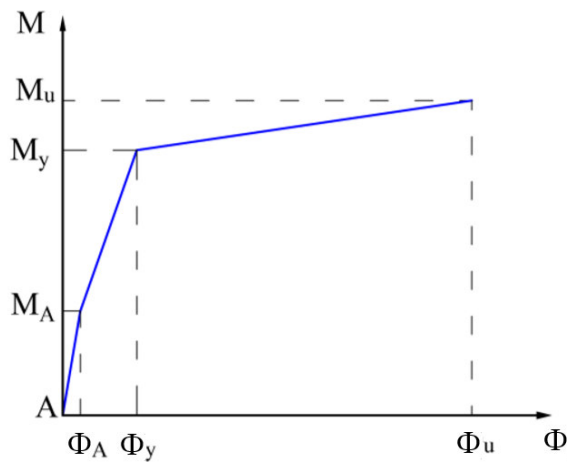
Representa la relación entre la flexión y la deformación por curvatura (rotación por unidad de longitud) en una sección de concreto armado, considerando tanto el comportamiento lineal como el no lineal.

El diagrama Momento-Curvatura ($M - \Phi$) proporciona una comprensión precisa de la capacidad máxima de deformación inelástica, las propiedades de disipación de energía y el comportamiento no lineal de la sección. A mayor ductilidad de la sección, mayor será la capacidad del elemento y de la estructura para disipar energía.

El diagrama Momento-Curvatura ($M - \Phi$) se desarrolla utilizando los modelos constitutivos del concreto y del acero. Dentro del diagrama se resalta tres puntos críticos: estado de agrietamiento (Φ_A, M_A), estado de fluencia (Φ_y, M_y) y estado de agotamiento o ultimo (Φ_u, M_u) como se muestra en la Figura 5.

La relación entre el momento flector y la curvatura en una sección de concreto armado es lineal mientras el momento aplicado se mantenga por debajo del momento de agrietamiento (M_A). Una vez que se inicia el agrietamiento, la relación se mantiene aproximadamente lineal, aunque con una pendiente reducida, hasta que se alcanza la fluencia del acero (M_y) o la capacidad máxima del concreto (M_u).

En los casos donde la fluencia del acero ocurre primero, la sección continúa deformándose hasta que el concreto alcanza su esfuerzo máximo (M_u) y posteriormente su máxima capacidad, según Ottazzi (2011).

Figura 5*Diagrama momento-curvatura*

Nota. Con el diagrama momento-curvatura se determina la ductilidad de la sección μ , que es la ratio entre Φ_u / Φ_y .

2.5.2. Diagrama Momento-Rotación

El diagrama Momento-Curvatura ($M-\Phi$) se refiere al comportamiento de una sección específica, mientras que el diagrama Momento-Rotación ($M-\theta$) representa la respuesta de un tramo del elemento estructural, usualmente correspondiente a la región donde se forma la rótula plástica. La curvatura y rotación de un elemento se muestra en la Figura 6.

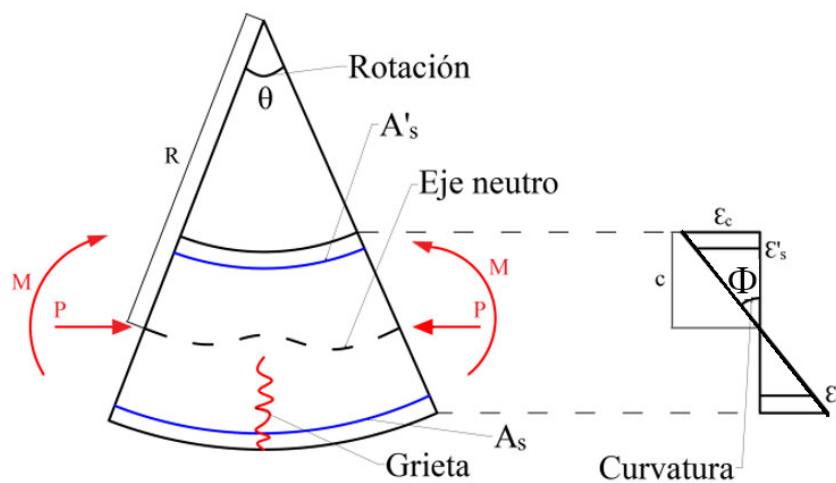
A partir del diagrama $M-\Phi$ es posible estimar la rotación inelástica entre dos puntos ubicados dentro de la zona de formación de la rótula plástica, cuya longitud se denomina L_p (longitud de plastificación equivalente). Esta longitud abarca efectos como la formación de grietas diagonales por corte, las cuales no se consideran en la elaboración del diagrama $M-\Phi$. Tampoco se contemplan el deslizamiento del acero en las proximidades de las grietas ni la disminución de la deformación unitaria del acero debido a la presencia de concreto no

agrietado; por lo tanto, la rotación inelástica obtenida resulta menor que la realmente desarrollada.

Esta situación dificulta la estimación precisa de la rotación inelástica disponible., normas como el ASCE/SEI 41-23, FEMA 440, ATC-40 proponen un diagrama $M - \theta$ simplificado y normalizado, el cual se elabora a partir del cálculo de ciertos parámetros.

Figura 6

Curvatura y rotación de elemento



Nota. La línea discontinua es el eje neutro, el cual se desplaza en la zona que ocurre la grieta.

Extraído de Otazzi (2011).

2.5.3. Diagrama Simplificado Momento-Rotación

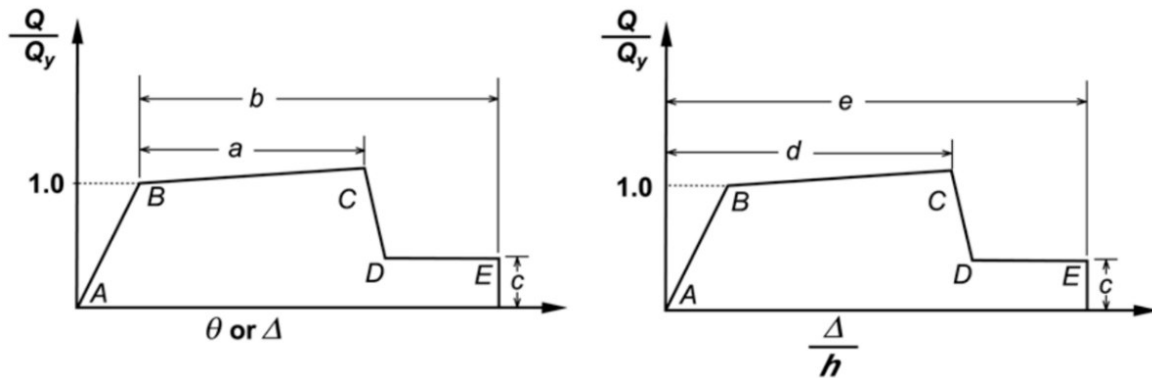
Dada la cantidad de elementos presentes en una estructura y la complejidad asociada a la elaboración de los diagramas Momento-Rotación para cada uno, se recurre al uso de diagramas simplificados compuestos por tramos rectilíneos que conectan los puntos críticos.

Mediante el cálculo de algunos parámetros propios de cada elemento estructural y uso de tablas las normas ASCE/SEI 41-23, FEMA 440, ATC-40 pueden idealizar los diagramas

Momento-Rotación, bajo la denominación de curvas conocidas como Relaciones Generalizadas Fuerza-Deformación, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Relaciones generalizadas fuerza-deformación



Nota. Q/Q_y es la relación de carga con respecto a la carga de fluencia, la carga de fuerza Q se relaciona con el desplazamiento Δ y la carga de momento Q se relaciona con la rotación θ , las constantes a , b y c se calculan mediante tablas. Extraído de ASCE/SEI 41-23 (2023).

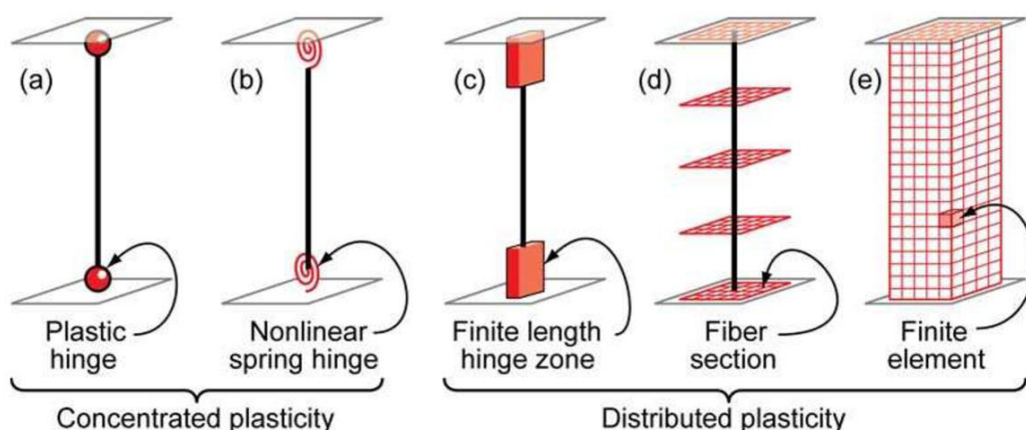
La relación fuerza-deformación generalizada, ilustrada en la Figura 6, se caracteriza por una respuesta inicial lineal desde el punto A, correspondiente al estado sin carga, hasta el punto B, que representa la fluencia efectiva del elemento. A partir de este punto y hasta el punto C, se observa una disminución en la rigidez (entre el 0 % y el 10 % de la pendiente elástica inicial), lo cual refleja el fenómeno de endurecimiento por deformación. Posteriormente, entre los puntos C y D, se produce una degradación abrupta de la resistencia, indicando el inicio de un deterioro estructural significativo. Más allá del punto D, el elemento conserva únicamente una capacidad resistente reducida, hasta alcanzar el punto E. Para deformaciones superiores a este último, la resistencia se considera prácticamente nula.

2.6. Modelos no lineales

Los modelos no lineales se diferencian de acuerdo a su distribución de plasticidad en su sección transversal y longitud del elemento, en la Figura 8 se muestran cinco tipos de modelos idealizados para predecir una respuesta inelástica.

Figura 8

Modelos idealizados de plastificación de elementos



Nota. Los modelos se diferencian en 2 grupos, plastificación concentrada y plastificación distribuida. Extraído de Nonlinear Structural Analysis For Seismic Design, por Deierlein – Reinhorn et al. (2010).

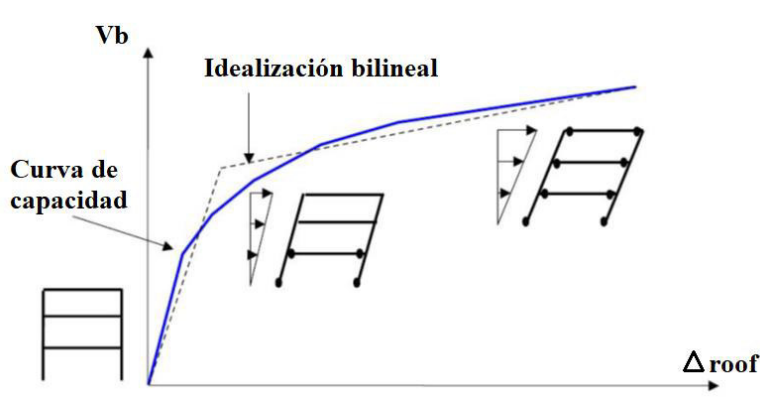
2.7. Curva de capacidad

La evaluación de la capacidad estructural en el rango no lineal requiere la aplicación de un análisis no lineal mediante el método Pushover, carga incremental. Este procedimiento depende de la resistencia y la capacidad de deformación de los elementos estructurales que conforman el sistema.

La historia de capacidad o resistencia versus desplazamiento que ofrece la estructura a medida que va incrementado la sollicitación a cargas laterales monótonas, es la curva de capacidad de la estructura, el cual se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Curva de capacidad de una estructura



Nota. V_b es la fuerza cortante en la base de la estructura, Δ_{roof} es el desplazamiento control en último nivel.

2.8. Disipadores de Energía Sísmica

Según Velasco (2021), los disipadores de energía sísmica pertenecen a los sistemas de protección pasiva. Su función principal es absorber parte de la energía aplicada por un sismo, lo que permite reducir la participación de la estructura y minimizar los daños que ésta pueda sufrir. Una de sus principales ventajas radica en su diseño reemplazable, lo que permite reducir tiempos y costos de reparación tras un evento sísmico.

Según el ASCE/SEI 41-23 (2023), los disipadores de energía pueden agruparse según el componente de la ecuación de equilibrio dinámico sobre el cual actúan, identificándose tres categorías principales de estos dispositivos:

- Dependientes del desplazamiento.

- Dependientes de la velocidad.
- Otros.

Según Ruiz (2011), los disipadores cuya respuesta depende del desplazamiento son comúnmente denominados disipadores histeréticos, ya que su funcionamiento se fundamenta en la deformación plástica del material del que están fabricados. Su respuesta mecánica se caracteriza mediante la relación fuerza – desplazamiento, representadas con modelos bilineales o trilineales. La energía disipada está relacionada con el desplazamiento relativo entre sus extremos y proporcional al área encerrada entre cada ciclo de carga. Los disipadores de fricción, ADAS (Added Damping and Stiffness), TADAS (Triangular Added Damping and Stiffness) o **CRP (Contravientos Restringidos al Pandeo)** entran en esta categoría.

En el caso de los disipadores sensibles a la velocidad, la disipación de energía está determinada por la velocidad relativa entre sus extremos. Estos dispositivos se dividen principalmente en dos tipos: viscosos y viscoelásticos.

2.8.1. *Contravientos Restringidos al Pandeo (CRP)*

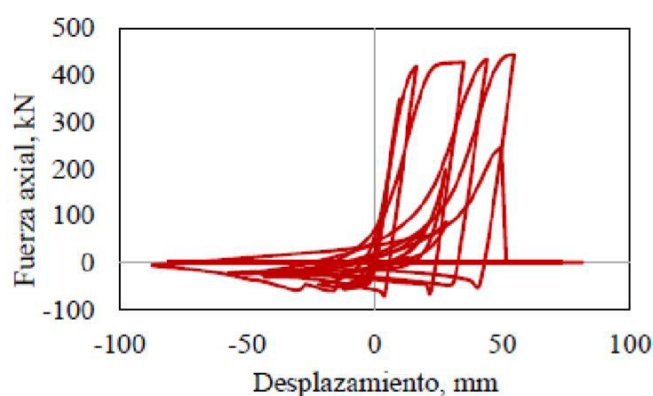
Como se mencionó previamente, los CRP's (del inglés, Buckling Restrained Braces; BRB's) corresponden a disipadores de energía sísmica del tipo histerético, lo que implica que su funcionamiento se basa en la disipación de energía mediante deformaciones inelásticas. Estos elementos comenzaron a desarrollarse a mediados de la década de 1970 y presentan un comportamiento mecánico eficiente frente a solicitaciones sísmicas en comparación con los contravientos convencionales, según AlHamaydeh – Abed et al. (2016).

En las estructuras metálicas, es común emplear contravientos como elementos que proporcionan rigidez al sistema. Estos componentes, constituidos por perfiles metálicos esbeltos, presentan como inconveniente principal su tendencia al pandeo bajo cargas de compresión. Esto implica que, ante una acción sísmica, una estructura rigidizada con

contravientos tradicionales experimentará plastificación de estos elementos durante los ciclos de tracción, mientras que al estar sometidos a compresión tenderán a pandearse. La Figura 10 ilustra de forma esquemática la respuesta numérica de un contraviento convencional frente a cargas dinámicas de tipo cíclico.

Figura 10

Respuesta típica de un contraviento convencional



Nota. Para este tipo de disipadores se observa que la resistencia a tracción es mucho mayor que la resistencia a compresión, Extraído de Velasco (2021).

Adicionalmente, cabe destacar que estos contravientos presentan una respuesta histerética inestable, lo que conlleva una disipación de energía poco eficiente durante la acción sísmica.

Según Barbagallo - Bosco et al. (2019) Buscando superar las limitaciones antes mencionadas, se dio inicio al desarrollo de disipadores de tipo CRP. Las primeras investigaciones en esta línea se llevaron a cabo en Japón, destacando el trabajo de Kimura - Takeda et al. (1976), quienes estudiaron el comportamiento de contravientos tradicionales encapsulados en una carcasa metálica con mortero en el interior. El propósito del experimento era impedir el pandeo por medio del confinamiento del contraviento, no obstante, el diseño propuesto solo consiguió mantener unos pocos ciclos histeréticos estables, según AlHamaydeh – Abed et al. (2016). Posteriormente, a finales de la década de 1980, Watanabe - Hitomoi et al.

(1988) propusieron un elemento de características similares, pero incorporaron materiales antiadherentes en la interfase mortero – núcleo metálico.

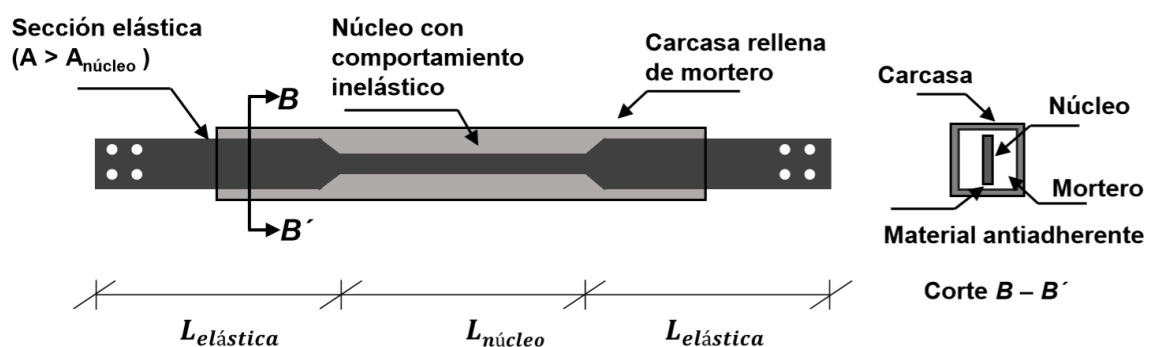
En la actualidad, los dispositivos CRP mantienen los principios fundamentales propuestos por Kimura y Watanabe, y suelen estar compuestos por cuatro elementos principales:

- Un núcleo metálico diseñado para concentrar las deformaciones inelásticas.
- Elementos de conexión con un área transversal superior a la del núcleo, con el fin de garantizar un comportamiento predominantemente elástico.
- Una carcasa metálica rellena con mortero que confina el núcleo, permitiendo su libre deformación tanto en compresión como en tracción.
- Una película de material antiadherente aplicada alrededor del núcleo para evitar que el mortero participe en la transmisión de esfuerzos axiales.

La Figura 11 muestra de forma esquemática un disipador tipo CRP, destacando la ubicación de cada uno de estos componentes.

Figura 11

Esquema de un disipador de tipo CRP

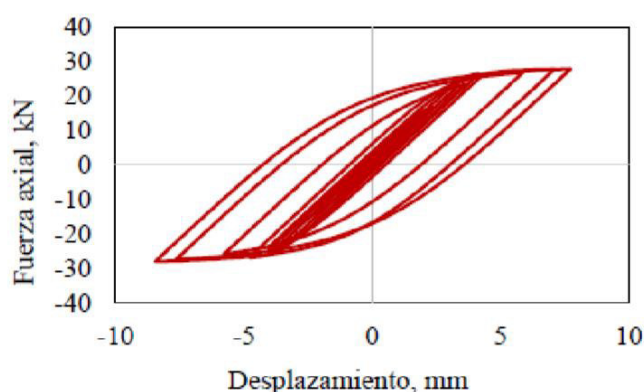


Nota. Los disipadores dependientes del desplazamiento CRP's son muy económicos en relación a disipadores dependientes de la velocidad. Extraído de Velasco (2021).

Los disipadores tipo CRP's se fijan a las estructuras mediante uniones articuladas y suelen disponerse en disposición diagonal o con un diseño tipo Chevrón. Según Pandikkadavath y Sahoo (2016), los ensayos de laboratorio realizados a este tipo de dispositivos han evidenciado una respuesta histerética estable y prácticamente simétrica bajo esfuerzos de tracción y compresión, aunque con una resistencia ligeramente superior en compresión, atribuida al efecto Poisson. La Figura 12 ilustra el comportamiento numérico de un disipador CRP sometido a cargas dinámicas cíclicas.

Figura 12

Respuesta típica de un CRP



Nota. Los disipadores dependientes del desplazamiento CRPs son muy económicos en relación a disipadores dependientes de la velocidad. Extraído de Velasco (2021).

2.8.2. Respuesta de los disipadores de tipo CRP

Los disipadores tipo CRP contribuyen al incremento de la rigidez y del amortiguamiento en las estructuras donde se incorporan. Estas propiedades dependen fundamentalmente de las características geométricas y mecánicas del núcleo metálico. Para un disipador como el ilustrado en la Figura 11, la rigidez del componente se calcula mediante la siguiente expresión:

$$K_{CRP} = f_k \frac{A_C E}{L_W} \quad (1)$$

Donde L_W es la longitud total del CRP, E es el módulo de elasticidad del material del núcleo, A_C es el área transversal del núcleo y según Aguaguiña,- Zhou et al.(2020), f_k es un factor de forma que puede ser estimado como:

$$f_k = \frac{1}{\gamma + \eta (1 - \gamma)} \quad (2)$$

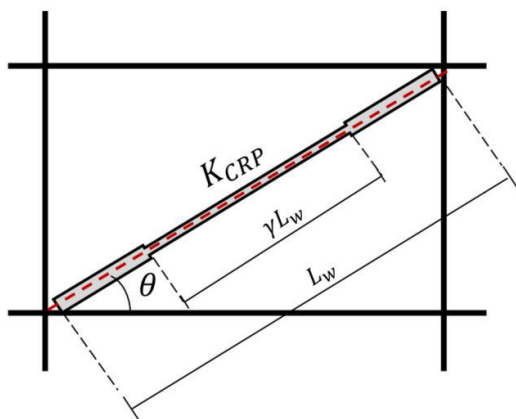
Donde γ es la relación entre la longitud del núcleo y la longitud total del CRP, y η es la relación entre el área transversal del núcleo y el área de las conexiones. Según Teran y Virto (2010), en el cálculo de K_{CRP} se desprecia la deformación a flexión del disipador. Considerando lo anterior, la rigidez lateral (K_L) que el CRP proporcionaría a un nivel sería igual a:

$$K_L = f_k \frac{A_C E}{L_W} \cos^2 \theta \quad (3)$$

Donde θ es el ángulo de inclinación del disipador, tal como se muestra en la Figura 13.

Figura 13

Rigidez lateral brindada por el CRP a un marco



Nota. La rigidez lateral K_L del disipador depende del ángulo de inclinación de su colocado.

Extraído de Velasco (2021).

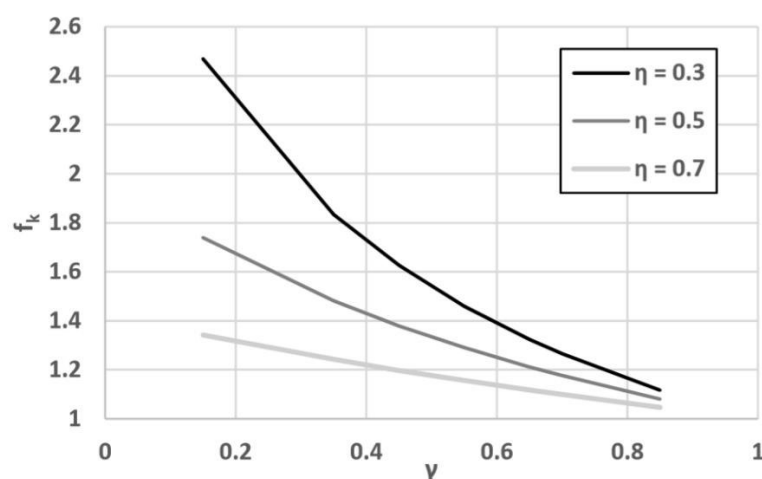
Aguaguña - Zhou et al. (2020) recopilaron datos sobre diversos parámetros de los disipadores CRP provenientes de distintas investigaciones, identificando que el valor típico del parámetro γ oscila entre 0.5 y 0.7. No obstante, se han desarrollado estudios específicos sobre una variante denominada CRP de núcleo corto, la cual presenta valores de γ aún más bajos.

En los trabajos publicados, no es común que se reporten los valores utilizados para la relación η , sin embargo, en los análisis numéricos realizados por Tremblay - Bolduc et al. (2006) y Hoveidae - Tremblay et al. (2015) se usaron valores entre 0,3 – 0,7.

En la Figura 14 se muestran graficados los valores del factor de forma f_k para valores de γ entre 0,15 a 0,85 y de η entre 0,3 a 0,7.

Figura 14

Valores de factor de forma f_k para distintos valores de γ y η



Nota. Para valores $\gamma > 0,80$, existe una mínima variación de f_k para los tres valores de η considerados. Extraído de Velasco (2021).

2.9. Metodología de Diseño Sismorresistente Basado en Balance Energético

2.9.1. Balance Energético

Para analizar el comportamiento estructural bajo la acción sísmica, es necesario resolver la ecuación de movimiento considerando un elevado nivel de no linealidad. La ecuación de movimiento, presentada como ecuación (4), representa el equilibrio entre todas las fuerzas que actúan en un sistema dinámico de múltiples grados de libertad, el cual modela la estructura sometida a los tres componentes del movimiento del terreno.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = - \sum_{i=1}^{N_g} \mathbf{M} \ddot{u}_{g,i} \quad (4)$$

En esta ecuación $\ddot{\mathbf{u}}$, $\dot{\mathbf{u}}$ y \mathbf{u} corresponden a las respuestas de aceleración, velocidad y desplazamiento, respectivamente, en función del tiempo para cada grado de libertad del sistema. La matriz \mathbf{M} representa la masa del sistema, \mathbf{C} es la matriz de amortiguamiento y \mathbf{K} la matriz de rigidez, la cual varía en el rango no lineal del análisis. El término en el lado derecho de la ecuación (4) corresponde a la excitación dinámica generada por el movimiento sísmico, donde $\ddot{u}_{g,i}$ denota la aceleración del suelo en la dirección i de un total de N_g movimientos sísmicos.

Multiplicando la ecuación (4) por el incremento diferencial de desplazamiento, $d\mathbf{u}$ (equivalente a $\dot{\mathbf{u}} dt$) y realizando la integración a lo largo del intervalo de tiempo correspondiente a la duración del sismo (0 hasta t), se obtiene la ecuación (5) que expresa el balance energético de la estructura, facilitando la interpretación del comportamiento estructural bajo el enfoque del intercambio de energía.

$$\left[\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = - \sum_{i=1}^{N_g} \mathbf{M} \ddot{u}_{g,i} \right] \cdot \int_0^t \dot{\mathbf{u}} dt \quad (4. a)$$

$$\int_0^t M\ddot{u} \dot{u} dt + \int_0^t C\dot{u} \dot{u} dt + \int_0^t K u \dot{u} dt = - \int_0^t \sum_{i=1}^{N_g} M\ddot{u}_{g,i} \dot{u} dt \quad (5)$$

De la ecuación (5) se pueden distinguir las siguientes componentes

$$E_I = - \int_0^t \sum_{i=1}^{N_g} M\ddot{u}_{g,i} \dot{u} dt \quad (6)$$

$$E_k = \int_0^t M\ddot{u} \dot{u} dt = \frac{M\dot{u}^2}{2} \quad (7)$$

$$E_\xi = \int_0^t C\dot{u} \dot{u} dt \quad (8)$$

$$E_{es} + E_p = \int_0^t K u \dot{u} dt \quad (9)$$

Donde:

E_I : es la energía introducida por el sismo en el sistema hasta el instante t .

E_k : es la energía cinética.

E_ξ : es la energía disipada por el mecanismo de amortiguamiento hasta el instante t .

E_{es} : es la energía de deformación elástica en el instante t .

E_p : es la energía de deformación plástica acumulada (energía disipada) hasta el instante t .

La suma de la energía cinética (E_k) y la energía de deformación elástica (E_{es}) es definida como la energía de vibración elástica (E_e), que es principalmente la energía de almacenamiento de un sistema estructural y se disipa completamente una vez que finaliza la

excitación estructural, ya que corresponde al trabajo realizado dentro del rango elástico de los elementos estructurales.

$$E_e = E_k + E_{es} \quad (10)$$

La ecuación (4) representa el equilibrio dinámico de fuerzas en un instante específico, proporcionando la respuesta sísmica de la estructura en el rango elastoplástico. No obstante, esta ecuación depende de las condiciones particulares del problema analizado. En cambio, la ecuación (5) refleja la respuesta del sistema a lo largo del tiempo durante la duración del movimiento del suelo, sin estar condicionada a las características específicas del problema. Esto se debe a que la energía introducida por el sismo en el sistema es una magnitud constante que depende principalmente del periodo fundamental de vibración y de la masa de la estructura. La resistencia, así como la distribución de masas o rigideces, no influyen en esta energía aportada. De esta manera, es posible cuantificar cómo se distribuye la energía entre los distintos componentes E_e , E_p y E_ξ (Akiyama, 2003). Si la ecuación (5) se escribe con las componentes descritas anteriormente, se obtiene:

$$E_e + E_\xi + E_p = E_I \quad (11)$$

La ecuación (11) constituye la base fundamental de la metodología de diseño sismorresistente que se fundamenta en el balance energético. Tanto la ecuación (5) como la (11) son expresiones estrictas de balance energético y proporcionan información acumulada e integrada sobre la vibración del sistema a lo largo del tiempo.

2.9.2. Expresión del Daño

Si a la energía introducida por el sismo en una estructura E_I , e le resta la energía disipada a través del mecanismo de amortiguamiento E_ξ se obtiene, lo que Housner (1956), definió como la energía que contribuye al daño estructural E_D .

$$E_D = E_I - E_\xi \quad (12)$$

Al restar estos dos componentes en la ecuación de balance energético, quedan los términos E_e y E_p , los cuales representan las energías responsables de las deformaciones elásticas y plásticas en la estructura.

$$E_e + E_p = E_D = E_I - E_\xi \quad (13)$$

La energía incorporada al sistema y aquella que contribuye al daño pueden ser expresadas en función de la pseudo velocidad equivalente y de la masa total de la estructura. M :

$$V_E = \sqrt{\frac{2 E_I}{M}} \quad (14)$$

$$V_D = \sqrt{\frac{2 E_D}{M}} \quad (15)$$

Housner (1956) demostró que V_D está cerca del valor de la velocidad espectral S_v para el período fundamental de la estructura T_1 , y para propósitos de diseño se puede suponer que $V_D = S_v$.

2.10. Proyecto de Estructuras con Disipadores Dependientes del Desplazamiento Según Nueva Norma Española EN 1998

Según Benavent (2024), el nuevo EN 1998 prescribe que las estructuras que incorporan disipadores de energía sensibles al desplazamiento se comprueben con un método basado en el balance energético, basado en el concepto de energía de Housner-Akiyama.

Los métodos de diseño sismorresistente basados en el balance energético se fundamentan en la ecuación básica de balance de energía, ecuación (8). Estos métodos se pueden aplicar a cualquier tipo de estructura, entre ellas las estructuras con disipadores de energía dependientes del desplazamiento.

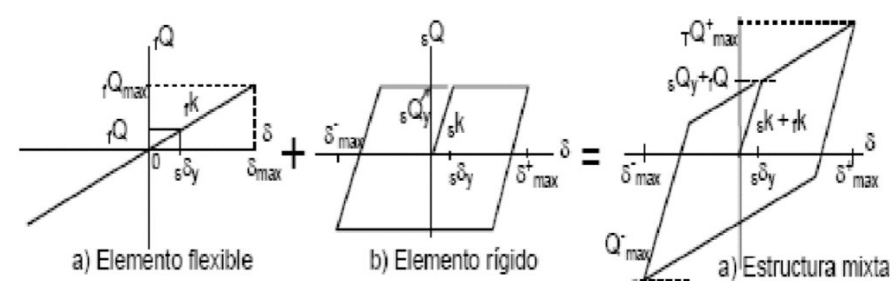
2.10.1. Estructura Mixta Rígido-Flexible

Las estructuras con disipadores de energía dependientes del desplazamiento se conciben para que funcionen o se acerquen al funcionamiento de los llamados “sistemas mixtos rígido flexibles” (Akiyama, 1985; Akiyama 2003).

Conceptualmente, un “sistema mixto rígido flexibles” combina en paralelo en cada planta dos elementos: el “elemento flexible” y el “elemento rígido”, como ilustra la Figura 15.

Figura 15

Concepto de estructura mixta rígido-flexible



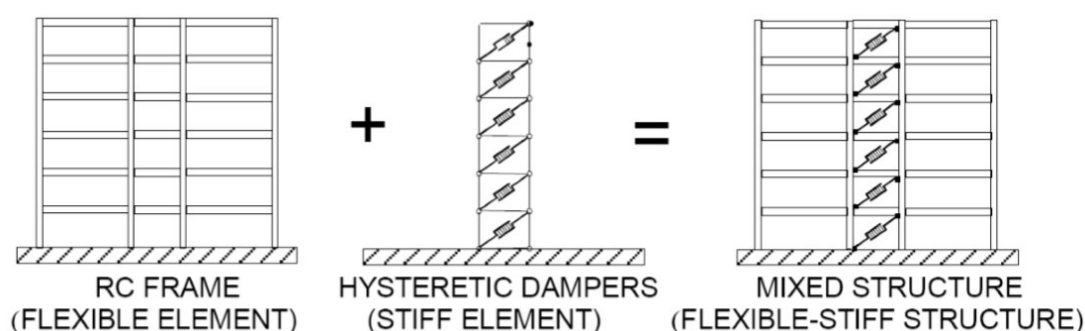
Nota. Extraído de Proyecto de Estructuras con Disipadores Dependientes del Desplazamiento Según Nueva Norma Española EN 1998, por Benavent (2024).

El elemento flexible debe tener relativamente baja rigidez lateral y elevada capacidad de deformación en el rango elástico. Al elemento rígido se le exige baja resistencia, elevada rigidez lateral (de forma que su desplazamiento de fluencia sea menor que el del elemento flexible), y elevada capacidad de deformación plástica. Estudios previos (Akiyama, 1985; Akiyama 2003) han puesto de manifiesto las ventajas de este tipo de estructuras: (i) se separa la función de soportar cargas gravitatorias de la función de disipar energía; (ii) el coeficiente de deformación plástica acumulada en cada planta en el dominio positivo y negativo son aproximadamente iguales, con lo cual la deformación plástica remanente cuando termina el terremoto es muy pequeña; (iii) se concentran las deformaciones plásticas (daño estructural) en el elemento rígido; (iv) incrementa notablemente la eficiencia del sistema desde el punto de vista de capacidad para disipar energía en relación al desplazamiento máximo.

El concepto de sistema mixto rígido-flexible se puede materializar en estructuras porticadas tal y como se ilustra en la Figura 16.

Figura 16

Sistema de estructura mixta rígido-flexible en estructuras porticadas

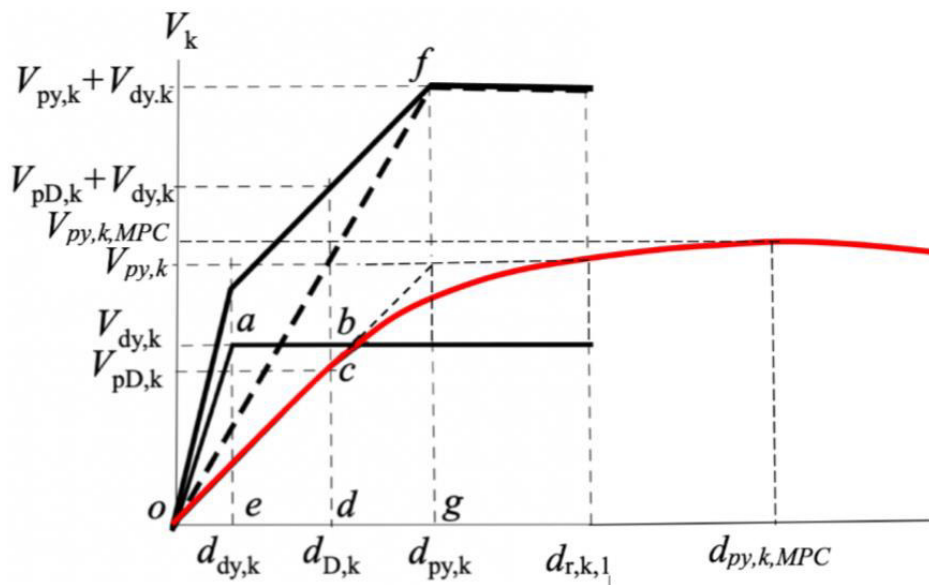


Nota. Extraído de Proyecto de Estructuras con Disipadores Dependientes del Desplazamiento Según Nueva Norma Española EN 1998, por Benavent (2024).

La resistencia de las plantas se puede medir con la capacidad que tienen a resistir las fuerzas cortantes (cortantes). La Figura 17 muestra la relación entre cortante y desplazamiento entre las diferentes plantas de una estructura que se debe considerar para en una metodología de balance de energía.

Figura 17

Relación entre cortante y desplazamiento de una planta k según balance de energía



Nota. La resistencia de estructura principal V_p idealizada más la resistencia de la estructura de disipación V_d equivale a la resistencia de la estructura mixta, estas curvas consideran los criterios de metodología del balance de energía. Por Benavent (2024).

2.11. Registros Sísmicos en Perú

Los registros sísmicos disponibles generalmente provienen a partir de datos captados por acelerógrafos, los cuales generan acelerogramas que representan las aceleraciones, desplazamientos o velocidades del suelo inducidas por terremotos en función del tiempo.

Para el proceso de selección de los registros sísmicos, se emplearán aquellos disponibles en la base de datos del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de

Desastres (CISMID), así como los proporcionados por la Red Acelerográfica de la UPG-FIC-UNI. En la Figura 18 se muestra varios registros sísmicos extraídos de la base de datos del CISMID.

Figura 18

Registros de sismos del CISMID

Menu

BUSCAR

Registros de aceleración

Leyenda

Red Acelerográfica del CISMID - REDACIS

Red Acelerográfica de SENCICO - REDASEN

Red Acelerográfica de PG-FIC-UNI - CITDI

Estaciones inactivas

Red de Monitoreo de Edificaciones - REMOED

Magnitud (M):

> 7.0

5.0 - 7.0

4.0 - 5.0

Entidades

Instituciones participantes

SENCICO

IMCA

INICTEL-LIMA

Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID/FIC/UNI

MAPA

REGISTROS

DETALLES

Base de datos de registros de aceleración:

Filtro

En este cuadro de búsqueda puede filtrar ingresando fecha, lugar o magnitud.

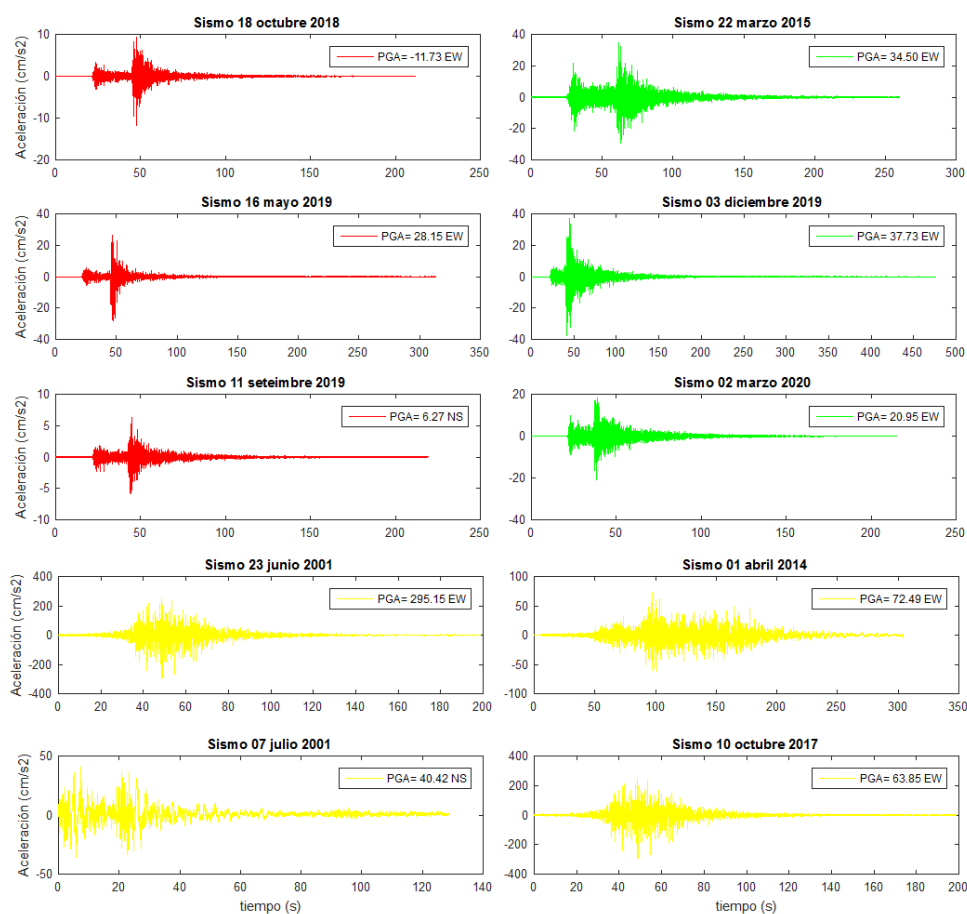
Filtrar

Limpiar

Fecha	Hora local (UTC-5)	Lugar de referencia	Magnitud
2023-03-30	02:26:35	51 km al S de Salaverry, Trujillo - La Libertad	M 3.9
2023-03-29	16:08:41	58 km al SO de Casma, Casma - Ancash	M 4.1
2023-03-29	01:38:57	32 km al SO de Huanca Sancos, Sancos - Ayacucho	M 4.8
2023-03-27	15:13:13	40 km al SE de Puerto Bermudez, Oxapampa - Pasco	M 4.6
2023-03-25	15:23:16	20 km al O de Mollendo, Islay - Arequipa	M 4
2023-03-25	11:27:13	146 km al S de Atico, Caraveli - Arequipa	M 4.5
2023-03-24	08:17:33	12 km al SE de Atico, Caraveli - Arequipa	M 3.7
2023-03-20	22:37:10	78 km al O de Provincia Constitucional del Callao, Callao - Lima	M 3.6
2023-03-20	20:24:49	65 km al S de Ilo, Ilo - Moquegua	M 4.1
2023-03-20	14:01:00	23 km al S de Chala, Caraveli - Arequipa	M 4.9
2023-03-20	08:39:53	43 km al SO de Tacna, Tacna - Tacna	M 4
2023-03-19	10:15:20	103 km al E de Yurimaguas, Alto Amazonas - Loreto	M 4.3
2023-03-19	03:14:41	21 km al NO de Moquegua, Mariscal Nieto - Moquegua	M 4
2023-03-18	12:12:52	85 km al NE de Zarumilla, Zarumilla - Tumbes	M 6.7
2023-03-17	22:41:44	59 km al N de Atalaya, Atalaya - Ucayali	M 4.6
2023-03-17	11:12:02	18 km al S de Casma, Casma - Ancash	M 4
2023-03-17	10:33:26	78 km al SO de Huarmey, Huarmey - Ancash	M 4.2

Nota. Últimos sismos registrados en Perú, con su respectiva magnitud. Obtenida de la página web del CISMID <http://www.cismid.uni.edu.pe/ceo/s/red/>

El registro sísmico, comúnmente llamado acelerograma, es una representación gráfica en función del tiempo de la aceleración que el suelo experimenta en un punto específico durante un terremoto. Los acelerogramas presentan un comportamiento altamente irregular y oscilatorio, caracterizado por amplitudes inicialmente pequeñas que aumentan rápidamente hasta alcanzar valores máximos, para luego disminuir de forma abrupta hasta el cese del evento sísmico. En la Figura 19 se visualiza la representación de los acelerogramas en el dominio del tiempo.

Figura 19*Representación de registros sísmicos*

Nota. En la figura se resalta el sismo ocurrido el 23 de junio 2001, debido a que presentó un PGA elevado, alcanzando un valor de 295.15 m/s^2 .

2.11.1. Magnitud sísmica

La magnitud representa una medida cuantitativa de la energía liberada durante un sismo. Para obtener una valoración objetiva de dicha magnitud, es indispensable el uso de instrumentos apropiados, como sismógrafos y acelerógrafos. Independientemente de la ubicación de estos dispositivos respecto al epicentro, el valor de la magnitud tiende a mantenerse constante. No obstante, un mismo evento sísmico puede presentar múltiples niveles de intensidad, los cuales disminuyen conforme aumenta la distancia al epicentro. Existen diversas escalas para cuantificar la magnitud de los sismos, entre las más relevantes se

encuentran: la magnitud local, la magnitud superficial, la magnitud de ondas de cuerpo y la magnitud momento.

2.11.2. Magnitud momento M_w

Las escalas de magnitud mencionadas anteriormente son empíricas y se basan en mediciones instrumentales de las características del movimiento del suelo. Sin embargo, el aumento en la energía liberada durante un sismo no siempre se refleja proporcionalmente en las características del movimiento del suelo. En eventos sísmicos de alta intensidad, las mediciones de estas características tienden a volverse menos sensibles al tamaño real del sismo, produciendo una saturación en ciertas magnitudes. Por ejemplo, la magnitud de Richter y la magnitud m_b presentan saturación entre valores de 6 y 7, mientras que la magnitud de superficie alcanza saturación alrededor de magnitud 8.

Para la caracterización de sismos de gran magnitud, es preferible emplear una escala que no dependa del nivel del movimiento del suelo y, por ende, que no presente saturación. La única escala que cumple con esta condición es la magnitud momento (Kanamori, 1977; Hanks y Kanamori, 1979). La magnitud M_w se basa en el momento sísmico, que representa una medida directa de los factores que generan la ruptura a lo largo de una falla, y se define mediante la siguiente expresión:

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7 \quad (13)$$

Donde M_0 es el momento sísmico en dinas-cm y está dado por:

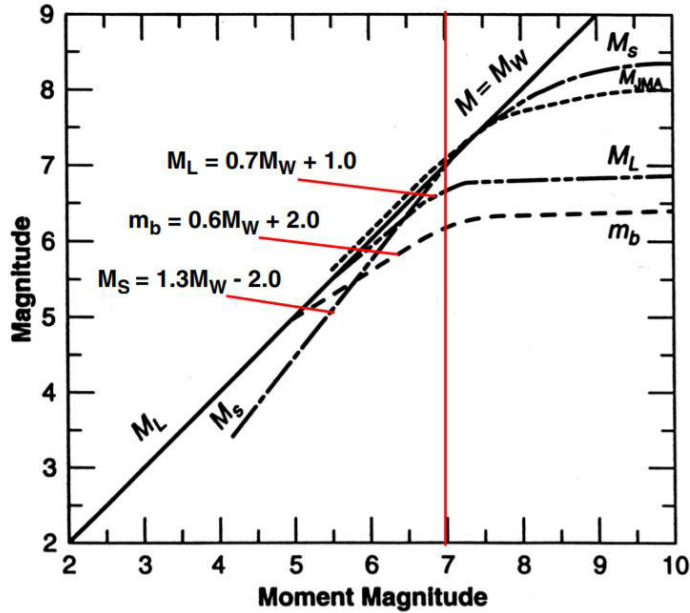
$$M_0 = \mu A \check{D} \quad (14)$$

Donde μ representa la resistencia al esfuerzo cortante del material a lo largo de la falla, A corresponde al área de ruptura, y \check{D} es el desplazamiento producido.

La Figura 20 presenta un gráfico que compara las magnitudes m_b , M_S , M_L y M_W .

Figura 20

Relación entre M_W y las escalas de magnitud M_S , m_b y M_L



Nota. La magnitud M_W actualmente es la más usada para definir sismos de magnitudes mayores a 5.0. Figura extraída de Idriss (1985).

2.11.3. Índice Sismológico ID

Para la clasificación de los registros sísmicos, además de considerar la distancia epicentral, se empleará el índice sismológico IDIDID propuesto por Cosenza y Manfredi (1997). Este índice se define de la siguiente forma:

$$I_D = \frac{\int_0^{t_0} \ddot{u}_g^2(t) dt}{PGA \cdot PGV} \quad (15)$$

donde $\ddot{u}_g(t)$ representa la aceleración del suelo, PGA es la aceleración máxima registrada, PGV corresponde a la velocidad máxima del registro, t es el tiempo, dt es el incremento diferencial de tiempo del registro, t_0 es la duración total del terremoto.

2.11.4. Impulsividad

Se empleará la clasificación basada en el método cuantitativo propuesto por Pamela - Reinoso et al. (2013), que se enfoca en el análisis de la trayectoria de la historia temporal de velocidades obtenidas mediante la integración de las aceleraciones registradas por los instrumentos sísmicos. Este método también puede aplicarse a registros de aceleración y desplazamiento.

Este procedimiento clasifica los registros sísmicos como impulsivos o no impulsivos según su índice de impulsividad, el cual se determina utilizando la siguiente ecuación (16).

$$I_p = \frac{Ld_v}{PGV} \quad (16)$$

Donde I_p es el índice de impulsividad, Ld_v es la longitud desarrollada de velocidad.

La Ld_v se determina con la siguiente ecuación (17).

$$Ld_v = \sum_1^n \sqrt{\Delta t i^2 + \Delta v i^2} \quad (17)$$

Donde Δt es el paso del tiempo de la señal sísmica, Δv es el incremento de velocidad para cada paso del tiempo, n es el número de datos del registro. De esta manera se obtiene el índice de impulsividad, el cual se contrasta con la Tabla 1 y se clasifica el sismo.

Tabla 1

Clasificación del índice de impulsividad

I_p	Clasificación
$I_p < 12$	Fuertemente impulso
$12 < I_p < 20$	Impulsivo
$20 < I_p < 30$	Moderadamente impulsivo
$I_p > 30$	No impulsivo

Nota. Identificación de registros sísmicos impulsivos para uso en ingeniería estructural, según Pamela - Reinoso et al (2013)

2.12. Respuesta Sísmica de Edificaciones

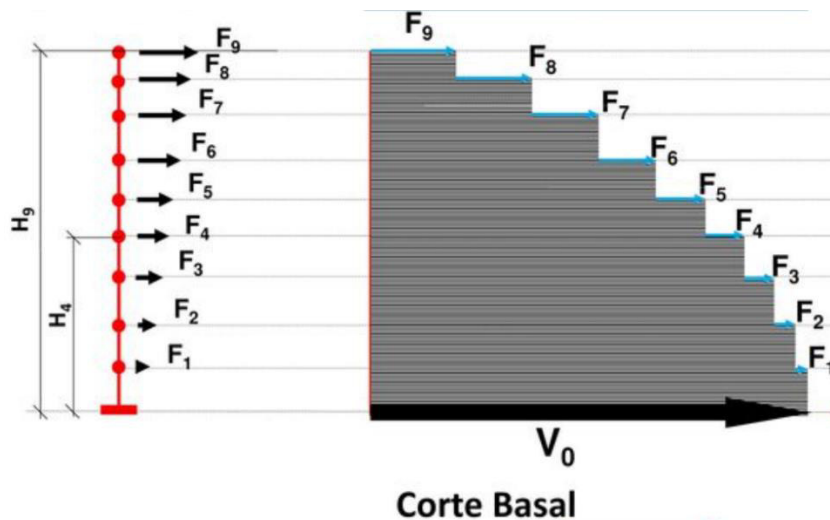
La respuesta sísmica de edificaciones puede tener diferentes puntos de vista para dar a conocer un concepto, para la investigación se considera como respuesta sísmica de las diferentes estructuras, la fuerza cortante basal, desplazamientos laterales y derivas de entrepiso, los cuales servirán para analizar cuál de las estructuras posee una mejor respuesta ante la venida de los sismos.

2.12.1. Fuerza Cortante Basal

La fuerza cortante basal en una edificación es la acumulación progresiva de las fuerzas cortantes de cada piso, el cual se refleja en la base del mismo. Estos cortantes en cada piso no son más que la aplicación de la fuerza sísmica en un nivel determinado y que se va acumulando a medida que nos vamos acercando a la base, como se ve en la Figura 21. Este procedimiento es muy útil cuando las edificaciones son regulares en todo aspecto (elevación, cargas y plantas).

La finalidad de determinar esta fuerza cortante es para poder distribuir la fuerza sísmica que se acumula en la base en los pórticos, en cada uno de los niveles y así ir viendo los esfuerzos logrados con estas cargas con la finalidad de diseñar los pórticos para que sean resistentes a sismos.

La resistencia lateral de cada entrepiso, se expresa en la rigidez lateral, esta rigidez o resistencia son aportados por las columnas, muros de albañilería y/o muros de concreto para estructuras convencionales, el cual deben tener la capacidad de resistir las fuerzas de corte producidas debido a las acciones sísmicas.

Figura 21*Diagrama de distribución de fuerza cortante*

Nota. La distribución de fuerza cortante aumenta gradualmente de la parte superior a la base de la edificación. Por Espejo (2017).

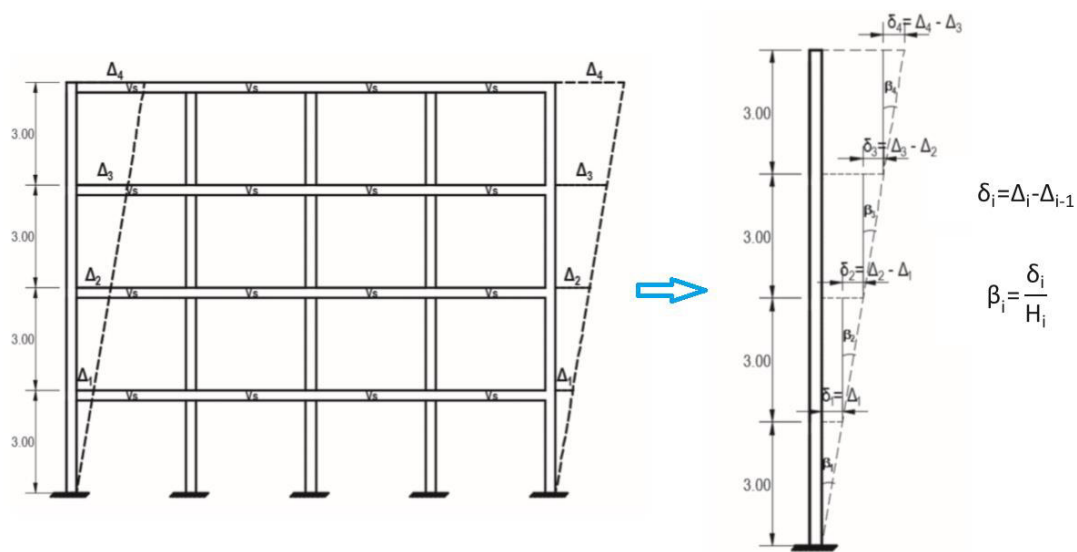
2.12.2. Desplazamientos y Distorsiones de Entrepiso

Son los desplazamientos horizontales que presenta la edificación por niveles, cuando la edificación está sometida a fuerzas horizontales como cargas de sismo, de viento o cualquier fuerza que provoque movimiento horizontal en la edificación. Los desplazamientos o deformaciones deben estar controlados y limitados, ya que estos causan daños en los elementos estructurales y no estructurales de una edificación.

Se tienen dos tipos de desplazamientos de entrepiso, los desplazamientos absolutos o totales Δ_i y los desplazamientos relativos δ_i , como se muestra en la Figura 21.

La deriva de entrepiso o distorsión horizontal β_i , es el cociente entre el desplazamiento relativo entre dos niveles consecutivos δ_i y la altura que los separa H_i .

En la Figura 22 se observa el procedimiento y cálculo de las distorsiones (o derivas) de entrepiso.

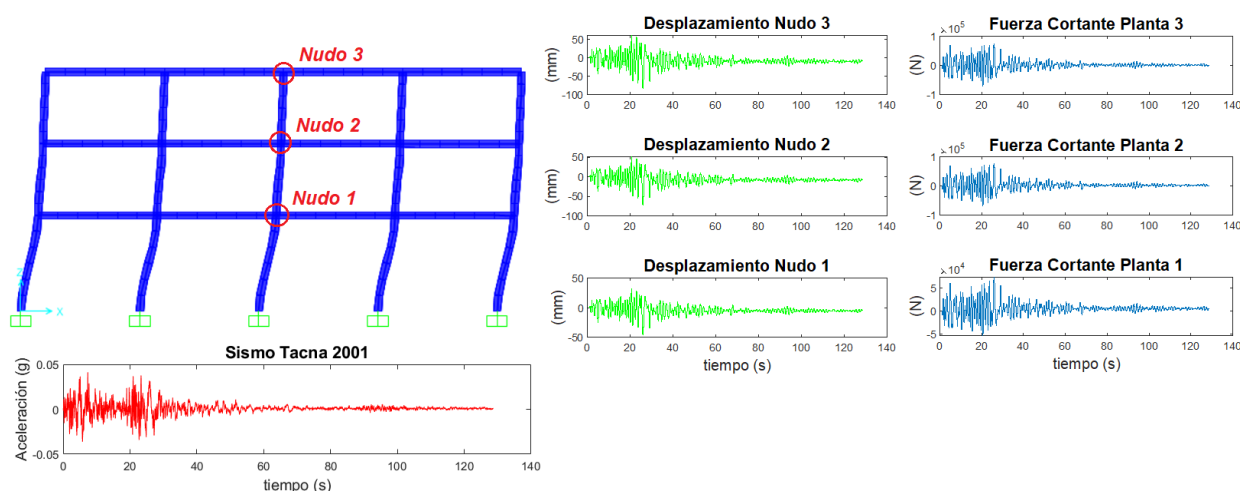
Figura 22*Desplazamientos y distorsiones de entrepiso*

Nota. Según norma E.030 las distorsiones están limitadas para un buen desempeño sísmico, de acuerdo al sistema estructural de la edificación.

2.12.3. Respuestas Dinámicas Ante Acción Sísmica

Cuando ocurren acciones dinámicas como los sismos, se generan respuestas en las estructuras como desplazamientos, velocidades, aceleraciones, fuerzas internas, esfuerzos en cualquier punto o elemento de la estructural

En la Figura 23 se observa respuesta de desplazamiento y fuerzas de corte de los entrepisos de la estructura. Las respuestas dependen principalmente de la configuración estructural, masas y rigidez lateral de la edificación.

Figura 23*Respuestas de edificación ante sismo*

Nota. Con las historias de respuesta de desplazamientos y fuerzas de corte se pueden obtener las curvas de histéresis de las plantas.

2.12.4. Distorsión o Deriva β que Colapsa la Estructura

Una de las variables más empleadas para correlacionar el nivel de daño en edificaciones frente a eventos sísmicos es la deriva de piso β . Por ejemplo, el comité VISION 2000 propone la siguiente clasificación. Cuando $\beta < 0.002$ no se espera daño estructural; si $0.002 < \beta < 0.005$ el daño esperado es leve; si $0.005 < \beta < 0.015$ el daño es moderado; si $0.015 < \beta < 0.025$ el daño es extensivo y cuando $\beta > 0.25$ se asume un daño estructural completo. Se aprecia más detalle en la Tabla 2.

La deriva β de colapso no es un valor único, sino dependiente de múltiples factores, y representa una frontera crítica entre comportamiento severamente dañado y colapso total de la estructura.

Tabla 2*Relación entre deriva de piso y daño*

Sistema estructural	Agrietamiento considerable	Inicio de la fluencia	Colapso incipiente
Marcos dúctiles de concreto reforzado ($\mu= 3$ o 4)	0.005	0.010	0.030
Marcos de concreto de ductilidad limitada ($\mu= 1$ o 2)	0.005	0.010	0.015
Losas planas sin muros o contravientos	0.005	0.008	0.015

Nota. Para las 3 edificaciones analizadas en la presente investigación de forma conservadora se considera deriva de colapso 0.015. Extraído de SEAOC (1995), Vision 2000.

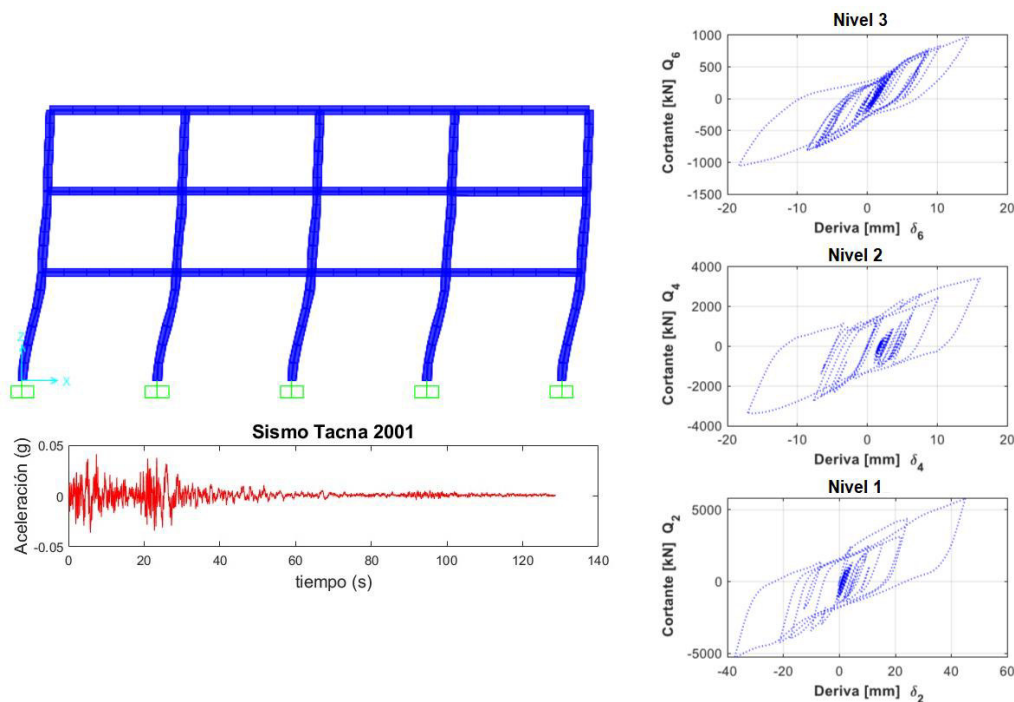
2.13. Curva Histerética y Energía

La curva histerética de interés es la representación de la respuesta no lineal de desplazamientos y fuerza cortante de la estructura, para cada entrepiso, esto se puede observar en la Figura 24. Por otro lado, la distribución de energía sísmica en cada planta, se determina calculando la suma de las áreas de las curvas histeréticas de cada planta. En la metodología de Análisis sísmico considerando la distribución de energía, según el Proyecto de Estructuras con Disipadores Dependientes del Desplazamiento Nuevo EN 1998, se puede controlar cuan seguro sea la estructura a proyectar para obtener una óptima distribución de energía. Existen diversos métodos para calcular estas áreas, energías, se podría emplear el método numérico de Trapecio.

Las curvas histeréticas son esenciales para evaluar la capacidad estructural bajo demandas sísmicas cíclicas severas. Su análisis permite verificar si una estructura tiene capacidad de disipación de energía suficiente, posee un modo de falla progresivo y controlado, cumple con los requisitos de ductilidad y estabilidad post-elástica definidos por normativas como ASCE 41 o FEMA 356.

Figura 24

Curvas histeréticas de la estructura



Nota. Generalmente la distribución de energía sísmica va disminuyendo a medida que vamos subiendo de planta en la edificación.

2.14. Distribución de Resistencia Óptima Según Proyecto de Nuevo EN 1998

El paso previo es obtener la resistencia lateral (fuerza de corte) de cada planta de la estructura principal V_{pyk} , haber pre dimensionado y obtenido la resistencia lateral de la estructura de disipadores V_{dyk} . Para determinar estas resistencias, se debe considerar los siguientes criterios:

- El desplazamiento de fluencia de los disipadores debe ser menor o igual a 40% del desplazamiento de fluencia de la estructura principal EP.
- La resistencia máxima de los disipadores de cada planta sea menor a la resistencia máxima de la EP.

- La rigidez del disipador debe ser mayor que la rigidez de la EP.

Un ejemplo de tomar en cuenta estos criterios, el cálculo se observa en la Tabla 3 y se representa las resistencias en la Figura 25.

Tabla 3

Dimensionado de disipadores de estructura

Planta	m_k (kN s ² /mm)	M	h_k (mm)	d_{rk} (mm)	d_{pyk} (mm)	V_{pyk} (kN)	K_{pk}
1	0.477	1.235	4500.00	67.50	22.50	1250.00	55.56
2	0.471		3000.00	45.00	8.00	1020.00	127.50
3	0.288		3000.00	45.00	10.00	640.00	64.00

Planta	$d_{dyk} \leq 0.4 d_{pyk}$	$V_{dyk} \leq V_{pyk, MPC}$	K_{dk}
1	9.00 OK	1200.00 OK	133.33
2	3.20 OK	920.00 OK	287.50
3	4.00 OK	380.00 OK	95.00

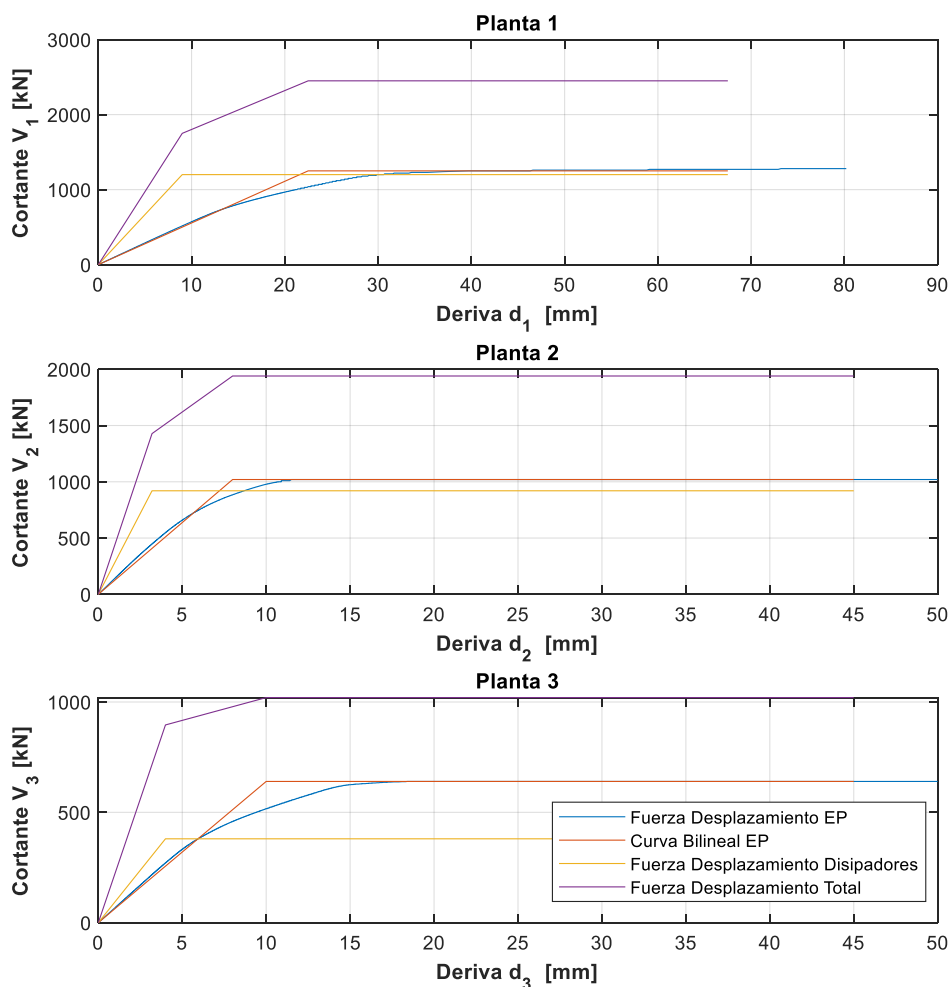
Planta	θ°	$K_{dk}/(\cos\theta^\circ)^2$	$V_{dyk}/\cos\theta^\circ$	Nº disp.	K_{Dk} (kN/mm)	V_{Dk} (kN)	K_k (kN/mm)
1	42.00	241.43	1614.76	8.00	30.179	201.845	188.89
2	31.00	391.30	1073.30	8.00	48.912	134.163	415.00
3	31.00	129.30	443.32	8.00	16.162	55.415	159.00

Nota. El subíndice k se refiere al número de planta. Para todos los cálculos el estudio considera unidades en sistema internacional SI.

En la Tabla 3 m_k es la masa de cada planta; M es la masa total de la estructura; h_k es altura de entrepiso de cada planta; d_{rk} es la distorsión máxima de la estructura principal calculado con un 1.5% de h_k ; d_{pyk} es el desplazamiento de fluencia de la EP; V_{pyk} es la resistencia máxima de cada planta de la EP; K_{pk} es rigidez elástica de cada planta de la estructura principal; d_{dyk} es el desplazamiento de fluencia de los disipadores de cada planta; V_{dyk} es la resistencia máxima de los disipadores de cada planta; K_{dk} es rigidez elástica de cada planta de los disipadores; θ es el ángulo de inclinación de los disipadores de cada planta; K_{Dk} es la rigidez de cada disipador en dirección axial del disipador; V_{Dk} es la resistencia de cada disipador en dirección axial del disipador; K_k es la rigidez total de cada planta de la estructura.

Figura 25

Curvas de Resistencia de la Estructura Principal, Disipadores y Mixta



Nota. En la figura se observa un comportamiento elastoplástico perfecto de los disipadores.

Conocido la rigidez total K_k y masa m_k de cada planta, se puede determinar el periodo fundamental de vibración de la estructura T_1 .

Luego, para que una estructura tenga una distribución de resistencia optima, es necesario calcular los siguientes parámetros:

El coeficiente de distribución resistencia lateral optima $\bar{\alpha}_{k,opt}$ de cada planta se determina con las ecuaciones:

$$\bar{m}_k = \sum_{j=k}^N \frac{m_j}{M} \quad (18)$$

$$\bar{\alpha}_{k,opt} = 1 + \left[\frac{1}{\sqrt{\bar{m}_k}} - \bar{m}_k \right] \cdot \frac{2T_1}{1+3T_1} \quad (19)$$

Donde m_j es la masa de cada planta, M la masa total de la estructura, el \bar{m}_k es un coeficiente de la relación del sumatorio de masas por encima de la planta k .

El coeficiente de distribución resistencia lateral de la estructura $\bar{\alpha}_k$ de cada planta se determina con las ecuaciones:

$$\alpha_k = \frac{(V_{pyk} + V_{dyk})}{\bar{m}_k \cdot M \cdot g} \quad (20)$$

$$\bar{\alpha}_k = \frac{\alpha_k}{\alpha_1} \quad (21)$$

Donde α_k es el coeficiente de resistencia lateral de cada planta, g es la aceleración de la gravedad. Una forma del procesamiento de las ecuaciones antes mencionadas, se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4

Distribución de resistencia optima

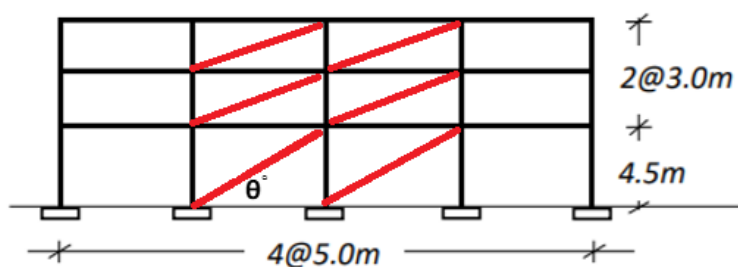
Coeficiente de resistencia optima			Coeficiente de resistencia de N3		
Planta	\bar{m}_k	$\bar{\alpha}_{k,opt}$	α_k	$\bar{\alpha}_k$	
1	1.000	1.00	0.202	1.00	100%
2	0.614	1.29	0.261	1.29	100%
3	0.233	1.79	0.362	1.79	100%

Nota. En la tabla se verifica que la distribución de resistencia de la estructura $\bar{\alpha}_k$ es 100% equivalente a la distribución de resistencia optima $\bar{\alpha}_{k,opt}$.

Dimensionado los disipadores y verificado que la estructura tiene una distribución de resistencia optima en cada una de sus plantas, se idealiza la nueva estructura mixta, el cual se observa en la Figura 26.

Figura 26

Estructura mixta idealizada

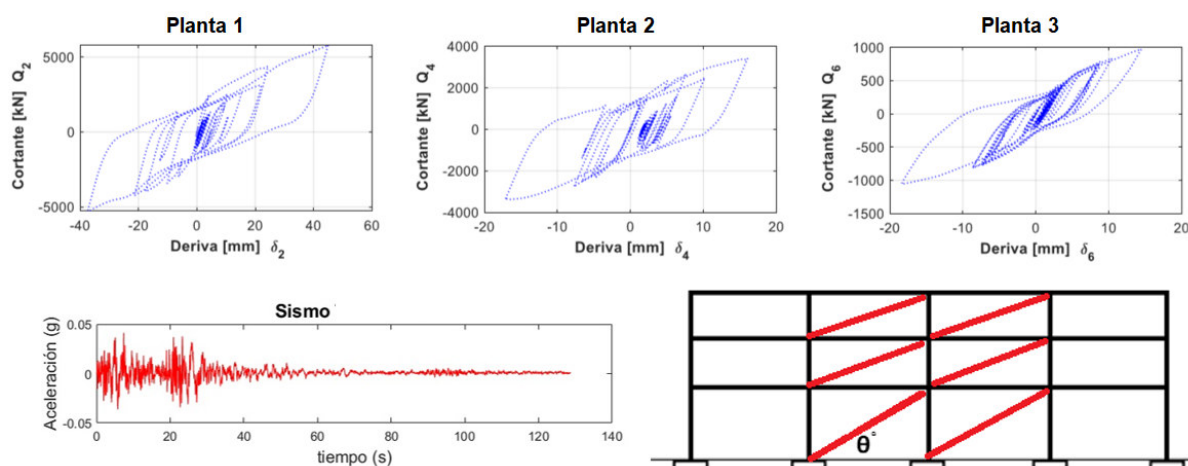


Nota. La estructura mixta es la fusión de la EP y la estructura de disipadores ya dimensionados con el $\bar{\alpha}_{k,opt}$. Según Mota (2017)

Luego, se realiza el análisis no lineal dinámico y se obtienen las curvas histeréticas de Resistencia (fuerzas de corte) versus desplazamientos relativos (Distorsión o deriva) para cada registro sísmico que se desee evaluar, un ejemplo de estas curvas histeréticas se muestran en la Figura 27.

Figura 27

Ejemplo de curvas histeréticas de estructura



Nota. En la parte superior de la figura se muestra las repuestas no lineales de cada planta de la estructura sometida a una carga sísmica.

Obtenidas las curvas histeréticas de la estructura, se puede determinar la energía en cada planta E_k , mediante algún método numérico de cálculo de área de estas curvas, un algoritmo a usar podría ser el Método del Trapecio.

Por otro lado, Las formulas siguientes son propuestas por Akiyama para predecir la distribución de energía en plantas.

$$s_k = (\bar{\alpha}_{k,opt} \cdot \bar{m}_k)^2 \frac{K_1}{K_k} \quad (22)$$

$$p_k = \frac{\alpha_k}{\alpha_{k,opt}} \quad (23)$$

$$p_{t,k} = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{for } \left(\frac{e_{ox}}{r_x}\right) \leq 0,15 \\ 1,15 - \left(\frac{e_{ox}}{r_x}\right) & \text{for } 0,15 \leq \left(\frac{e_{ox}}{r_x}\right) < 0,30 \\ 0.85 & \text{for } \left(\frac{e_{ox}}{r_x}\right) \geq 0,30 \end{array} \right\} \quad (24)$$

$$\frac{E_{H,k}}{E_H} = \frac{s_k (p_k p_{t,k})^{-n}}{\sum_{l=1}^N s_l (p_l p_{t,l})^{-n}} \quad (25)$$

Donde s_k es un nuevo coeficiente de distribución de la energía de deformación plástica entre plantas cuando la distribución de resistencia es la óptima; p_k es un coeficiente de la desviación de resistencia de una planta k respecto al valor óptimo; $p_{t,k}$ es 1 cuando no se consideran excentricidad en la planta; $E_{H,k}$ es la demanda de disipación de energía de deformación plástica en la planta k ; E_H representa la cantidad total de energía disipada de la estructura; y n es el valor del coeficiente de daño.

Con la verdadera distribución de energía sísmica que se muestra en la Figura 27, se puede comparar con la predicción de distribución de energía, propuesta por Akiyama.

III. MÉTODO

3.1. Tipo de Investigación

Se adoptó el método deductivo, debido a que se basa en un proceso lógico que permite derivar conclusiones a partir de principios o premisas. La investigación posee una orientación básica, porque se relacionan dos variables. Se utilizó el enfoque cuantitativo, caracterizado por la recopilación, análisis e interpretación de datos numéricos con el propósito de responder al problema de investigación. Este enfoque se distingue por medir valores cuantificables. La recolección de datos es retrolectivo y prolectiva, debido a que la investigación obtiene datos de fuentes existentes y además define instrumentos de recolección de datos.

El tipo de investigación es explicativo porque la investigación comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de los resultados obtenidos, además encuentra la relación entre las variables.

3.2. Población y Muestra

Sanchez y Reyes (2015), la población es un grupo o conjunto de personas, objetos, situaciones, del cual se realiza la investigación de acuerdo a una característica particular.

La población está constituida por todas las estructuras de concreto armado de sistema estructural de pórticos en la ciudad de Tacna, se tomó como muestra 3 edificaciones de 3, 6 y 9 niveles, realizando un muestreo no aleatorio y por conveniencia, ya que la investigación se desarrolla en el campo de Ingeniería civil, específicamente ingeniería sismorresistente, además, para los análisis se seleccionaron registros sísmicos del CISMID., donde se consideró los siguientes criterios de inclusión y exclusión:

- Los registros sísmicos con magnitud mayor o igual a 6,0 Mw.
- Los registros sísmicos más importantes en la historia sísmica del Perú.

Considerando el criterio de inclusión y exclusión, la población de registros sísmicos es de 27 registros.

Para el cálculo de numero de registros, se realizará el procedimiento general, el cual se empleará la formula finita de cálculo muestral, conociendo la población N, la cual será calculada al 95% de confiabilidad y 5 % de error muestral:

$$n = \frac{N \cdot Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}{d^2 \cdot (N - 1) + Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}$$

$Z_{\alpha} = 1.96$ (Nivel de confianza al 95 %)

$N =$ Total de población: 75 registros.

$p = 0.5$ (proporción esperada 50%)

$q = 0.5$ ($1 - p = 0.5$)

$d = 0.05$ (Error muestral o precisión = 5%)

$n =$ Registros sísmicos considerados.

Reemplazando en ecuación anterior, se tiene:

$$n = \frac{27 \cdot (1,96)^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{(0,05)^2 \cdot (27 - 1) + (1,96)^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5} = 25$$

$$n = 25$$

Se considero 25 registros sísmicos, obtenidos del CISMID para el análisis de las 3 estructuras de tipo pórticos.

3.3. Operacionalización de Variables

La operacionalización de las variables se muestra en la siguiente Tabla 5,

Tabla 5

Operacionalización de las Variables

“Distribución de Energía Sísmica en Plantas de Estructuras Prototipo Reforzadas con Disipadores Histeréticos Analizados con Método de Balance Energético en Tacna 2023”					
HIPÓTESIS	VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	ESCALA Y UNIDAD DE MEDICIÓN
Hipótesis General Mediante el análisis no lineal dinámico se obtiene la energía sísmica en las diferentes plantas de estructuras prototipo y estas se distribuyen de acuerdo a la resistencia que ofrecen la estructura principal más la estructura con disipadores histeréticos analizados con método de balance energético en Tacna 2023.	Hipótesis Específicas Realizando un análisis no lineal Pushover se determinan las curvas de capacidad y resistencia de las plantas de estructuras.	VI: Análisis Pushover Mediante la definición de los diagramas esfuerzo deformación de los materiales y la plastificación distribuida secciones fibras de los elementos estructurales se realizará un análisis Pushover a las estructuras.	Esfuerzo deformación de los materiales Longitud plasticidad distribuida sección fibra	Ficha de registro para cada indicador	Numeral continua/ MPa, mm/mm Numeral continua/ en mm.
	VD: Curvas de capacidad	Con apoyo de software se realizará un análisis Pushover y determinarán los desplazamientos y resistencia de los entresijos, con los cuales se obtendrán las curvas de capacidad.	Desplazamientos		Numeral continua/ mm
			Resistencia		Numeral continua/ N
	VI: Método balance de energía	En la investigación se distribuirá de resistencia adecuada a los entresijos de las estructuras prototipo para obtener coeficientes de resistencia óptimos en entresijos basado en el balance de energía.	Distribución de resistencia		Numeral continua/ N
			Coeficiente de resistencia		Numeral continua/ ratio
	VD: Dimensionado de disipadores	Se realizará el diseño sísmico basado en balance de energía con el cual se dimensionará la rigidez y resistencia de los disipadores que se colocarán en cada entresijo de las estructuras prototipo.	Rigidez del disipador		Numeral continua/ N/mm
			Resistencia del disipador		Numeral continua/ N
	VI: Análisis no lineal dinámico	Se seleccionarán acciones sísmicas y se definirá los modelos histeréticos de los materiales de las estructuras prototipo y con apoyo de software se realizará un análisis no lineal dinámico.	Acciones sísmicas		Ordinal/ numérico/ adimensional
			Modelo histerético		Nominal/ A, B y C
			Curvas histeréticas fuerza desplazamiento		Numeral continua/ N, mm
	VD: Energía sísmica	Mediante el análisis no lineal dinámico se obtendrán las historias de desplazamiento y resistencia, se graficarán los ciclos histeréticos de los entresijos de estructuras prototipo y se calcularán la distribución de energía sísmica en cada planta.	Distribución de energía		Numeral continua/ kJ

3.4. Instrumentos

Se utilizará las siguientes técnicas e instrumentos de investigación:

- a. **Análisis documental:** Se revisará y analizará una buena cantidad de documentos acerca del objeto de estudio, entre las cuales tenemos: Textos, revistas, folletos y una gran variedad de material impreso, los cuales nos guiarán en la investigación.

El instrumento que se utilizará es la **ficha de registro de datos (estos se muestran en el Anexo 02)**, donde una vez analizada la información se extraerá conceptos útiles para la investigación, las fichas nos ayudaron en la recolección de información del material escrito en varias investigaciones, constatando la validez de dicha información relacionada al tema con términos técnicos y conceptos implicados en el diseño.

- b. **Observación:** La observación como técnica de recolección de datos, consiste en el uso sistémico de los sentidos orientados a la captación de la realidad que se quiere estudiar y obtener los datos necesarios para dar respuesta a la problemática planteada. En este caso, observar fotografías, planos y detectar el comportamiento de la edificación.

3.5. Procedimientos

El procesamiento de datos se realizará de la forma siguiente:

- a. Se idealizaron tres modelos de edificaciones de 3, 6 y 9 niveles, característicos y típicos.
- b. Se realizó un análisis no lineal Pushover para determinar las curvas de capacidad de cada planta de las estructuras modelos de 3, 6 y 9 niveles.
- c. Se refuerza la estructura principal con disipadores histeréticos dimensionados con metodología de Housner-Akiyama de balance de energía.

- d. Se Seleccionaron 25 registros sísmicos, según parámetros de interés, se escalaron de acuerdo al espectro objetivo o sismo de diseño DBE, se siguieron los criterios de la norma ASCE 7-22 y de la norma E.030. se filtraron 3 sismos que cumplen los criterios, con los cuales se realizó el análisis dinámico tiempo historia, para determinar la respuesta sísmica.
- e. Por otro lado, se emplearon los 25 registros sísmicos seleccionados, los cuales fueron escalados hasta llevar cerca al colapso las estructuras, mediante análisis no lineal dinámico.

3.6. Análisis de Datos

El análisis de datos se realizó de la siguiente forma:

- a. De los 25 sismos, se filtraron 3 registros escalados al sismo objetivo, según recomendaciones de la norma ASCE 7-22. Se obtuvieron respuestas de desplazamientos y distorsiones máximas de los tres modelos de 3, 6 y 9 niveles, tanto para las estructuras con y sin disipadores CRP, se realizó una comparación de respuestas.
- b. De los 25 sismos, todos fueron escalados hasta llevar cerca al colapso los tres modelos de estructuras con disipadores CRP. Se obtuvo la historia de desplazamientos y fuerzas de corte de cada planta, para cada registro sísmico. Luego, mediante integración numérica de las curvas histeréticas, se calculan la energía absorbida en las plantas. Finalmente, se distribuye las ratios de energía en cada planta.

IV. RESULTADOS

4.1. Modelos Analizados

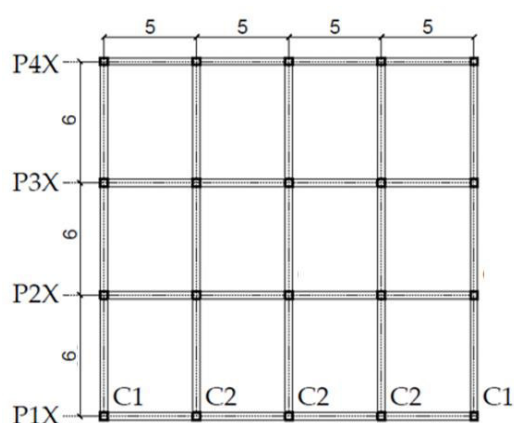
Se analizaron 3 edificaciones de concreto armado que presentan un sistema estructural conformado por pórticos, sistema muy común usado en las décadas antes de nuevo milenio, representan al sistema constructivo empleado en esas décadas y fáciles de visualizar en la ciudad de Tacna, estructuras muy antiguas, que aún están en servicio.

Los códigos de diseño y sistemas estructurales han evolucionado, por tal motivo la necesidad de evaluar estas estructuras típicas y determinar su comportamiento ante las nuevas exigencias sísmicas y su incursión al análisis no lineal.

Posteriormente, se reforzarán con disipadores histeréticos y se volverán a someter y determinar su comportamiento no lineal, para determinar la distribución de energía. Se analizaron 3 edificaciones de 3, 6 y 9 niveles, la planta típica se visualizan en la Figura 28.

Figura 28

Vista en planta de edificaciones analizadas

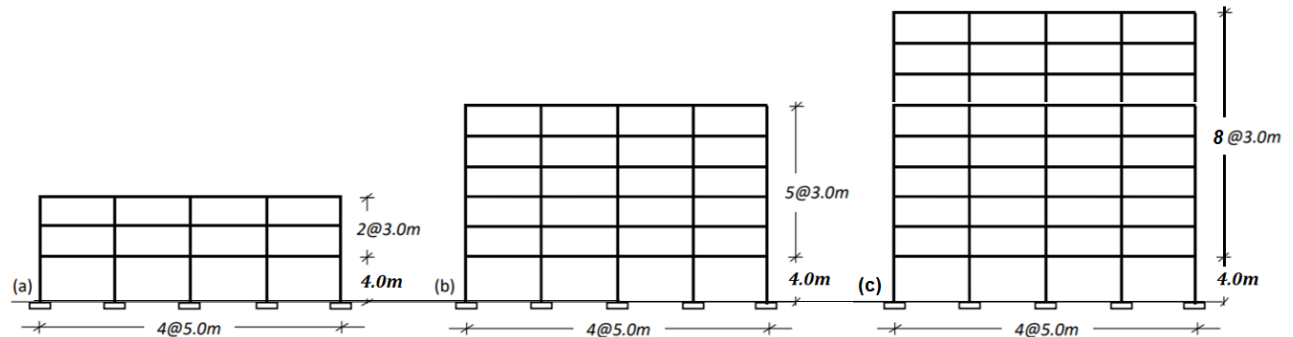


Nota. Es la planta típica para las 3 estructuras a analizar y reforzar con disipadores CRP.

Se idealizaron 1 modelo en el plano del eje más críticos en sentido horizontal, para cada edificación analizada. Los modelos a analizar se muestran en Figura 29.

Figura 29

Modelos a analizar de las 3 edificaciones



Nota. Cada uno de los modelos a analizar mostrados en la figura son ejes centrales de las vistas en planta de las estructuras.

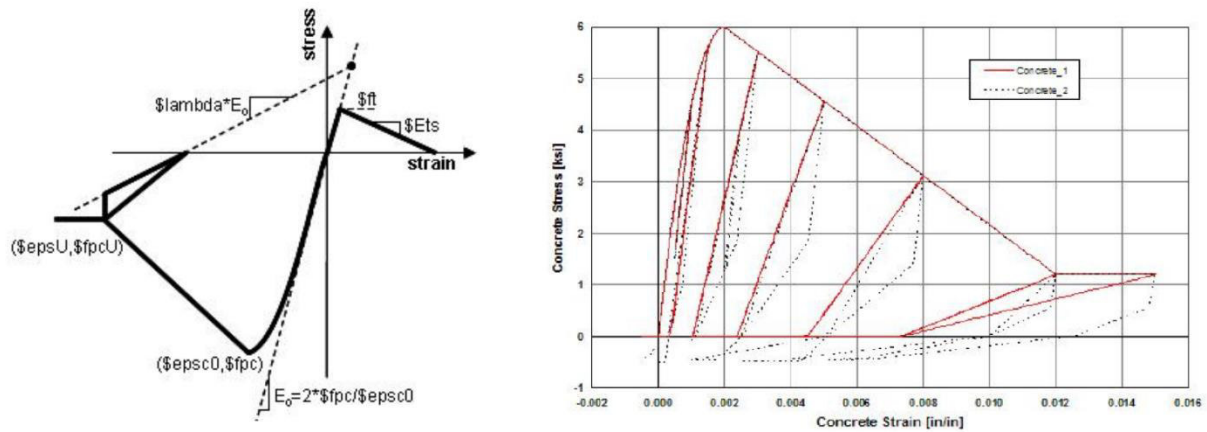
las principales propiedades mecánicas de los materiales de concreto armado de los elementos estructurales de las edificaciones son los siguientes:

- Resistencia del concreto a la compresión (f'_c): 20.60 MPa.
- Peso específico del concreto (γ_c)= 23.54E-6 N/mm³.
- Modulo elástico para concreto de peso normal: E_c = 20.60 GPa.
- Resistencia del acero en el límite elástico (f_y): Grado 60 f_y = 412 MPa.
- Módulo de elasticidad del acero (E_{ac}): 196.20 GPa.
- Coeficiente de Poisson ν =0.2.

Para el concreto se definió el modelo de Mander y para el acero un modelo elastoplástico perfecto, ambos definidos en OpenSeesPy como material uniaxialMaterial (Concrete02) y uniaxialMaterial (Steel02), respectivamente. Estos se muestran en las Figuras 30 y 31.

Figura 30

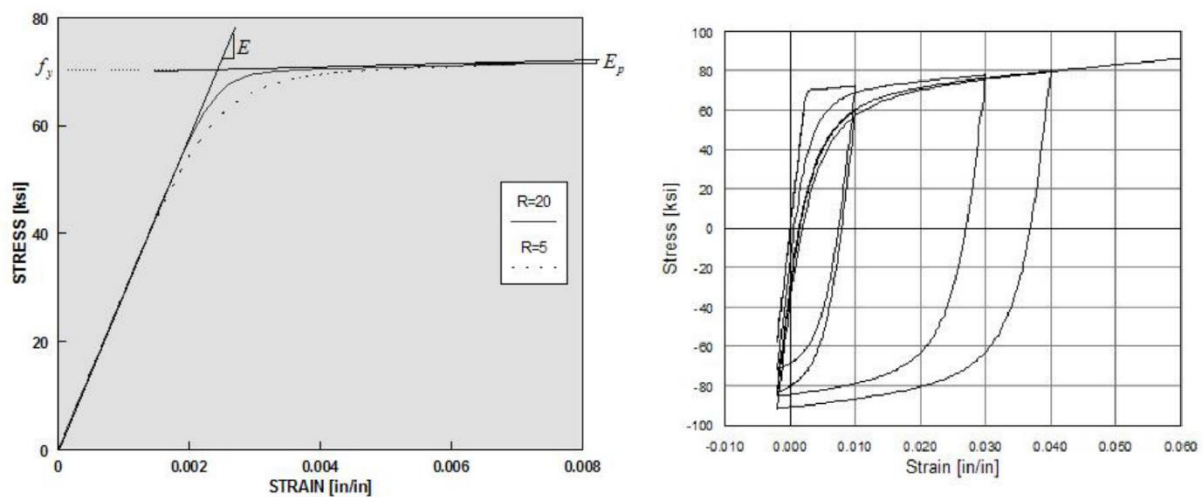
Modelo uniaxialMaterial (Concrete02) según OpenSeesPy



Nota. La figura de la izquierda es el comportamiento del concreto bajo carga monótonas, mientras que figura de la derecha, es el comportamiento del concreto bajo cargas cíclicas. Los parámetros y la figura se encuentran en https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php?title=Concrete02_Material_--_Linear_Tension_Softening

Figura 31

Modelo uniaxialMaterial (Steel02) según OpenSeesPy



Nota. La figura de la izquierda es el comportamiento del acero bajo carga monótonas, mientras que figura de la derecha, es el comportamiento del acero bajo cargas cíclicas. Los parámetros y la figura se encuentran en https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php?title=Steel02_Material_--_Giuffr%C3%A9-Menegotto-Pinto_Model_with_Isotropic_Strain_Hardening

Los modelos analizados se tratan de sistemas estructurales de pórticos, las secciones empleadas para estos pórticos de 3, 6 y 9 niveles se muestran en la siguiente Tabla 6.

Tabla 6

Secciones de elementos para modelos de 3, 6 y 9 niveles

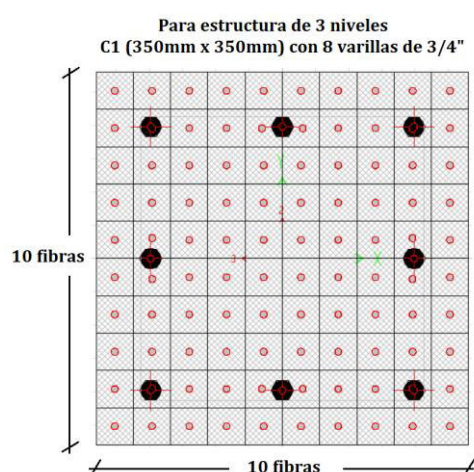
Modelos	Elementos		Planta								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
3 Niveles	Columnas	(mm ²)	350 x 350	350 x 350	300 x 300						
	Vigas	(mm ²)	300 x 600	300 x 600	250 x 500						
6 Niveles	Columnas	(mm ²)	500 x 500	500 x 500	500 x 500	400 x 400	400 x 400	400 x 400			
	Vigas	(mm ²)	300 x 600	300 x 600	300 x 600	300 x 600	300 x 600	250 x 500			
9 Niveles	Columnas	(mm ²)	600 x 600	600 x 600	600 x 600	500 x 500	500 x 500	500 x 500	400 x 400	400 x 400	400 x 400
	Vigas	(mm ²)	300 x 600	300 x 600	300 x 600	300 x 600	300 x 600	300 x 600	300 x 600	300 x 600	250 x 500

Nota. Los pórticos se refieren a edificaciones muy antiguas, donde no se respetaban el criterio de columna fuerte viga débil, tal como se ve en las secciones de la tabla.

Cada sección de los elementos de las estructuras fueron particionadas en 10 fibras en cada dirección de la sección. A cada fibra se le asigna las propiedades mecánicas, comportamiento lineal y no lineal del concreto. Un ejemplo, para la estructura de 3 niveles, para la columna C1 se muestra en la Figura 32.

Figura 32

Sección C1 de estructura de 3 niveles en fibras

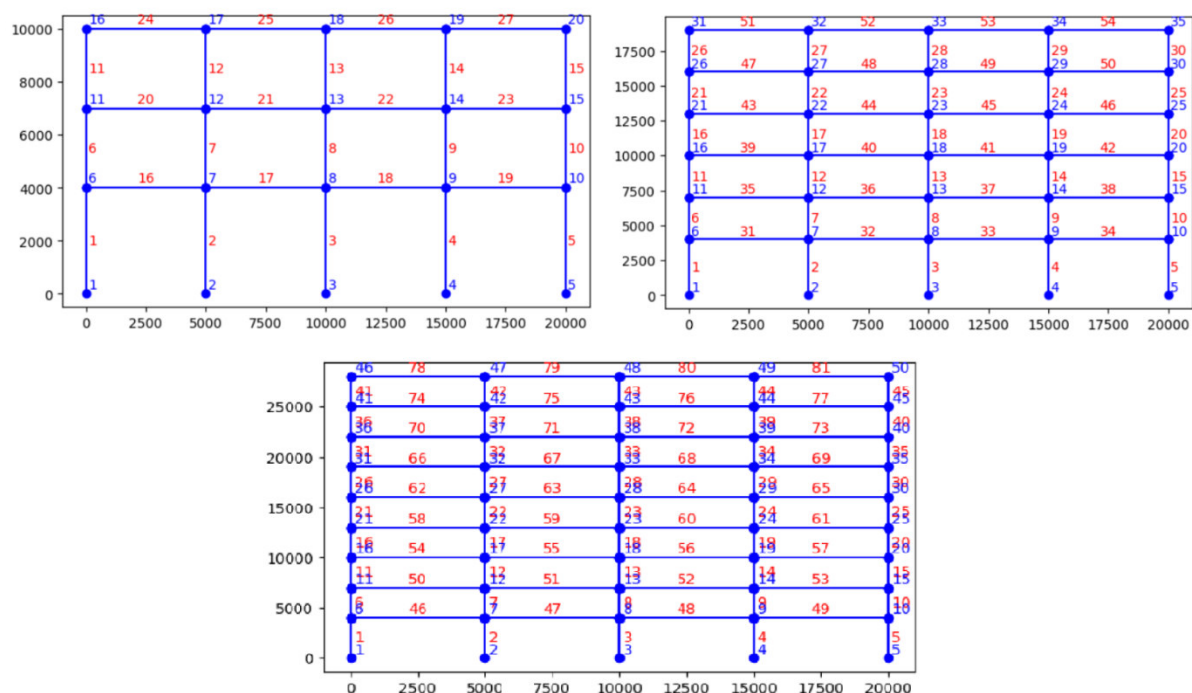


Nota, El tiempo de análisis de las computadoras dependerá del número de partición de las fibras, 10x10 fibras en un número conservador.

Los 3 modelos de las estructuras definidos en OpenSeesPy se muestran en la Figura 33.

Figura 33

Modelos de las estructuras definidas en OpenSeesPy



Nota. La base de todas las edificaciones se consideró puntos empotrados.

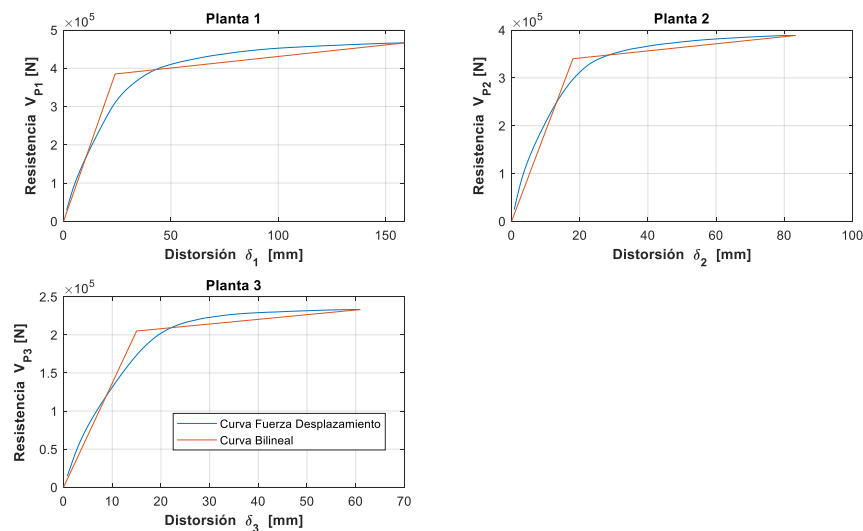
4.2. Análisis No Lineal Estático o Pushover

Las curvas de resistencia o de capacidad de cada estructura (fuerza de corte de la base versus desplazamiento de techo) se obtuvieron realizando un análisis No Lineal Estático o Pushover por control de desplazamientos, empleando OpenSeesPy, que es una librería de Python que ofrece una interfaz para el software de simulación estructural OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation). Las estructuras fueron deformadas hasta considerar el desplazamiento máximo que genere el colapso de cada estructura, de forma conservadora es 0.015 de la altura total de cada edificación, según SEAOC (1995) Visión 2000.

Luego, se obtuvieron las curvas de resistencia para cada nivel de los modelos de 3, 6 y 9 niveles, las cuales se pueden ver en la Figuras 34, 35 y 36.

Figura 34

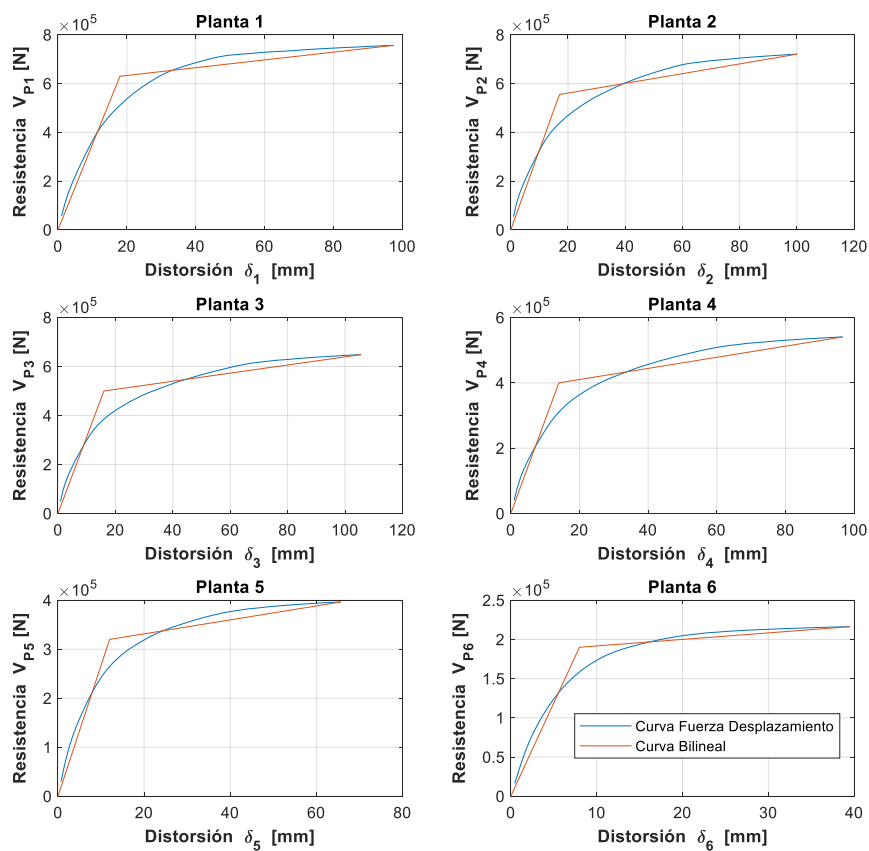
Curvas fuerza desplazamiento e idealización bilineal estructura de 3 niveles



Nota. La idealización de la curva bilineal fue que ambas curvas tengan la misma energía.

Figura 35

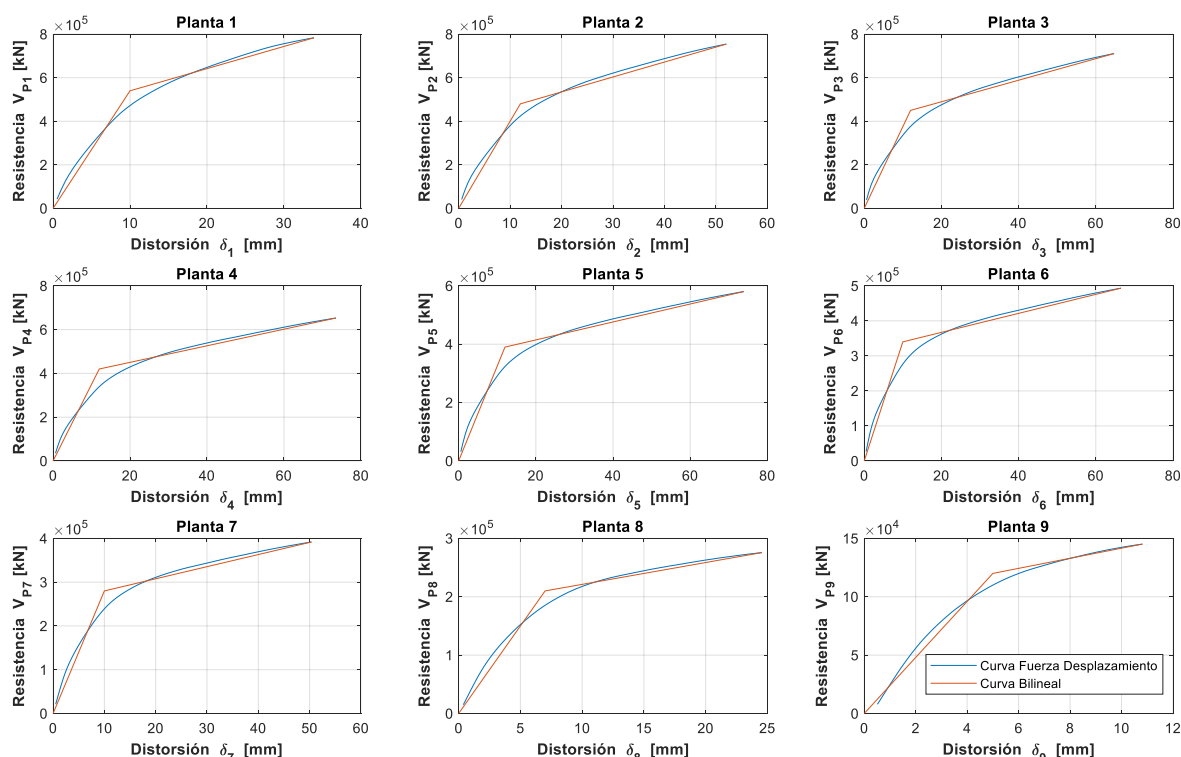
Curvas fuerza desplazamiento e idealización bilineal estructura de 6 niveles



Nota. La idealización de la curva bilineal fue que ambas curvas tengan la misma energía.

Figura 36

Curvas fuerza desplazamiento e idealización bilineal estructura de 9 niveles



Nota. La idealización de la curva bilineal fue que ambas curvas tengan la misma energía.

Donde V_{Pk} es la resistencia o fuerza cortante de cada planta, δ_{Pk} es el desplazamiento relativo o distorsión de cada planta, k indica en número de planta.

Existen diversas formas de idealizar la curva Bilineal de la curva fuerza desplazamiento, para la presente investigación se empleó el método propuesto en principio por la FEMA-273 (1996) y que posteriormente fue sustituido por el de la FEMA-356 (2000). El método consiste en imponer como primera aproximación un cortante de fluencia, el cual se redefine mediante un proceso iterativo de igualación de áreas o energía (área bajo la curva de capacidad e idealizada respectivamente). Es importante señalar, que dicho procedimiento puede aplicarse tanto a la curva pushover global como a la local de cada planta.

4.3. Dimensionado de Disipadores CRP

Para el dimensionado de los disipadores dependientes del desplazamiento se tuvo en consideración los criterios descritos en la presente investigación en los acápites 2.10 y 2.14. Simultáneamente se consideró el “Proyecto de Estructuras con Disipadores Dependientes del Desplazamiento” según Benavent (2024).

Para determinar la curva fuerza desplazamiento de los disipadores de cada planta, se consideró que la resistencia lateral del disipador V_{dk} tiene que estar por debajo de la resistencia lateral de cada planta de la estructura principal V_{pk} , donde el subíndice k se refiere al número de planta; además la rigidez elástica de los disipadores de cada planta K_{dk} tiene que ser mayor a la rigidez lateral de cada planta de la estructura principal K_{pk} . Una vez definido la curva bilineal de la estructura principal y curva fuerza desplazamiento de los disipadores, se puede determinar la curva fuerza desplazamiento total de cada planta de la estructura de análisis.

4.3.1. Resistencia y Dimensionado de Disipadores CRP Estructura de 3 Niveles

La resistencia máxima y rigidez elástica de la estructura principal EP se pueden visualizar en las curvas de resistencia de la Figura 34. Para determinar la resistencia de la estructura de disipadores ED de cada planta se consideró que estos tengan un comportamiento elastoplástico perfecto, una curva bilineal. Además, se consideró los siguientes criterios:

- El desplazamiento de fluencia de los disipadores debe ser menor o igual a 40% del desplazamiento de fluencia de la estructura principal EP.
- La resistencia máxima de los disipadores de cada planta sea menor a la resistencia máxima de la estructura principal.
- La rigidez del disipador debe ser mayor que la rigidez de la EP.

Con estos criterios se elabora la Tabla 7 y se pueden obtener la curva de resistencia de la estructura mixta EM, EP y ED. los cuales se ven en la Figura 37.

Tabla 7

Dimensionado de resistencia de ED para modelo 3 niveles

Planta	m_k (N s ² /mm)	M	h_k (mm)	d_{rk} (mm)	$V_{pyk,MPC}$ (N)	d_{pyk} (mm)	V_{pyk} (N)	K_{pk}
1	85.79		4000.00	159.00	466320	24.00	385000	16041.67
2	85.05	247.46	3000.00	83.00	388600	18.00	340000	18888.89
3	76.62		3000.00	61.00	233160	15.00	205000	13666.67

Planta	$d_{dyk} \leq 0.4 d_{pyk}$	$V_{dyk} \leq V_{pyk,MPC}$	K_{dk}
1	9.60	OK	360000
2	7.20	OK	260000
3	6.00	OK	162000

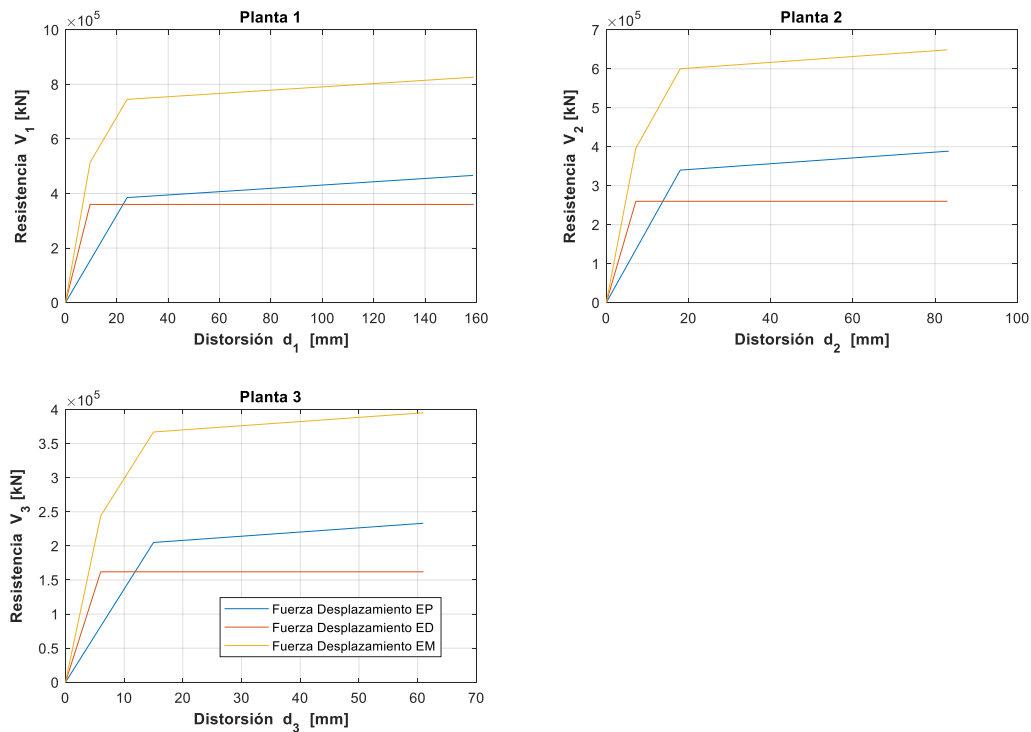
Planta	θ°	$K_{dk}/(\cos\theta)^\circ$	$V_{dyk}/\cos\theta^\circ$	Nº disp.	K_{Dk} (N/mm)	V_{Dk} (N)	K_k (N/mm)
1	38.66	61500.33	461026	2.00	30750	230513	53541.67
2	30.96	49107.25	303198	2.00	24554	151599	55000.00
3	30.96	36717.11	188915	2.00	18359	94458	40666.67

$T_1 =$	0.487	s
---------	--------------	---

Nota. Con las masas y rigidez de la EM se obtiene el periodo fundamental de 0.487 s.

Figura 37

Curvas de resistencia para estructura EP, ED y EM de 3 niveles



Nota. La resistencia de la ED debe ser menor a la de EP porque primero debe generarse la falla en los disipadores y la EP debería seguir funcionando.

Se considero que la EM tenga una distribución de resistencia optima y este criterio se realiza empleando las siguientes ecuaciones.

El coeficiente de distribución resistencia lateral optima $\bar{\alpha}_{k,opt}$ de cada planta se determina con las ecuaciones:

$$\bar{m}_k = \sum_{j=k}^N \frac{m_j}{M} \quad (18)$$

$$\bar{\alpha}_{k,opt} = 1 + \left[\frac{1}{\sqrt{\bar{m}_k}} - \bar{m}_k \right] \cdot \frac{2T_1}{1+3T_1} \quad (19)$$

Donde m_j es la masa de cada planta, M la masa total de la estructura, el \bar{m}_k es un coeficiente de la relación del sumatorio de masas por encima de la planta k .

El coeficiente de distribución resistencia lateral de la estructura $\bar{\alpha}_k$ de cada planta se determina con las ecuaciones:

$$\alpha_k = \frac{(V_{pyk} + V_{dyk})}{\bar{m}_k \cdot M \cdot g} \quad (20) \quad \bar{\alpha}_k = \frac{\alpha_k}{\alpha_1} \quad (21)$$

Donde α_k es el coeficiente de resistencia lateral de cada planta, g es la aceleración de gravedad. La distribución de resistencia óptima para EM de 3 niveles, se presenta en Tabla 8.

Tabla 8

Distribución de resistencia optima estructura 3 niveles

Coeficiente de resistencia optima			Coeficiente de resistencia de 3N		
Planta	\bar{m}_k	$\bar{\alpha}_{k,opt}$	α_k	$\bar{\alpha}_k$	
1	1.00	1.00	0.31	1.00	100%
2	0.65	1.23	0.38	1.23	100%
3	0.31	1.59	0.49	1.59	100%

Nota. En la tabla se verifica que la distribución de resistencia de la estructura $\bar{\alpha}_k$ es 100% equivalente a la distribución de resistencia optima $\bar{\alpha}_{k,opt}$.

Se dimensiona las secciones de los disipadores CRP, realizando una aproximación a la rigidez del disipador de cada nivel K_{Dk} , para esto se emplean las ecuaciones y parámetros ya definidos en acápite 2.8.1, los cálculos se insertan en la Tabla 9.

$$K_{CRP} = f_k \frac{A_c E}{L_w} \quad (1)$$

$$f_k = \frac{1}{\gamma + \eta (1 - \gamma)} \quad (2)$$

Tabla 9

Dimensionado de los disipadores CRP para 3 niveles

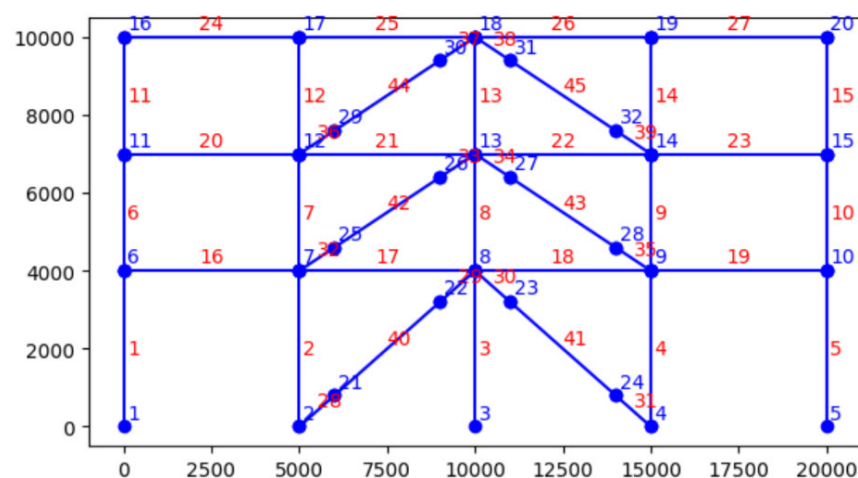
Planta	K_{Dk} (N/mm)	γ	A_c (mm ²)	A (mm ²)	η	f_k	L_w (mm)	E (Mpa)	K_{CRP} (N/mm ²)
1	30750	0.60	875	1750	0.500	1.25	6400	180000	30762
2	24554	0.60	625	1375	0.455	1.28	5830	180000	24682
3	18359	0.60	500	900	0.556	1.22	5830	180000	18775

Nota. En la tabla la rigidez del disipador CRP, K_{CRP} es aproximadamente lo mismo que la rigidez requerida para los disipadores K_{Dk} , para una distribución optima de resistencia.

Dimensionado los disipadores CRP y verificado que la estructura EM tiene una distribución de resistencia optima en cada una de sus plantas, se idealiza la nueva estructura mixta, el cual se observa en la Figura 38.

Figura 38

Modelo de EM de 3 niveles definida en OpenSeesPy



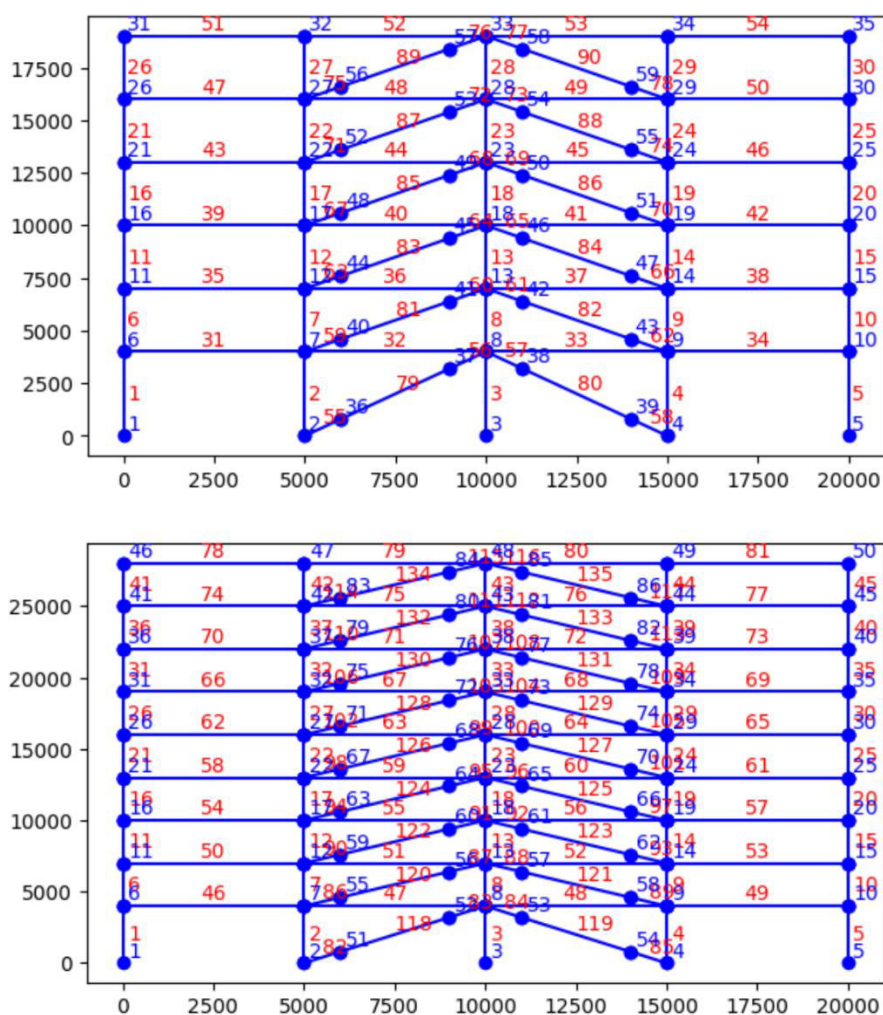
Nota. Las secciones de los disipadores CRP tienen diferente sección para cada nivel.

4.3.2. Resistencia y Dimensionado de Disipadores CRP Estructuras de 6 y 9 Niveles

El procedimiento para el dimensionado de los disipadores CRP y verificación que la estructura EM tiene una distribución de resistencia optima en cada una de sus plantas, para las estructuras de 6 y 9 niveles, fue el mismo que se realizó en el acápite anterior, los cálculos se muestran en los Anexos D y E. La idealización de las estructuras, se observa en la Figura 39.

Figura 39

Modelos de EM de 6 y 9 niveles definida en OpenSeesPy



Nota. Las secciones de los disipadores CRP tienen diferente sección para cada nivel y modelo.

4.4. Selección de Registros Sísmicos

Se selecciono 25 sismos con magnitud mayor a 6.0 Mw y registrados en CISMID, con los cuales se realizó el análisis No Lineal Dinámico, los registros sísmicos fueron escalados hasta producir el colapso de cada estructura, considerando la distorsión de colapso 0.015, los sismos seleccionados se describen en la Tabla 10.

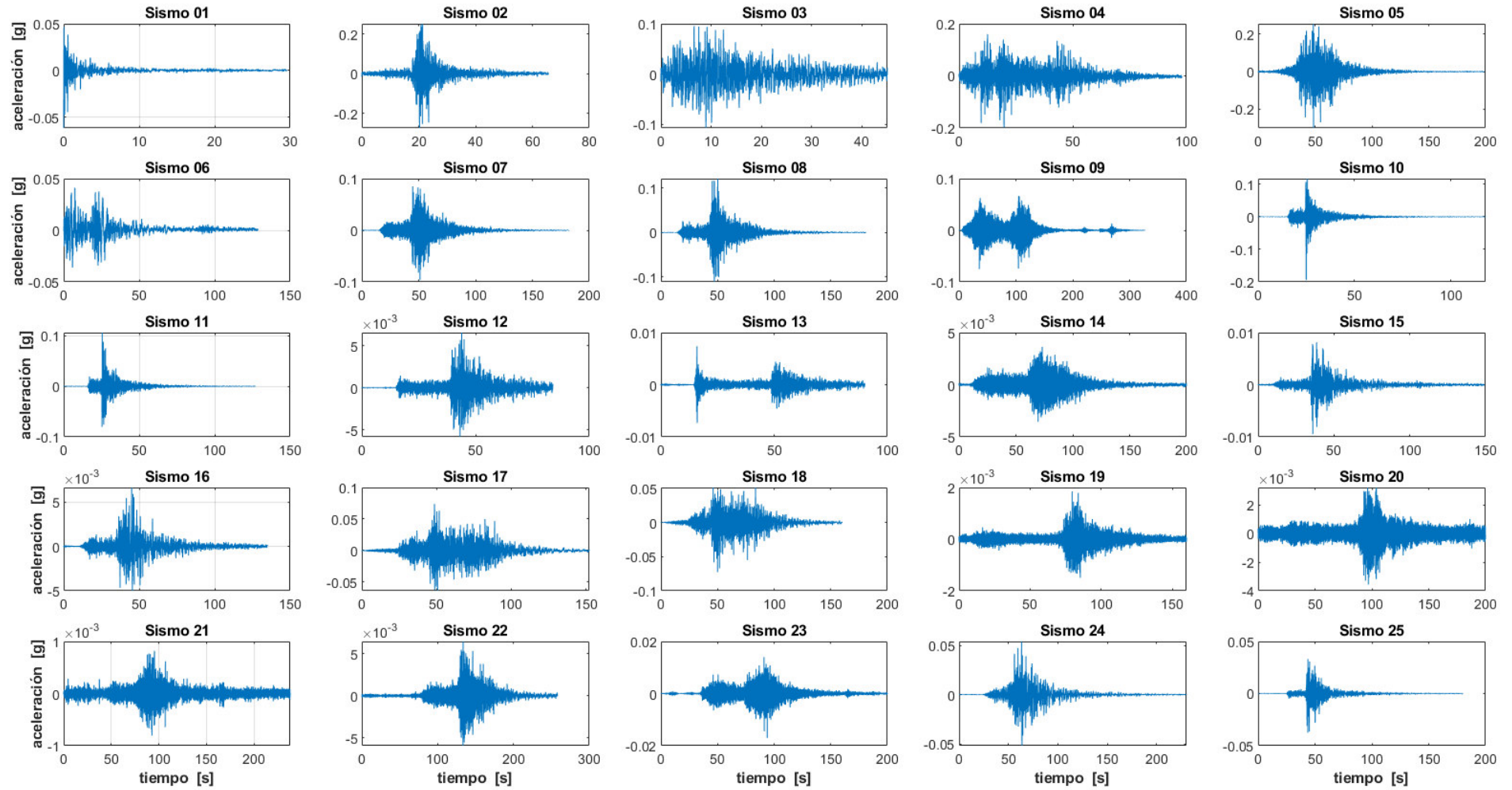
Tabla 10

Registros sísmicos escalados al colapso de estructuras

Información del Sismo										
Item	Estación	Fecha	Magnitud (Mw)	Componente	dt (s)	T pred. (s)	Profundidad (km)	Dist. Epicentral (km)	PGA (mm/s2)	PGA (g)
1	Lima PRQ	31-Ene-51	6.2	E-O	0.020	0.064	50.00	19.63	603.50	0.062
2	Lima PRQ	17-Oct-66	8.1	N-S	0.020	0.329	24.00	236.53	2682.40	0.273
3	Lima PRQ	31-May-70	7.9	E-O	0.020	0.293	64.00	361.60	1050.50	0.107
4	Lima PRQ	3-Oct-74	7.9	E-O	0.020	0.302	13.00	112.77	1942.10	0.198
5	Moquegua MOQ001	23-Jun-01	8.2	E-O	0.010	0.961	33.00	327.12	2951.50	0.301
6	Tacna TAC001	7-Jul-01	7.6	N-S	0.010	2.308	33.00	165.90	404.20	0.041
7	Tacna TAC001	13-Jun-05	7.8	N-S	0.005	0.053	146.00	178.96	941.80	0.096
8	Tacna TAC002	13-Jun-05	7.8	E-O	0.005	0.347	146.00	180.66	1191.10	0.121
9	Lima LIM001	15-Ago-07	7.9	E-O	0.005	0.274	40.00	187.09	738.90	0.075
10	Tacna TAC001	5-May-10	6.6	N-S	0.005	0.170	36.00	133.55	1900.00	0.194
11	Tacna TAC002	5-May-10	6.6	N-S	0.005	0.314	36.00	106.56	1040.00	0.106
12	Tacna TAC002	2-Abr-11	6.1	E-O	0.005	0.271	83.00	211.64	64.10	0.007
13	Tacna TAC002	7-Jun-12	6.2	E-O	0.005	0.260	110.00	350.67	72.40	0.007
14	Lima LIM002	25-Set-13	6.9	E-O	0.005	0.251	37.00	521.86	35.60	0.004
15	Tacna TAC001	23-Mar-14	6.4	E-O	0.005	0.167	45.00	204.50	93.20	0.010
16	Tacna TAC002	23-Mar-14	6.4	E-O	0.005	0.373	45.00	207.37	65.60	0.007
17	Tacna TAC001	1-Abr-14	8.2	E-O	0.005	0.493	38.90	185.63	724.90	0.074
18	Tacna TAC002	1-Abr-14	8.2	E-O	0.005	0.376	38.90	188.51	712.90	0.073
19	Tacna TAC002	11-Feb-15	6.7	N-S	0.005	0.630	190.00	683.77	18.10	0.002
20	Tacna TAC004	24-Jun-17	6.2	E-O	0.005	0.296	100.00	433.46	28.10	0.003
21	Lima UNFV	29-Nov-17	5.8	N-S	0.005	0.295	12.00	287.06	8.00	0.001
22	Tacna TAC004	14-Ene-18	6.8	N-S	0.005	0.529	48.00	539.10	63.60	0.006
23	Tacna TAC001	26-May-22	6.9	N-S	0.005	0.015	240.00	359.09	166.80	0.017
24	Ica UNICA	28-Jun-24	7.0	N-S	0.005	0.745	42.00	249.85	523.60	0.053
25	Ica SCICA	5-Nov-24	6.0	N-S	0.005	0.638	139.00	101.22	366.30	0.037

Nota. Las magnitudes sombreadas están en magnitud M_L , las demás magnitudes en Mw.

Los registros descritos en la Tabla anterior y representados en la Figura 40, mediante un proceso iterativo de análisis No Lineal Dinámico hasta producir el colapso de las estructuras, el factor de escala de cada registro fue variando para cada estructura. se pudo determinar la energía absorbida en cada planta de la estructura, este análisis será mostrado en los siguientes acápites.

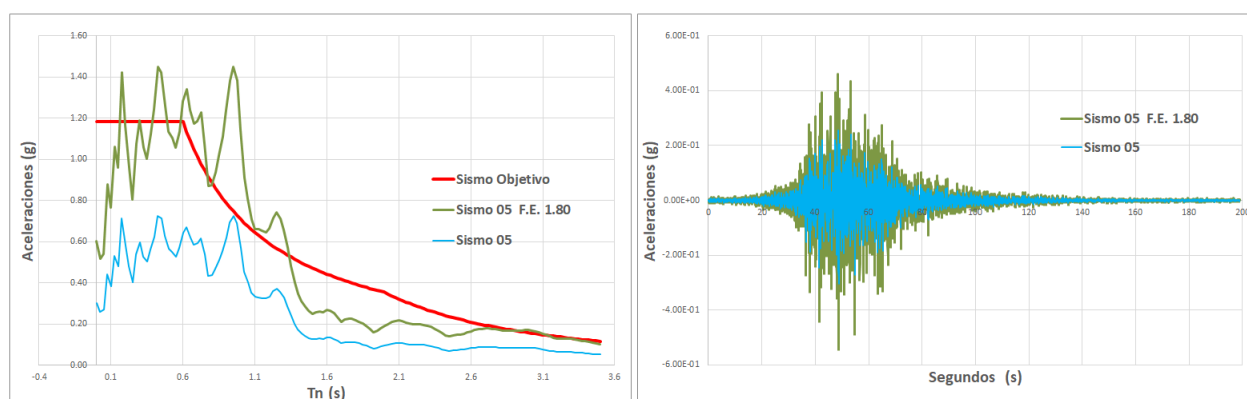
Figura 40*Registros sísmicos escalados al colapso de estructuras*

Nota. Los registros de aceleraciones están en valores de aceleración de la gravedad g.

Por otro lado, se realizó otro análisis, el escalamiento de los registros sísmicos al espectro objetivo que define la norma E.030 de Perú. El procedimiento de escalamiento de los registros se realizó según lo indicado en la norma ASCE 7-22 en el capítulo 16. Un ejemplo del escalado, del Sismo 05 del 23 de junio 2001, al espectro objetivo, se muestra en Figura 41.

Figura 41

Escalamiento del sismo 05



Nota. Sismo básico de diseño (DBE) con $Z=0.45$, $U=1.0$, $S=1.05$, $R=1$.

Según la norma ASCE 7-22 y E.030 se debe determinar el rango de interés de periodos T_n de zona de escalamiento, donde los periodos varían de $0.2 T_1 < T_n < 1.5 T_1$ (T_1 es el periodo fundamental de la estructura), siguiendo los criterios de estos reglamentos, para cada sismo, se calculó un factor de escala promedio que satisfaga las condiciones para las tres estructuras de 3, 6 y 9 niveles. Para el sismo 05 se determinó un factor de escala F.E. 1.80 que amplifica al sismo a aceleraciones similares del sismo de diseño.

De acuerdo con las recomendaciones establecidas por Wang et al. (2015) (Huang et al., 2017), en la investigación se sugiere que los factores de escala se mantengan dentro de un rango estrecho, comprendido entre 0.4 y 2.5, pero al necesitar mínimo 3 registros sísmico que cumplan el criterio, se eligió los 3 sismos con F.E. más próximo a este rango. Los 3 sismos

válidos para llevar a cabo el análisis dinámico tipo Tiempo-Historia, se describen en la Tabla 11 y todos los espectros escalados se ven en la Figura 42.

Tabla 11

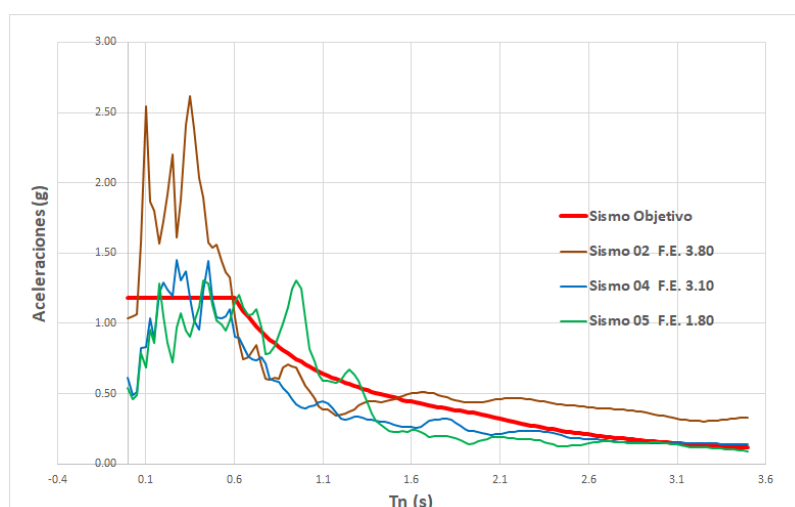
Registros sísmicos escalados al espectro objetivo

Información del Sismo							
Item	Estación	Fecha	Magnitud (Mw)	Componente	dt (s)	Factor Escala	Observación
1	Lima PRQ	31-Ene-51	6.2	E-O	0.020	28.30	No
2	Lima PRQ	17-Oct-66	8.1	N-S	0.020	3.80	Ok
3	Lima PRQ	31-May-70	7.9	E-O	0.020	8.87	No
4	Lima PRQ	3-Oct-74	7.9	E-O	0.020	3.10	Ok
5	Moquegua MOQ001	23-Jun-01	8.2	E-O	0.010	1.80	Ok
6	Tacna TAC001	7-Jul-01	7.6	N-S	0.010	11.00	No
7	Tacna TAC001	13-Jun-05	7.8	N-S	0.005	11.02	No
8	Tacna TAC002	13-Jun-05	7.8	E-O	0.005	12.14	No
9	Lima LIM001	15-Ago-07	7.9	E-O	0.005	9.77	No
10	Tacna TAC001	5-May-10	6.6	N-S	0.005	8.44	No
11	Tacna TAC002	5-May-10	6.6	N-S	0.005	10.64	No
12	Tacna TAC002	2-Abr-11	6.1	E-O	0.005	140.12	No
13	Tacna TAC002	7-Jun-12	6.2	E-O	0.005	292.50	No
14	Lima LIM002	25-Sep-13	6.9	E-O	0.005	305.51	No
15	Tacna TAC001	23-Mar-14	6.4	E-O	0.005	85.31	No
16	Tacna TAC002	23-Mar-14	6.4	E-O	0.005	78.28	No
17	Tacna TAC001	1-Abr-14	8.2	E-O	0.005	9.35	No
18	Tacna TAC002	1-Abr-14	8.2	E-O	0.005	8.18	No
19	Tacna TAC002	11-Feb-15	6.7	N-S	0.005	844.39	No
20	Tacna TAC004	24-Jun-17	6.2	E-O	0.005	330.20	No
21	Lima UNFV	29-Nov-17	5.8	N-S	0.005	872.83	No
22	Tacna TAC004	14-Ene-18	6.8	N-S	0.005	135.61	No
23	Tacna TAC001	26-May-22	6.9	N-S	0.005	112.16	No
24	Ica UNICA	28-Jun-24	7.0	N-S	0.005	10.26	No
25	Ica SCICA	5-Nov-24	6.0	N-S	0.005	20.39	No

Nota. Los registros sombreados, son los 3 sismos con F.E. próximo al intervalo entre 0.4 y 2.5.

Figura 42

Espectros de sismos escalados al DBE



Nota. Los factores de escala aproximan los sismos al sismo objetivo (sismo de diseño con R=1).

4.5. Análisis Dinámico Tiempo Historia

El número mínimo de registros para realizar el análisis sísmico dinámico tiempo historia es de 3, debido al F.E. se eligieron los sismos sombreados en la tabla anterior.

La respuesta de la edificación de 3 niveles, ante los sismos filtrados, se presenta en la Tabla 12 y se representan en la Figura 43.

Tabla 12

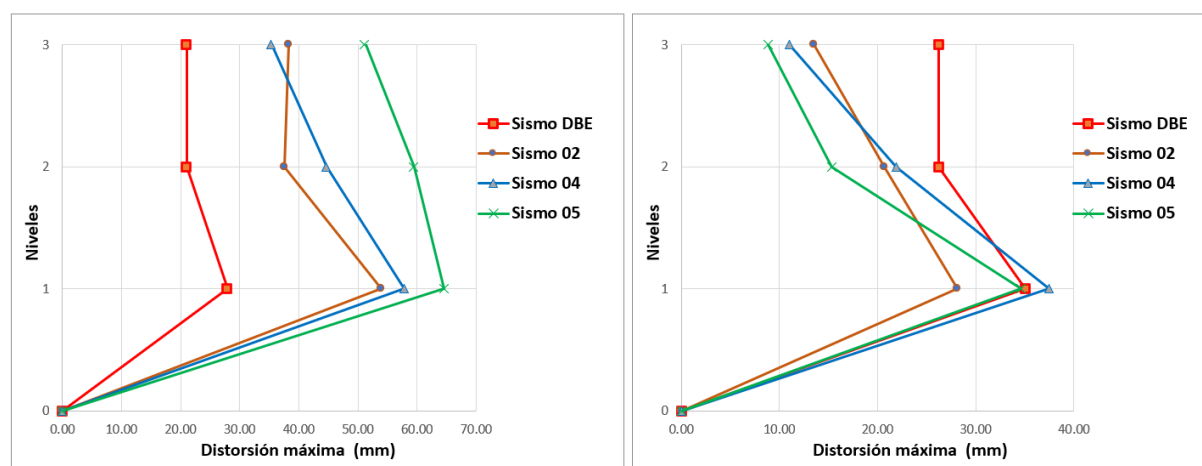
Comparación de respuestas entre estructuras EP y EM de 3 niveles

Información del Sismo			Distorsión máxima por niveles Estructura Convencional EP				Distorsión máxima por niveles Estructura Con Disipadores EM				Variación de Distorsión		
			Tn = 0.785 s				Tn = 0.487 s				(%)		
Sismo	Fecha	Magnitud (Mw)	Base	1	2	3	Base	1	2	3	1	2	3
Sismo DBE			0.00	28.00	21.00	21.00	0.00	35.00	26.25	26.25			
Sismo 02	17-Oct-66	8.1	0.00	53.97	37.63	38.31	0.00	28.13	20.69	13.49	47.9%	45.0%	64.8%
Sismo 04	3-Oct-74	7.9	0.00	57.79	44.78	35.38	0.00	37.48	21.93	11.00	35.1%	51.0%	68.9%
Sismo 05	23-Jun-01	8.2	0.00	64.55	59.47	51.28	0.00	34.62	15.34	8.87	46.4%	74.2%	82.7%

Nota. La variación más significativa sucede en el nivel 3 debido al Sismo 05.

Figura 43

Distorsiones para estructuras EP y EM de 3 niveles



Nota. La distorsión más crítica sucede en nivel 1 debido al Sismo 04 para la estructura EM.

El sismo 5 produce el colapso de la estructura EP de 3 niveles, cuando se agregan los disipadores CRP las distorsiones se reducen enormemente para la estructura EM.

La respuesta de la edificación de 6 niveles, ante los sismos filtrados, se muestran en la Tabla 13 y se representan en la Figura 44.

Tabla 13

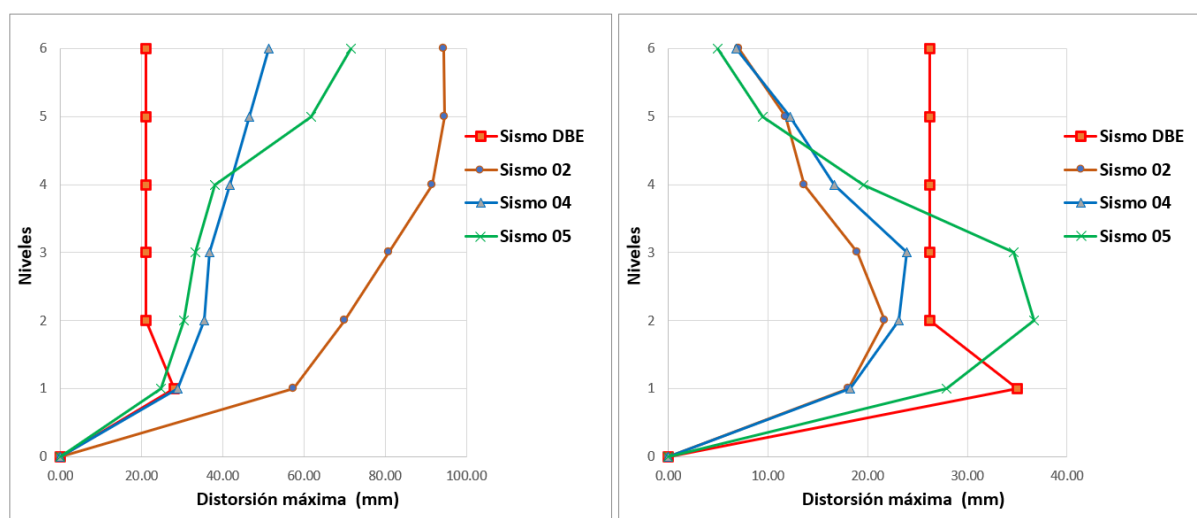
Comparación de respuestas entre estructuras EP y EM de 6 niveles

Estructuras		Información del sismo			Distorsiones por niveles (mm)						
	Tn (s)	Sismo	Fecha	Magnitud (Mw)	Base	1	2	3	4	5	6
Estructura Convencional EP	1.16	Sismo DBE			0.00	28.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00
		Sismo 02	17-Oct-66	8.1	0.00	57.49	70.11	80.90	91.53	94.63	94.49
		Sismo 04	3-Oct-74	7.9	0.00	28.96	35.43	36.81	41.85	46.50	51.38
		Sismo 05	23-Jun-01	8.2	0.00	24.88	30.42	33.30	38.13	61.75	71.47
					Base	1	2	3	4	5	6
Estructura con disipadores EM	0.77	Sismo DBE			0.00	35.00	26.25	26.25	26.25	26.25	26.25
		Sismo 02	17-Oct-66	8.1	0.00	18.07	21.72	18.94	13.62	11.74	7.05
		Sismo 04	3-Oct-74	7.9	0.00	18.26	23.10	23.93	16.69	12.22	6.78
		Sismo 05	23-Jun-01	8.2	0.00	27.91	36.67	34.63	19.61	9.45	4.93
					Base	1	2	3	4	5	6
Variación (%)		Sismo 02				68.6	69.0	76.6	85.1	87.6	92.5
		Sismo 04				36.9	34.8	35.0	60.1	73.7	86.8
		Sismo 05				-12.2	-20.5	-4.0	48.6	84.7	93.1

Nota. Las distorsiones son las máximas de cada nivel por cada sismo analizado.

Figura 44

Distorsiones para estructuras EP y EM de 6 niveles



Nota. La distorsión más crítica sucede en nivel 2 debido al Sismo 05 para la estructura EM.

El sismo 2 y 5 producen el colapso de la estructura EP de 6 niveles, cuando se agregan los disipadores CRP las distorsiones se reducen enormemente para la estructura EM.

La respuesta de edificación de 9 niveles se muestra en la Tabla 14 y en la Figura 45.

Tabla 14

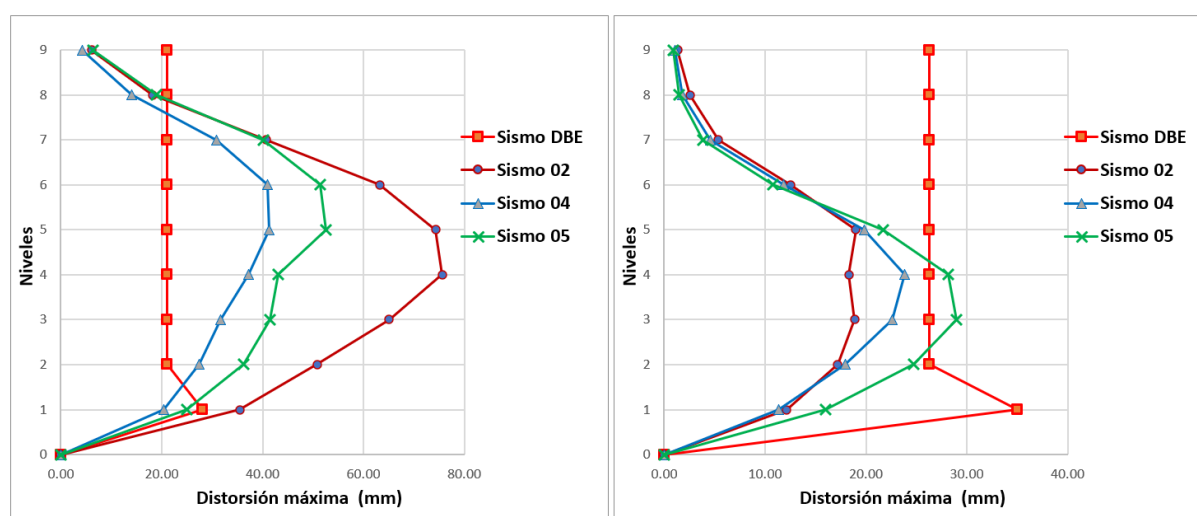
Comparación de respuestas entre estructuras EP y EM de 9 niveles

Estructuras		Información del sismo			Distor									
	Tn (s)	Sismo	Fecha	Magnitud (Mw)	Base	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estructura Convencional EP	1.09	Sismo DBE			0.00	28.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00
		Sismo 02	17-Oct-66	8.1	0.00	35.43	50.80	65.07	75.65	74.33	63.23	40.76	18.15	6.06
		Sismo 04	3-Oct-74	7.9	0.00	20.41	27.49	31.75	37.20	41.23	40.99	30.89	14.06	4.30
		Sismo 05	23-Jun-01	8.2	0.00	24.91	36.31	41.46	43.17	52.62	51.47	40.18	18.91	6.31
					Base	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estructura con disipadores EM	0.75	Sismo DBE			0.00	35.00	26.25	26.25	26.25	26.25	26.25	26.25	26.25	26.25
		Sismo 02	17-Oct-66	8.1	0.00	12.15	17.20	18.89	18.30	18.98	12.50	5.36	2.55	1.33
		Sismo 04	3-Oct-74	7.9	0.00	11.31	17.93	22.60	23.86	19.82	11.86	4.59	1.78	1.06
		Sismo 05	23-Jun-01	8.2	0.00	15.98	24.74	29.00	28.15	21.70	10.74	3.80	1.51	0.87
					Base	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Variación (%)		Sismo 02				65.7	66.1	71.0	75.8	74.5	80.2	86.8	86.0	78.1
		Sismo 04				44.6	34.8	28.8	35.9	51.9	71.1	85.1	87.3	75.3
		Sismo 05				35.8	31.9	30.1	34.8	58.8	79.1	90.5	92.0	86.2

Nota. Las distorsiones son las máximas de cada nivel por cada sismo analizado.

Figura 45

Distorsiones para estructuras EP y EM de 9 niveles



Nota. La distorsión más crítica sucede en nivel 3 debido al Sismo 05.

El sismo 2 y 5 producen el colapso de la estructura EP de 9 niveles, cuando se agregan los disipadores CRP las distorsiones se reducen enormemente para la estructura EM.

En las estructuras analizadas EM las distorsiones son mayores a las producidas por el sismo de diseño DBE, pero no producirán colapso a dichas estructuras, ya que no superan la distorsión de colapso 0.015.

4.6. Análisis No Lineal Dinámico Antes del Colapso

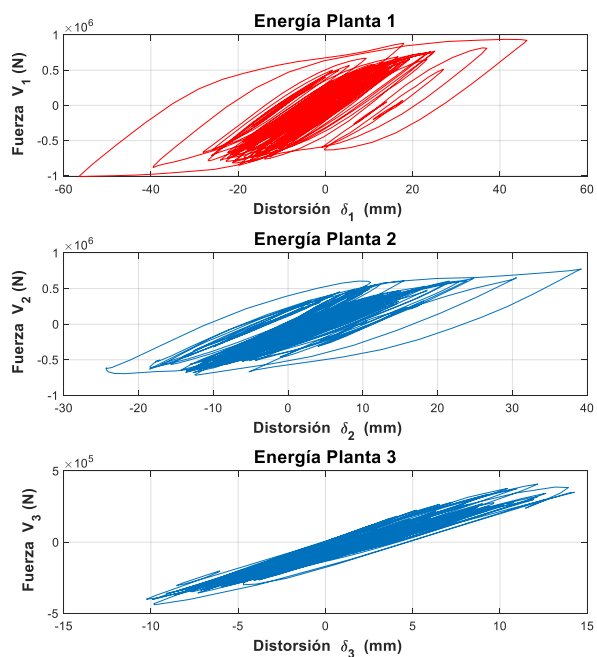
Las estructuras EM con disipadores CRP descritos en 4.3.1 y 4.3.2 se modelaron en OpenSeesPy. Los modelos se sometieron a los 25 sismos descritos en 4.4, en un proceso iterativo de escalamiento. Se determinó la respuesta histerética de las estructuras EM, mediante las curvas fuerza cortante V_k versus desplazamiento relativo (distorsión) δ_k de cada planta (k es el número de planta).

Los sismos fueron escalados de manera iterativa, aumentando el F.E. de forma que aumente la aceleración máxima PGA (en valores de g) de cada sismo, hasta que se produzca la distorsión de colapso en alguna planta (1.5% de la altura del entrepiso).

A continuación, se presenta un ejemplo de este análisis para la estructura EM de 3 niveles sometido al sismo 04; de 6 niveles sometido al sismo 05; de 9 niveles sometido al sismo 05. Los resultados se visualizan en las Figura 46, 47 y 48.

Figura 46

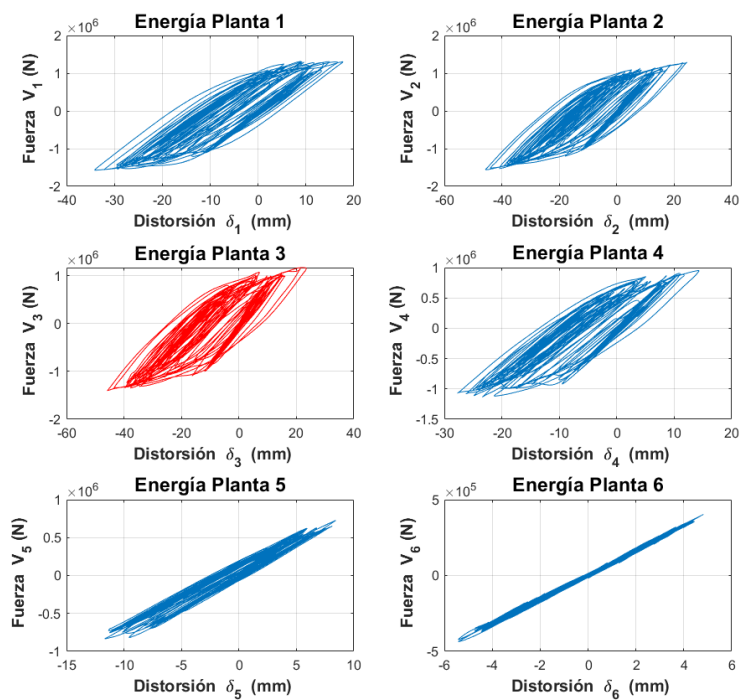
Respuesta histerética de EM de 3 niveles llevado al colapso por sismo 04.



Nota. La distorsión máxima sucede en la planta 1 aproximadamente 60 mm.

Figura 47

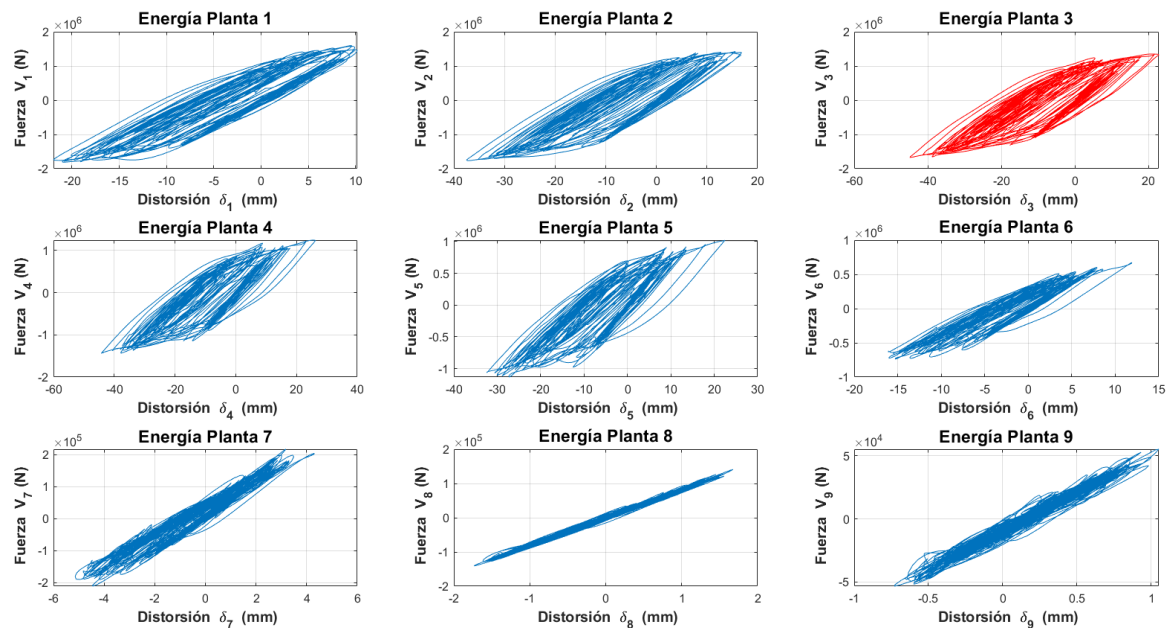
Respuesta histerética de EM de 6 niveles llevado al colapso por sismo 05.



Nota. La distorsión máxima sucede en la planta 3 aproximadamente 45 mm.

Figura 48

Respuesta histerética de EM de 9 niveles llevado al colapso por sismo 05.



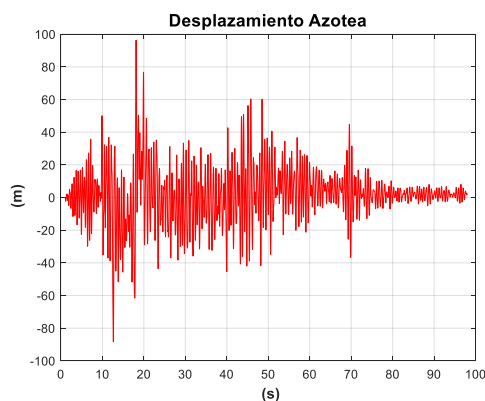
Nota. La distorsión máxima sucede en la planta 3 aproximadamente 45 mm.

4.7. Distribución de Energía Sísmica en Plantas de Estructuras EM

Al escalar los sismos para llevar al colapso las estructuras, la respuesta entra a un comportamiento no lineal, para la estructura de 3 niveles debido al sismo 04, el desplazamiento de la azotea claramente con comportamiento no lineal se muestra en la Figura 49.

Figura 49

Respuesta no lineal EM de 3 niveles por sismo 04.



Nota. Entre los primeros 10 y 30 segundos se observa a más detalle el comportamiento no lineal.

Escalado cada sismo para llevar al colapso las estructuras EM, como se detalló en el acápite anterior, se obtuvieron las curvas histerética V_k vs δ_k de cada planta.

Por otro lado, mediante el método numérico de integración Trapecio, se calculó el área de cada curva histerética, el cual es equivalente a la energía.

La Energía que produce cada sismo en cada planta en valores de kJ y porcentajes se muestran en las Tablas 15, 16 y 17 y se grafican en la Figuras 50, 51, 52 en estas figuras claramente se observa que las líneas de distribución de energía tienen una tendencia, el cual será corroborado si siguen las fórmulas de predicción de Akiyama.

Tabla 15

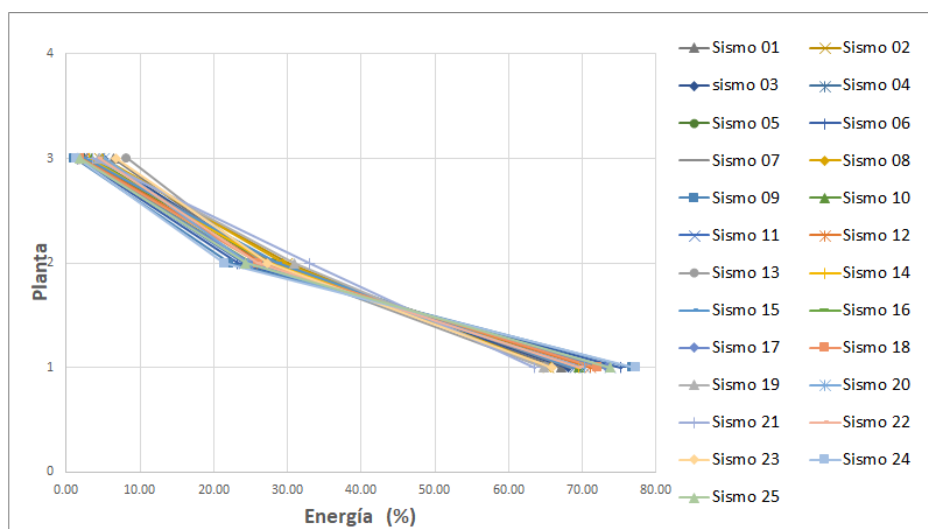
Distribución de energía EM de 3 niveles.

Distribución de Energía por Planta								
Sismo	Magnitud (Mw)	E1 (kJ)	E1 (%)	E2 (kJ)	E2 (%)	E3 (kJ)	E3 (%)	ET (kJ)
Sismo 01	7.1	180.37	67.1	71.38	26.5	17.15	6.4	268.90
Sismo 02	8.1	137.51	65.4	63.12	30.0	9.58	4.6	210.21
sismo 03	7	199.48	68.1	78.98	26.9	14.61	5.0	293.08
Sismo 04	7.7	186.88	69.1	76.96	28.4	6.73	2.5	270.56
Sismo 05	8.2	267.76	69.7	107.89	28.1	8.25	2.1	383.90
Sismo 06	7.5	111.95	75.3	34.49	23.2	2.30	1.5	148.74
Sismo 07	7.9	136.05	68.5	56.32	28.4	6.18	3.1	198.54
Sismo 08	7.9	142.42	65.8	63.55	29.4	10.54	4.9	216.51
Sismo 09	8.6	226.37	76.8	65.22	22.1	3.15	1.1	294.75
Sismo 10	7.9	46.00	69.5	17.85	27.0	2.31	3.5	66.16
Sismo 11	7.9	69.47	73.8	22.70	24.1	2.01	2.1	94.18
Sismo 12	7	133.22	71.1	49.74	26.6	4.33	2.3	187.29
Sismo 13	7.3	500.97	65.0	206.07	26.8	63.31	8.2	770.35
Sismo 14	8.4	344.51	69.5	136.16	27.5	15.27	3.1	495.94
Sismo 15	7.6	138.84	68.8	57.97	28.7	5.14	2.5	201.95
Sismo 16	7.6	173.19	73.0	59.74	25.2	4.43	1.9	237.36
Sismo 17	8.2	130.25	73.3	44.57	25.1	2.98	1.7	177.79
Sismo 18	8.2	219.94	72.0	79.71	26.1	5.84	1.9	305.49
Sismo 19	8.1	161.18	64.8	76.88	30.9	10.70	4.3	248.76
Sismo 20	7.1	282.79	70.3	98.70	24.5	20.79	5.2	402.27
Sismo 21	6.6	352.38	63.6	182.41	32.9	19.49	3.5	554.28
Sismo 22	6.8	161.84	69.7	60.23	25.9	10.18	4.4	232.25
Sismo 23	6.9	227.87	65.9	94.51	27.3	23.30	6.7	345.68
Sismo 24	8.6	97.13	77.2	26.89	21.4	1.77	1.4	125.80
Sismo 25	7.1	151.42	73.8	49.91	24.3	3.71	1.8	205.04

Nota. La energía está en valores de kilo Joules kJ y porcentuales %.

Figura 50

Distribución de energía EM de 3 niveles.



Nota. Las líneas de energía tienen una tendencia a un mismo comportamiento.

Tabla 16

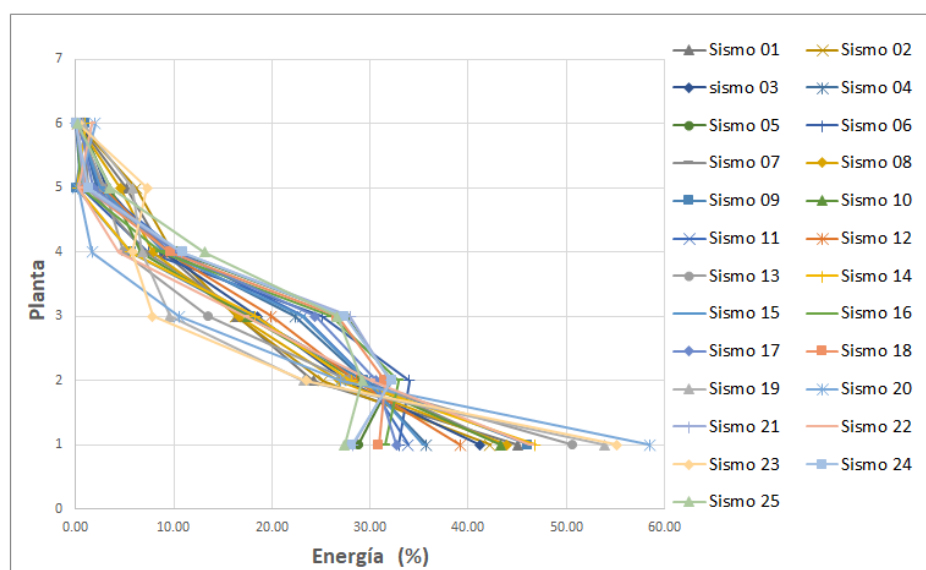
Distribución de energía EM de 6 niveles.

Distribución de Energía por Planta														
Sismo	Magnitud (Mw)	E1 (kJ)	E1 (%)	E2 (kJ)	E2 (%)	E3 (kJ)	E3 (%)	E4 (kJ)	E4 (%)	E5 (kJ)	E5 (%)	E6 (kJ)	E6 (%)	ET (kJ)
Sismo 01	7.1	199.23	45.0	107.25	24.2	72.69	16.4	39.69	9.0	22.81	5.2	1.21	0.3	442.88
Sismo 02	8.1	282.28	42.2	168.47	25.2	108.89	16.3	65.89	9.9	41.28	6.2	1.78	0.3	668.59
sismo 03	7	226.77	41.2	151.69	27.5	102.06	18.5	49.34	9.0	17.52	3.2	3.62	0.7	551.00
Sismo 04	7.7	193.15	35.7	159.92	29.6	120.64	22.3	52.30	9.7	11.77	2.2	2.55	0.5	540.31
Sismo 05	8.2	236.26	28.8	263.73	32.2	225.33	27.5	85.75	10.5	7.76	0.9	0.58	0.1	819.41
Sismo 06	7.5	102.68	32.9	106.17	34.0	78.32	25.1	23.14	7.4	1.51	0.5	0.23	0.1	312.04
Sismo 07	7.2	168.98	43.5	114.33	29.5	69.44	17.9	27.66	7.1	4.76	1.2	2.93	0.8	388.10
Sismo 08	7.2	214.26	43.9	131.03	26.8	81.21	16.6	38.60	7.9	22.14	4.5	0.85	0.2	488.09
Sismo 09	8.6	242.40	46.1	154.47	29.4	93.88	17.8	29.70	5.6	0.28	0.1	5.32	1.0	526.04
Sismo 10	7.9	85.13	43.3	56.61	28.8	34.37	17.5	13.12	6.7	6.92	3.5	0.51	0.3	196.67
Sismo 11	7.9	93.67	33.9	82.30	29.8	64.06	23.2	29.17	10.6	6.63	2.4	0.60	0.2	276.43
Sismo 12	7	226.03	39.1	164.94	28.6	115.02	19.9	53.90	9.3	16.14	2.8	1.55	0.3	577.57
Sismo 13	7.3	486.10	50.6	267.74	27.9	129.87	13.5	47.33	4.9	27.79	2.9	1.11	0.1	959.94
Sismo 14	8.4	227.18	46.8	136.14	28.1	88.86	18.3	27.30	5.6	0.85	0.2	4.92	1.0	485.25
Sismo 15	7.6	134.82	35.3	113.25	29.7	87.93	23.0	34.91	9.1	9.73	2.6	0.90	0.2	381.54
Sismo 16	7.6	48.91	31.5	51.03	32.9	40.50	26.1	13.50	8.7	0.84	0.5	0.29	0.2	155.07
Sismo 17	8.2	155.07	32.7	145.46	30.6	115.88	24.4	47.78	10.1	8.54	1.8	1.97	0.4	474.70
Sismo 18	8.2	161.78	30.9	164.90	31.5	139.64	26.7	50.58	9.7	5.74	1.1	0.84	0.2	523.48
Sismo 19	8.1	273.06	53.8	117.75	23.2	48.69	9.6	34.43	6.8	29.30	5.8	3.95	0.8	507.18
Sismo 20	7.1	330.36	58.5	152.69	27.0	59.40	10.5	9.65	1.7	1.58	0.3	11.41	2.0	565.09
Sismo 21	6.6	120.01	28.3	136.08	32.0	118.82	28.0	45.84	10.8	3.86	0.9	0.04	0.0	424.65
Sismo 22	6.8	243.35	46.3	158.52	30.1	90.81	17.3	22.93	4.4	1.59	0.3	8.60	1.6	525.80
Sismo 23	6.9	389.08	55.2	165.76	23.5	55.59	7.9	41.08	5.8	51.59	7.3	2.34	0.3	705.44
Sismo 24	8.6	237.86	28.2	271.85	32.2	231.38	27.4	92.19	10.9	10.94	1.3	0.55	0.1	844.76
Sismo 25	7.1	119.07	27.4	126.89	29.2	115.83	26.6	57.17	13.1	15.16	3.5	0.84	0.2	434.95

Nota. La energía está en valores de kilo Joules kJ y porcentuales %.

Figura 51

Distribución de energía EM de 6 niveles.



Nota. Se ve una mayor dispersión de energía en las plantas 1 y 3.

Tabla 17

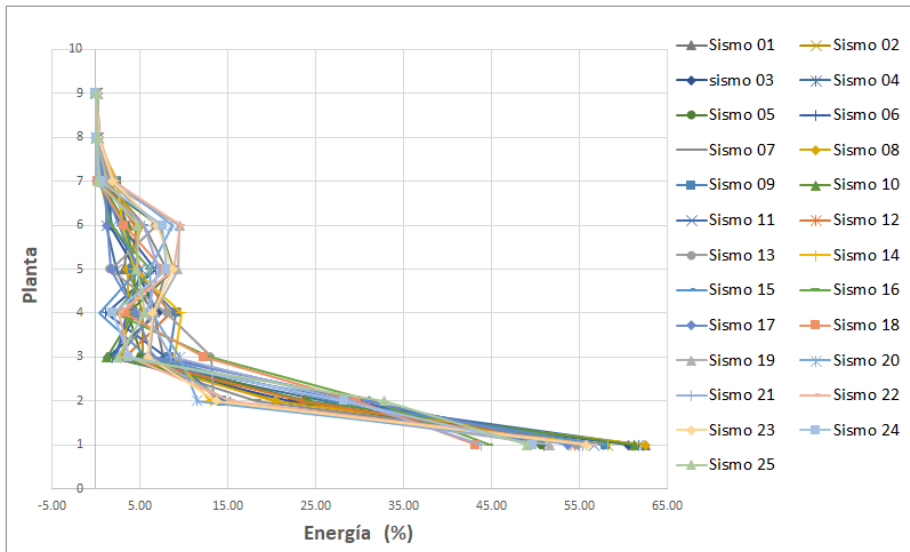
Distribución de energía EM de 9 niveles.

Distribución de Energía por Planta																				
Sismo	Magnitud (Mw)	E1 (kJ)	E1 (%)	E2 (kJ)	E2 (%)	E3 (kJ)	E3 (%)	E4 (kJ)	E4 (%)	E5 (kJ)	E5 (%)	E6 (kJ)	E6 (%)	E7 (kJ)	E7 (%)	E8 (kJ)	E8 (%)	E9 (kJ)	E9 (%)	ET (kJ)
Sismo 01	7.1	123.88	62.6	28.22	14.3	15.12	7.6	13.07	6.6	6.45	3.3	7.38	3.7	3.22	1.6	0.44	0.2	0.20	0.1	197.99
Sismo 02	8.1	136.86	58.3	48.60	20.7	12.51	5.3	12.52	5.3	8.85	3.8	11.04	4.7	3.32	1.4	0.82	0.4	0.41	0.2	234.94
Sismo 03	7	146.04	60.7	53.65	22.3	3.44	1.4	17.06	7.1	10.93	4.5	3.82	1.6	4.42	1.8	0.93	0.4	0.45	0.2	240.74
Sismo 04	7.7	169.83	61.8	72.25	26.3	5.30	1.9	12.58	4.6	6.51	2.4	3.37	1.2	4.15	1.5	0.50	0.2	0.21	0.1	274.70
Sismo 05	8.2	166.27	50.7	78.57	24.0	17.02	5.2	12.17	3.7	29.11	8.9	23.61	7.2	0.80	0.2	0.11	0.0	0.06	0.0	327.71
Sismo 06	7.5	69.65	51.0	40.63	29.8	10.79	7.9	1.62	1.2	9.31	6.8	4.03	3.0	0.37	0.3	0.11	0.1	0.05	0.0	136.56
Sismo 07	7.2	200.35	57.4	64.19	18.4	8.96	2.6	22.76	6.5	28.19	8.1	19.17	5.5	4.42	1.3	0.75	0.2	0.31	0.1	349.10
Sismo 08	7.2	164.32	62.5	53.69	20.4	7.87	3.0	9.73	3.7	9.57	3.6	13.66	5.2	3.53	1.3	0.30	0.1	0.14	0.1	262.81
Sismo 09	8.6	229.37	58.0	56.91	14.4	33.03	8.4	36.25	9.2	16.60	4.2	13.24	3.3	9.38	2.4	0.36	0.1	0.08	0.0	395.22
Sismo 10	7.9	75.22	61.2	29.97	24.4	1.63	1.3	5.34	4.4	5.52	4.5	4.41	3.6	0.64	0.5	0.06	0.0	0.03	0.0	122.83
Sismo 11	7.9	71.01	56.7	36.58	29.2	2.92	2.3	4.49	3.6	6.48	5.2	2.39	1.9	1.18	0.9	0.11	0.1	0.05	0.0	125.22
Sismo 12	7	170.61	54.5	73.49	23.5	10.56	3.4	26.47	8.5	15.15	4.8	13.91	4.4	2.53	0.8	0.16	0.1	0.09	0.0	312.97
Sismo 13	7.3	431.50	54.8	105.66	13.4	103.27	13.1	63.95	8.1	13.25	1.7	54.20	6.9	13.80	1.8	1.21	0.2	0.52	0.1	787.35
Sismo 14	8.4	259.60	58.2	58.12	13.0	40.12	9.0	43.36	9.7	19.62	4.4	13.53	3.0	10.93	2.5	0.20	0.0	0.29	0.1	445.77
Sismo 15	7.6	113.99	57.7	53.72	27.2	11.64	5.9	0.96	0.5	9.56	4.8	5.14	2.6	1.41	0.7	0.70	0.4	0.36	0.2	197.49
Sismo 16	7.6	34.76	44.8	24.55	31.6	9.95	12.8	1.70	2.2	4.82	6.2	1.31	1.7	0.41	0.5	0.07	0.1	0.03	0.0	77.60
Sismo 17	8.2	121.06	53.7	70.09	31.1	14.64	6.5	10.20	4.5	4.01	1.8	2.88	1.3	2.02	0.9	0.33	0.1	0.14	0.1	225.37
Sismo 18	8.2	109.45	43.3	75.22	29.7	31.03	12.3	8.43	3.3	19.62	7.8	8.28	3.3	0.73	0.3	0.19	0.1	0.09	0.0	253.01
Sismo 19	8.1	304.54	51.7	89.78	15.2	36.07	6.1	39.43	6.7	55.05	9.3	56.20	9.5	7.77	1.3	0.53	0.1	0.24	0.0	589.60
Sismo 20	7.1	514.26	55.5	107.08	11.6	88.23	9.5	59.23	6.4	56.52	6.1	80.69	8.7	20.23	2.2	0.73	0.1	0.07	0.0	927.05
Sismo 21	6.6	96.43	43.9	63.60	29.0	18.75	8.5	12.70	5.8	15.79	7.2	12.15	5.5	0.16	0.1	0.05	0.0	0.02	0.0	219.66
Sismo 22	6.8	292.98	56.8	79.69	15.4	19.68	3.8	13.77	2.7	46.07	8.9	49.84	9.7	11.00	2.1	2.21	0.4	1.03	0.2	516.26
Sismo 23	6.9	195.51	55.8	48.11	13.7	20.68	5.9	22.83	6.5	30.63	8.7	24.48	7.0	6.88	2.0	0.81	0.2	0.32	0.1	350.24
Sismo 24	8.6	145.90	49.8	82.77	28.2	11.05	3.8	5.77	2.0	23.62	8.1	22.23	7.6	1.75	0.6	0.11	0.0	0.05	0.0	293.25
Sismo 25	7.1	78.44	49.1	52.56	32.9	4.01	2.5	8.91	5.6	7.48	4.7	7.65	4.8	0.38	0.2	0.29	0.2	0.16	0.1	159.87

Nota. La energía está en valores de kilo Joules kJ y porcentuales %.

Figura 52

Distribución de energía EM de 9 niveles.



Nota. Se ve una mayor dispersión de energía en las plantas 1 y 2.

4.8. Verificación con Propuesta de Fórmula de Akiyama.

En el acápite 2.14 se detalló el procedimiento que formula Akiyama, las fórmulas a emplear son las siguientes.

$$s_k = (\bar{\alpha}_{k,opt} \cdot \bar{m}_k)^2 \frac{K_1}{K_k} \quad (22) \quad p_k = \frac{\alpha_k}{\alpha_{k,opt}} \quad (23)$$

$$p_{t,k} = 1 \quad (\text{análisis plano}) \quad (24) \quad \frac{E_{H,k}}{E_H} = \frac{s_k (p_k p_{t,k})^{-n}}{\sum_{l=1}^N s_l (p_l p_{t,l})^{-n}} \quad (25)$$

La distribución de energía propuesta por Akiyama y los resultados de distribución de energía (promedios por planta) obtenidos de los 25 sismos se ven en Tabla 18 y Figura 53.

Tabla 18

Comparación de distribución de energía según Akiyama.

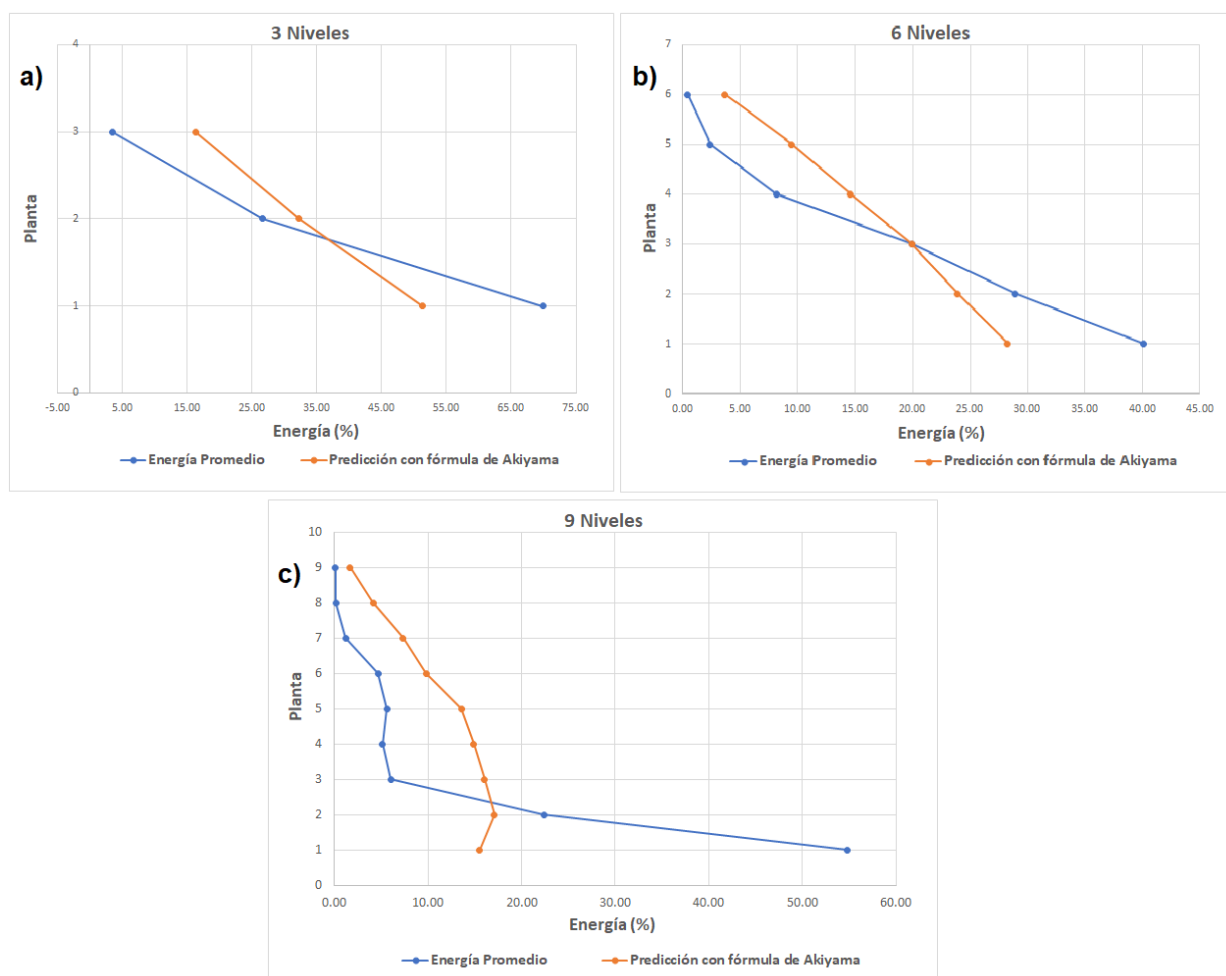
Distribución energía según Akiyama 3 niveles												
Planta	K_k (N/mm)	\bar{m}_k	$\bar{\alpha}_{k\text{ opt}}$	S_k	α_k	$\alpha_{k\text{ opt}}$	p_k	p_{tk}	n	$S_k (p_k \cdot p_{tk})^{-n}$	E_{HK}/E_H (%)	E prom (%)
1	53541.67	1.00	1.00	1.00	0.31	0.31	1.00	1.00	2	1.00	51.33	69.88
2	55000.00	0.65	1.23	0.63	0.38	0.38	1.00	1.00	2	0.63	32.32	26.69
3	40666.67	0.31	1.59	0.32	0.49	0.49	1.00	1.00	2	0.32	16.35	3.43
1.95												
Distribución energía según Akiyama 6 niveles												
Planta	K_k (N/mm)	\bar{m}_k	$\bar{\alpha}_{k\text{ opt}}$	S_k	α_k	$\alpha_{k\text{ opt}}$	p_k	p_{tk}	n	$S_k (p_k \cdot p_{tk})^{-n}$	E_{HK}/E_H (%)	E prom (%)
1	97857.14	1.00	1.00	1.00	0.21	0.21	1.00	1.00	2	1.00	28.23	40.04
2	99877.83	0.82	1.13	0.85	0.24	0.24	1.00	1.00	2	0.85	23.92	28.94
3	95416.67	0.65	1.27	0.71	0.27	0.27	1.00	1.00	2	0.71	19.92	19.94
4	91298.70	0.48	1.45	0.52	0.30	0.30	1.00	1.00	2	0.52	14.62	8.17
5	81111.11	0.31	1.68	0.34	0.35	0.35	1.00	1.00	2	0.34	9.55	2.44
6	74416.67	0.15	2.14	0.13	0.45	0.45	1.00	1.00	2	0.13	3.76	0.47
3.54												
Distribución energía según Akiyama 9 niveles												
Planta	K_k (N/mm)	\bar{m}_k	$\bar{\alpha}_{k\text{ opt}}$	S_k	α_k	$\alpha_{k\text{ opt}}$	p_k	p_{tk}	n	$S_k (p_k \cdot p_{tk})^{-n}$	E_{HK}/E_H (%)	E prom (%)
1	149000.00	1.00	1.00	1.00	0.12	0.12	1.00	1.00	2	1.00	15.52	54.82
2	123333.33	0.88	1.09	1.10	0.13	0.13	1.00	1.00	2	1.10	17.05	22.39
3	115208.33	0.76	1.18	1.03	0.14	0.14	1.00	1.00	2	1.03	16.05	6.01
4	104166.67	0.64	1.28	0.96	0.15	0.15	1.00	1.00	2	0.96	14.90	5.13
5	91458.33	0.53	1.39	0.87	0.17	0.17	1.00	1.00	2	0.87	13.56	5.59
6	93500.00	0.41	1.53	0.63	0.18	0.18	1.00	1.00	2	0.63	9.80	4.68
7	82000.00	0.30	1.71	0.47	0.20	0.20	1.00	1.00	2	0.47	7.31	1.17
8	77857.14	0.19	1.98	0.27	0.24	0.24	1.00	1.00	2	0.27	4.13	0.15
9	58900.00	0.08	2.60	0.11	0.31	0.31	1.00	1.00	2	0.11	1.68	0.07
6.44												

Nota. E prom sombreado es la energía promedio de cada planta calculada para los 25 sismos.

En las tablas anteriores se compara la distribución de energía hasta llevar al colapso para las 3 estructuras analizadas para los 25 sismos considerados, se tiene el ratio de energía según Akiyama $\frac{E_{H,k}}{E_H}$ versus el promedio de distribución de energía E_{prom} .

Figura 53

Distribución de energía EM de 9 niveles.



Nota. a) Comparación de distribución de energía para EM de 3 niveles. b) Comparación de distribución de energía para EM de 6 niveles. c) Comparación de distribución de energía para EM de 9 niveles.

La propuesta de Akiyama para la estructura EM de 3 y 6 niveles predice de manera conservadora la distribución de energía. Sin embargo, en el caso de la estructura EM de 9 niveles, se ve diferencias notables, sobre todo en las plantas inferiores.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Resultados Para Hipótesis Específicas

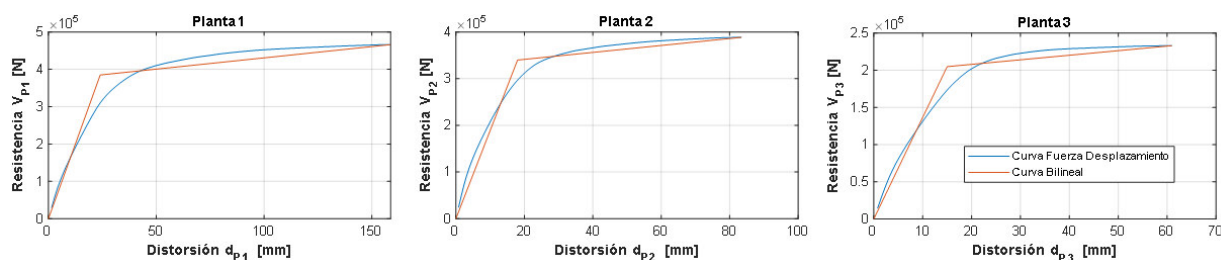
5.1.1. Hipótesis Especifica 1

Realizando un análisis no lineal Pushover se determinan las curvas de capacidad y resistencia de las plantas de estructuras prototipo en Tacna 2023.

Mediante la definición de modelos constitutivos del concreto y acero, definición de elementos estructurales, zona de comportamiento no lineal tipo fibras, armado de la estructura y aplicación de análisis no lineal Pushover empleando el OpenSeesPy se determinaron las curvas de capacidad, este análisis se realizó en el numeral 4.2, un ejemplo para la estructura de 3 niveles se muestra en la Figura 54. Los resultados son muy similares de manera proporcional por los obtenidos en sus resultados por Mota (2017).

Figura 54

Curvas de resistencia estructura de 3 niveles.



Nota. La idealización de la curva bilineal fue que ambas curvas tengan la misma energía.

Existen diversos estudios que definen la forma de idealizar las curvas de capacidad, para la investigación se consideró las recomendaciones del FEMA-356 (2000).

Para validar estos resultados se compararon con el software SAP2000, obteniéndose resultados muy similares, la comparación se muestra en el Anexo F. Las curvas de capacidad para las edificaciones de 6 y 9 niveles se muestran en las Figuras 35 y 36.

5.1.2. Hipótesis Específica 2

Aplicando la metodología de balance energético de Housner-Akiyama se dimensionan los disipadores histeréticos para reforzar las estructuras prototipo en Tacna 2023.

Se aplicó la teoría de balance de energía propuesto por Housner-Akiyama y se dimensionaron disipadores dependientes del desplazamiento del tipo CRP. Los resultados obtenidos para la estructura de tres niveles se presentan en la Tabla 19:

Tabla 19

Resumen de dimensionado de estructura ED 3 niveles.

Planta	m_k (N s ² /mm)	M	h_k (mm)	d_{rk} (mm)	$V_{pyk,MPC}$ (N)	d_{pyk} (mm)	V_{pyk} (N)	K_{pk}
1	85.79	247.46	4000.00	159.00	466320	24.00	385000	16041.67
2	85.05		3000.00	83.00	388600	18.00	340000	18888.89
3	76.62		3000.00	61.00	233160	15.00	205000	13666.67

Planta	$d_{dyk} \leq 0.4 d_{pyk}$		$V_{dyk} \leq V_{pyk,MPC}$		K_{dk}
1	9.60	OK	360000	OK	37500.00
2	7.20	OK	260000	OK	36111.11
3	6.00	OK	162000	OK	27000.00

Planta	θ°	$K_{dk}/(\cos\theta)^\circ$	$V_{dyk}/\cos\theta^\circ$	Nº disp.	K_{Dk} (N/mm)	V_{Dk} (N)	K_k (N/mm)
1	38.66	61500.33	461026	2.00	30750	230513	53541.67
2	30.96	49107.25	303198	2.00	24554	151599	55000.00
3	30.96	36717.11	188915	2.00	18359	94458	40666.67

$T_1 =$	0.487	s
---------	--------------	---

γ	A_c (mm ²)	A (mm ²)	η	fk	Lw (mm)	E (Mpa)	K_{CRP} (N/mm ²)
0.60	875	1750	0.500	1.25	6400	180000	30762
0.60	625	1375	0.455	1.28	5830	180000	24682
0.60	500	900	0.556	1.22	5830	180000	18775

Nota. En la tabla la rigidez del disipador CRP, K_{CRP} es aproximadamente lo mismo que la rigidez requerida para los disipadores K_{Dk} , para una distribución óptima de resistencia.

Las rigideces de las plantas de estructura ED es la siguiente $K_{CRP1} = 30662$ N/mm², $K_{CRP2} = 24682$ N/mm², $K_{CRP3} = 18775$ N/mm². Y las secciones de los disipadores de cada planta se muestran en la Tabla anterior.

El dimensionado de los disipadores CRP son conservadores de manera proporcional con los obtenidos según Mota (2017).

5.1.3. Hipótesis Específica 3

Mediante un análisis no lineal dinámico se determinan la historia de desplazamientos y fuerzas de corte con los cuales se obtienen la energía sísmica en las diferentes plantas de las edificaciones prototipo en Tacna 2023.

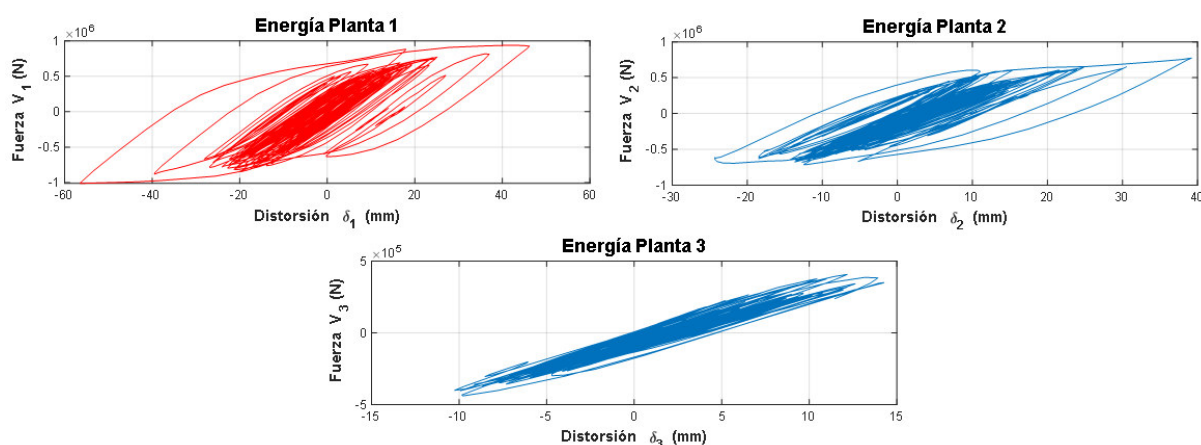
Se seleccionaron 25 registros sísmicos, los cuales fueron escalados hasta llevar a la resistencia límite de las estructuras (antes de producir el colapso) mediante el análisis no lineal dinámico con OpenSeesPy.

Para cada registro sísmico aplicado se determinó la respuesta de desplazamientos y fuerza de corte, aplicando el método numérico del Trapecio, se hizo la integración, dando como resultado la energía producida por la acción sísmica.

A continuación, se presenta un ejemplo de este análisis para la estructura EM de 3 niveles sometido al sismo 04. Los resultados se visualizan en las Figura 55. En cuanto a la historia de repuestas de desplazamientos y fuerzas de corte tuvieron mayor intensidad en los pisos inferiores como los obtenidos por Velasco (2021).

Figura 55

Resumen de curvas histerética de EM de 3 niveles por sismo 04.



Nota. La distorsión máxima sucede en la planta 1 aproximadamente 60 mm.

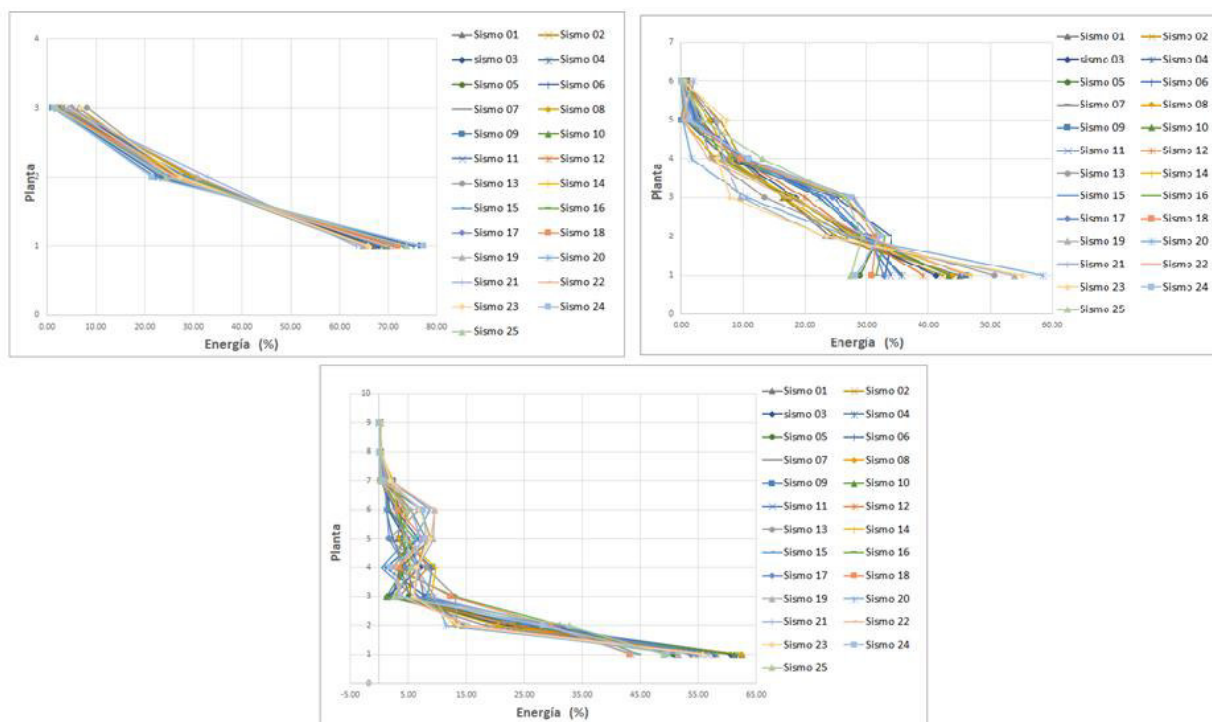
5.2. Resultados Para Hipótesis General

Mediante el análisis no lineal dinámico se obtiene la energía sísmica en las diferentes plantas de estructuras prototipo y estas se distribuyen de acuerdo a la resistencia que ofrecen la estructura principal más la estructura con disipadores hysteréticos analizados con método de balance energético en Tacna 2023.

Con la energía obtenida mediante integración numérica de Trapecio de las curvas hysteréticas de V_k vs δ_k para cada sismo, fácilmente se puede obtener las ratios de porcentaje de distribución de energía en cada planta. La distribución de energía porcentual se ven en la Figura 56. La energía acumulada en cada planta presenta una reducción hacia los pisos superiores, tal como lo obtenido por Riascos (2021).

Figura 56

Ratios de distribución de energía para EM de 3, 6 y 9 niveles.



Nota. Para estructura de 6 niveles se ve mayor dispersión de la distribución de energía.

VI. CONCLUSIONES

6.1. Cumplimiento del Objetivo General

con la energía obtenida mediante integración numérica de Trapecio de las curvas histeréticas de V_k vs δ_k para cada sismo, se obtuvieron los ratios de porcentaje de distribución de energía en cada planta. Los promedios más altos de distribución de energía se dan en los niveles inferiores, para la estructura de 3 niveles para la planta 1 es 69,88%, planta 2 es 26,69%; para estructura de 6 niveles la planta 1 es 40,04%, planta 2 es 28,94%, planta 3 es 19,94%; para la estructura de 9 niveles, planta 1 es 54,82%, planta 2 es 22,39%.

6.2. Cumplimiento del Objetivo Específico 1: En cuanto a determinar las curvas capacidad y resistencia

Mediante la definición de modelos constitutivos del concreto y acero, definición de elementos estructurales, zona de comportamiento no lineal tipo fibras, armado de la estructura y aplicación de análisis no lineal Pushover empleando el OpenSeesPy se determinaron las curvas de capacidad y/o resistencia. Para la estructura de 3 niveles, la resistencia máxima de planta 1 es 466 kN; para estructura de 6 niveles, la resistencia máxima de planta 1 es 757 kN; para estructura de 9 niveles, la resistencia máxima de planta 1 es 783 kN.

6.3. Cumplimiento del Objetivo Específico 2: En cuanto a dimensionar disipadores histeréticos

Se aplicó la teoría de balance de energía propuesto por Housner-Akiyama y se dimensionaron disipadores dependientes del desplazamiento del tipo CRP. Para la estructura ED de 3 plantas, las rigideces son $K_{CRP1} = 30662$ N/mm, $K_{CRP2} = 24682$ N/mm, $K_{CRP3} = 18775$

N/mm. Las secciones de los disipadores CRP son A_{c1} 875 mm², A_1 1750 mm², A_{c2} 625 mm², A_2 1375mm², A_{c3} 500 mm² y A_3 900 mm².

6.4. Cumplimiento del Objetivo Específico 3: En cuanto a obtener la energía sísmica en plantas de estructura

Se seleccionaron 25 registros sísmicos, los cuales fueron escalados hasta llevar a la resistencia límite de las estructuras (antes de producir el colapso) mediante el análisis no lineal dinámico con OpenSeesPy. Se determinó la historia respuesta de desplazamientos y fuerza de corte, aplicando el método numérico del Trapecio, se hizo la integración, dando como resultado la energía producida por la acción sísmica.

VII. RECOMENDACIONES

- A futuros investigadores, realizar más análisis para la validación de la fórmula de predicción de distribución de energía propuesta por Akiyama, ya que, en la presente investigación, para la estructura de 9 niveles, no se obtuvieron ratios similares a dicha propuesta.
- A futuros investigadores, para determinar las curvas de resistencia considerar los efectos de falla de los elementos estructurales, esto podría influir en los desplazamientos y ductilidad de las curvas de capacidad.
- A futuros investigadores considerar secciones comerciales de disipadores CRP, para determinar la rigidez lateral que aporta a la estructura, y así obtener ratios más conservadoras a la realidad.
- A futuros investigadores seleccionar y buscar sismos con espectros muy similares al espectro de diseño, para que los factores de escala sean pequeños e ideales (entre 1 y 4) para llevar a las estructuras al colapso, para determinar historias de respuesta de desplazamiento y fuerzas de corte más conservadores.

VIII. REFERENCIAS

- Aguaguíña, M., Zhou, Y. y Zhou, Y. (2020). Data supporting the development of loading protocols for seismic qualification of BRBs considering global performance requirements. *Data in Brief*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104803>
- Akiyama, H. (1985). *Earthquake-resistant limit state design for buildings*. (2da. ed.). University of Tokyo Press.
- Akiyama, H. (2003). *Metodología de proyecto sismorresistente de edificios basada en el balance energético*. Edición en español. Editorial Reverté, S. A.
- AlHamaydeh, M., Abed, F. y Mustapha, A. (2016). Key parameters influencing performance and failure modes for BRBs using nonlinear FEA. *Journal of Constructional Steel Research*. 116, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.038>
- Arango, S., Paz, A. y Duque, M. (2009). Propuesta Metodológica para la Evaluación del Desempeño Estructural de una Estantería Metálica. *Revista EIA*, 12, 139-154. <https://www.researchgate.net/publication/41816267>
- American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute [ASCE/SEI] 7-22. (2022). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784415788>.
- American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute [ASCE/SEI] 41-23. (2023). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784416112>

- Barbagallo, F., Bosco, M., Marino, E. y Rossi, P. (2019). Seismic design and performance of dual structures with BRBs and semi-rigid connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 158, 306–316. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.03.030>
- Benavent, A. (2007). An energy-based damage model for seismic response of steel structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36(9), 1049–1064. <https://doi.org/10.1002/eqe.720B>.
- Benavent, A. (2009). A brace-type seismic damper based on yielding the walls of hollow structural sections. *Engineering Structures*, 32(7), 1113–1122. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.01.020>
- Benavent, A (2024). *Proyecto de Estructuras con Disipadores Dependientes del Desplazamiento según Nuevo EN 1998*. [Apuntes del curso Control Dinámico de Estructuras]. Master en Ingeniería Sísmica UPM: Dinámica de Suelos y Estructuras.
- Benavent, A., López, F. y Pujades, L. (2001). *Capacidad límite última de disipación de energía de estructuras de hormigón armado sometidas a acciones sísmicas*. Edición UPC.
- Benavent, A., Morillas, L., y Vico, J. (2010). A study on using wide-flange section web under-out-of-plane flexure for passive energy dissipation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40(4), 473–490. <https://doi.org/10.1002/eqe.975>
- Chopra, A. (2014). *Dinámica de estructuras*. (4ta. Ed.). Editorial Pearson Educación.
- Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres [CISMID]. (23 febrero 2025). *Universidad Nacional de Ingeniería FIC-UNI*. Disponible en <http://www.cismid.uni.edu.pe/>

- Cosenza, E., y Manfredi, G. (1997). The improvement of the damage index performance through the use of an energy approach. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, 991–1009. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199710\)26:10<991](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199710)26:10<991)
- Deierlein, G., Reinhorn, A. y Willford, M. (2010). *Nonlinear Structural Analysis For Seismic Design*. National Institute of Standards and Technology. <https://www.nehrp.gov/pdf/nistgcr10-917-5.pdf>
- Espejo, R. (2017). *Estructuras III A 2017*. [Apuntes de curso]. <https://slideplayer.es/slide/11874379/>
- Federal Emergency Management Agency [FEMA] 356. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. American Society of Civil Engineers.
- Fuentes, J. (2019). *Procedimientos para el Análisis y Diseño de Estructuras con Sistemas de Disipación de Energía en el Perú*. [Tesis de maestría, Universidad Pontificia Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/15624>
- Hoveidae, N., Tremblay, R., Rafezy, B. y Davaran, A. (2015). Numerical investigation of seismic behavior of short-core all-steel buckling restrained braces. *Journal of Constructional Steel Research*. 114, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.06.005>
- Housner, G. (1956). Limit design of structures to resist earthquake. *Proceeding of the first world conference on earthquake engineering*.
- Huang, D., Du, W. y Zhu, H. (2017), A procedure to select ground-motion time histories for deterministic seismic hazard analysis from the Next Generation Attenuation (NGA) database, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, 1725–1739. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1725-2017>

- Idriss, M. (1985). Evaluating seismic risk in engineering practice. *In Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, 255–320.
- Kimura, K., Takeda, Y., Yoshioka, K., Furuya, N. y Takemoto, Y. (1976). *An experimental study on braces encased in steel tube and mortar*. Proc. Annual Meeting of the Architectural Institute of Japan.
- Mander, B., Priestley, J. y Park, R. (1988). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 114(8).
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1988)114:8(1804))
- Maza A. (2019). *Efectos del Disipador Sísmico Metálico de Fluencia en Estructuras de Edificaciones Sociales en la Ciudad de Huaraz*. [Tesis de doctorado, Universidad nacional Federico Villareal]. <https://hdl.handle.net/20.500.13084/3288>
- Mendoza, W. (2020). *Análisis sísmico de edificación*. Fondo Editorial UPT.
- Mota, S. (2017). *Reacondicionamiento Sísmico de Edificios de Hormigón Armado con el Primer Piso Blando Mediante Disipadores de Energía: aplicación a la República Dominicana*. [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid].
<https://oa.upm.es/47345/>
- Narváez, M. (2019). *Análisis Comparativo Técnico-Económico de una Edificación de 12 Pisos, Empleando Amortiguadores de Fluido Viscoso y Disipadores Histeréticos*. [Tesis de maestría, Universidad Pontificia Católica del Perú].
<http://hdl.handle.net/20.500.12404/16396>
- Ottazzi, G. (2011). *Concreto Armado I*. Pontificia Universidad Católica del Perú.

- Pamela, G., Reinoso, E., y Ordaz, M. (2013). A classification of earthquake ground motion records based on their impulsive character. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 50, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.03.003>
- Pandikkadavath, M. y Sahoo, D. (2016). Analytical investigation on cyclic response of buckling-restrained braces with short yielding core segments. *International Journal of Steel Structures*, 16, 1273–1285. <https://doi.org/10.1007/s13296-016-0083-y>
- Park, R., y Paulay, T. (1975). *Reinforced Concrete Structures*. John Wiley & Sons. <https://es.scribd.com/document/323238649/Reinforced-Concrete-Structures-R-Park-T-paulay>
- Riascos, M. (2021). *Distribución de la energía de deformación plástica entre estructura principal y disipadores histeréticos y su aplicación en los métodos energéticos* [Tesis de fin de máster, Universidad Politécnica de Madrid].
- Ruiz, S. (2011). *Recomendaciones para diseño de edificios con disipadores de energía (en el marco de las NTCDS del RCDF), con comentarios*. (Serie de investigación y Desarrollo). Instituto de Ingeniería.
- Structural Engineers Association of California [SEAOC] (1995), *Vision 2000 Report on performance based seismic engineering of buildings*, Structural Engineers Association of California, I.
- Taipe, P y Yáñez, P. (2017). *Análisis comparativo de la respuesta en el tiempo de estructuras ante un sismo impulsivo y un sismo no impulsivo*. [Tesis de pregrado, Universidad Central de Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/9603>

- Teran, A. y Virto, N. (2010). Preliminary design of low-rise buildings stiffened with buckling-restrained braces by a displacement-based approach. Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering Compte Rendu de la 9ième Conférence Nationale Américaine et 10ième Conférence Canadienne de G. P. *Earthquake Spectra* 25(1).
https://doi.org/10.1193/1.3054638?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- Tremblay, R., Bolduc, P., Neville, R. y DeVall, R. (2006). Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 33, 183–198. <https://doi.org/10.1139/l05-103>
- Velasco, L. (2021). *Diseño óptimo del refuerzo estructural, mediante disipadores CRP, para la adecuación del desempeño sísmico de estructuras aporticadas de hormigón armado* [Tesis de fin de máster, Universidad Politécnica de Valencia].
- Wang, G., Youngs, R., Power, M. y Li, Z. (2015), Design ground motion library: an interactive tool for selecting earthquake ground motions, *Earthquake Engineering P*, 31, 617–635.
https://gwang.people.ust.hk/Publications/Wang.et.al.DGML_EQSpectra2015.pdf
- Watanabe, A., Hitomoi, Y., Saeki, E., Wada, A. y Fujimoto, M. (1988). Properties of braces encased in buckling restrained concrete and Steel tube. *9th World Conf. On Earthquake Engineering*. IV, Tokyo, Japón.
https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/9_vol4_719.pdf

IX. ANEXOS

Anexo A. Matriz de Consistencia

Matriz de consistencia

"Distribución de Energía Sísmica en Plantas de Estructuras Prototipo Reforzadas con Disipadores Histereticos Analizados con Método de Balance Energético en Tacna 2023"					
PROBLEMA	HIPÓTESIS	OBJETIVOS	VARIABLE	INDICADOR	METODOLOGÍA
Problema General	Hipótesis General	Objetivo General			
¿Como se distribuye la energía sísmica en plantas de estructuras prototipo reforzadas con disipadores histeréticos analizados con método de balance energético en Tacna 2023?	Mediante el análisis no lineal dinámico se obtiene la energía sísmica en las diferentes plantas de estructuras prototipo y estas se distribuyen de acuerdo a la resistencia que ofrecen la estructura principal más la estructura con disipadores histeréticos analizados con método de balance energético en Tacna 2023.	Determinar la distribución de energía sísmica en plantas de estructuras prototipo reforzadas con disipadores histeréticos analizados con método de balance energético en Tacna 2023.	V.I. : Análisis no lineal de estructuras reforzadas	Curvas de capacidad	Tipo de Investigación: Explicarivo.
				Método balance de energía	Nivel de Investigación comprendivo.
				Dimensionado de disipadores	Ámbito de Estudio Distribución de energía sísmica en estructuras prototipo Tacna.
				Analisis no lienal dinámico	Población Las estructuras de concreto armado de sistema estructural de pórticos.
Problemas Específicos	Hipótesis Específicas	Objetivos Específicos			
¿Cómo se determinan las curvas de capacidad y resistencia de las plantas de estructuras prototipo en Tacna 2023?	Realizando un análisis no lineal Pushover se determinan las curvas de capacidad y resistencia de las plantas de estructuras.	Determinar las curvas de capacidad y resistencia de las plantas de estructuras prototipo en Tacna 2023.	V.D.: Dsistribución de energía		Muestra 3 estructuras prototipo, sometidas a 25 sismos.
¿Cómo dimensionar disipadores histeréticos bajo el método de balance energético en Tacna 2023?	Aplicando la metodología de balance energético de Housner-Akiyama se dimensionan los disipadores histeréticos para reforzar las estructuras.	Dimensionar disipadores histeréticos bajo el método de balance energético en Tacna 2023.		Curvas histeréticas fuerza desplazamiento	Técnicas de Recolección de Datos Observación directa, análisis documental.
¿Cómo obtener la energía sísmica en pantas de estructura prototipo reforzadas con disipadores histeréticos en Tacna 2023?	Mediante un análisis no lineal dinámico se determinan la historia de desplazamientos y fuerzas de corte con los cuales se obtienen la energía sísmica en las diferentes plantas de las estructuras.	Obtener la energía sísmica en plantas de estructura prototipo reforzadas con disipadores histeréticos en Tacna 2023.		Energía sísmica	Instrumentos Ficha de recolección de datos, planos y fotos

Anexo B. OpenSeesPy análisis no lineal Pushover

INICIO

```
import openseespy.opensees as ops
import openseespy.postprocessing.ops_vis as opsv
import pandas as ps
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
ops.wipe()
ops.model('basic', '-ndm', 2, '-ndf', 3)
```

NODOS, RESTRICCIONES DE NODOS, DIAFRAGMAS

```
nodos = np.loadtxt('Nodos.txt', delimiter = ',')
num_nodos = len(nodos)
for i in range(len(nodos)):
    ops.node(i+1, nodos[i, 1], nodos[i, 2])
for i in range(len(nodos)):
    if i <= 4:
        ops.fix(i+1, 1, 1, 1)
    else:
        ops.fix(i+1, 0, 1, 0)
# Diafrgmas Rigidos
for i in range(4):
    ops.equalDOF(i+6, i+7, 1)
    ops.equalDOF(i+11, i+12, 1)
    ops.equalDOF(i+16, i+17, 1)
```

TRANSFORMACIÓN ELEMENTOS

```
# Columnas y vigas
ops.geomTransf('Linear', 101)
```

MATERIALES Y SECCIONES FIBRA

```
# DEFINICIÓN DE MATERIALES:
fpc = -20.60 # En MPA
epsc0 = -0.002 # Deformación para f'c (0.002)
Ec = 2*fpc/epsc0
fpcu = -17.00
epsU = -0.0045 # Deformación para La tensión de rotura confinado (conservador)

Fy = 412
Es = 196200
b = 0.01
# uniaxialMaterial('Concrete02', matTag, fpc, epsc0, fpcu, epsU, Lambda, ft, Ets)
ops.uniaxialMaterial('Concrete02', 1, fpc, epsc0, fpcu, epsU, 0.3, 2.83, 0.04*fpc/(2.0*fpc/Ec))
# uniaxialMaterial('Steel02', matTag, Fy, E0, b, *params, a1=a2*Fy/E0, a2=1.0, a3=a4*Fy/E0, a4=1.0, sigInit=0.0)
ops.uniaxialMaterial('Steel02', 2, Fy, Es, b, 18, 0.925, 0.15, 0.05, 1.0, 0.05, 1.0, 0.0)
```

```

# Columnas C1 350x350 nivel 1 2
GJ1 = 1.89e13
ops.section('Fiber', 1, '-GJ', GJ1)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-175, -175], *[175, 175])
ops.layer('straight', 2, 3, 284, *[-125, -125], *[-125, 125])
ops.layer('straight', 2, 3, 284, *[125, -125], *[125, 125])
ops.layer('straight', 2, 2, 284, *[0, -125], *[0, 125])

# Columnas C2 300x300 nivel 3
GJ2 = 1.02e13
# section('Fiber', secTag, '-GJ', GJ)
ops.section('Fiber', 2, '-GJ', GJ2)
# patch('rect', matTag, numSubdivY, numSubdivZ, *crdsI, *crdsJ)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-150, -150], *[150, 150])
# layer('straight', matTag, numFiber, areaFiber, *start, *end)
ops.layer('straight', 2, 3, 129, *[-100, -100], *[-100, 100])
ops.layer('straight', 2, 3, 129, *[100, -100], *[100, 100])
ops.layer('straight', 2, 2, 200, *[0, -100], *[0, 100])

# Viga 300x600 nivel 1 y 2
GJ3 = 3.32E+13
ops.section('Fiber', 3, '-GJ', GJ3)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-150, -300], *[150, 300])
ops.layer('straight', 2, 2, 127, *[-100, -250], *[100, -250])
ops.layer('straight', 2, 3, 286, *[-100, 250], *[100, 250])
ops.layer('straight', 2, 2, 127, *[-100, 0], *[100, 0])

# Viga Roof 250x500
GJ4 = 1.60E+13
ops.section('Fiber', 4, '-GJ', GJ4)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-125, -250], *[125, 250])
ops.layer('straight', 2, 2, 127, *[-75, -200], *[75, -200])
ops.layer('straight', 2, 3, 200, *[-75, 200], *[75, 200])
ops.layer('straight', 2, 2, 127, *[-75, 0], *[75, 0])

# Secciones Elásticas
A1, A2, A3, A4 = 122500, 90000, 180000, 125000
# section('Elastic', secTag, E_mod, A, Iz)
ops.section('Elastic', 5, Ec, A1, 1.25e9) # C2 350x350 nivel 1 2
ops.section('Elastic', 6, Ec, A2, 6.75e8) # C1 300x300 nivel 1 2
ops.section('Elastic', 7, Ec, A3, 5.40e9) # Viga Int 300x600
ops.section('Elastic', 8, Ec, A4, 2.60e9) # Viga Ext 250x500

```

ELEMENTOS

```

# beamIntegration('HingeRadau', tag, secI, lpI(d/2), secJ, lpJ, secE(seccion central))
ops.beamIntegration('HingeRadau', 1, 1, 200, 1, 200, 5)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 2, 2, 200, 2, 200, 6)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 3, 3, 200, 3, 200, 7)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 4, 4, 200, 4, 200, 8)
for i in range(1,28):
    if i <= 10:
        #Columnas centrales C1 nivel 1 y 2
        # ops.element('forceBeamColumn', eLeTag, *eLeNodes, transfTag, integrationTag, '-mass', mass=0.0)
        ops.element('forceBeamColumn', i, i, i+5, 101, 1)
    if 11 <= i and i <= 15:
        #Columnas centrales C2 nivel 3
        ops.element('forceBeamColumn', i, i, i+5, 101, 2)
    if 16 <= i and i <= 19:
        #Vigas nivel 1
        ops.element('forceBeamColumn', i, i-10, i-9, 101, 3)
    if 20 <= i and i <= 23:
        #Vigas nivel 2
        ops.element('forceBeamColumn', i, i-9, i-8, 101, 3)
    if 24 <= i and i <= 27:
        #Vigas nivel roof
        ops.element('forceBeamColumn', i, i-8, i-7, 101, 4)

```

CARGAS EN ELEMENTOS

```

# timeSeries/Constraint (no depende ddl tiempo) | tSTag | 1 (fact de escala, opcional)
ops.timeSeries('Constant', 1)
# pattern('Plain', patternTag, tSTag, '-fact', fact)
ops.pattern('Plain', 1, 1, '-fact', 1)
Wx1 = 2.88 #N/mm
Wx2 = 2.12
Wy1 = 4.23
Wy2 = 2.94
# eleLoad('-ele', *eleTags, '-range', eleTag1, eleTag2, '-type', '-beamUniform', Wy, <Wz>, Wx=0.0)
ops.eleLoad('-range', 1, 10, '-type', '-beamUniform', 0, 0, -Wx1)
ops.eleLoad('-range', 11, 15, '-type', '-beamUniform', 0, 0, -Wx2)
ops.eleLoad('-range', 16, 23, '-type', '-beamUniform', -Wy1, 0, 0)
ops.eleLoad('-range', 24, 27, '-type', '-beamUniform', -Wy2, 0, 0)
W1, W2, W3, L = 35.316, 35.316, 25.0155, 5000
for i in range(6, 21):
    if i == [6, 11]:
        ops.load(i, 0, -W1*L/2, -W1*L**2/12)
    if i == [10, 15]:
        ops.load(i, 0, -W1*L/2, W1*L**2/12)
    if i == 16:
        ops.load(i, 0, -W3*L/2, -W3*L**2/12)
    if i == 20:
        ops.load(i, 0, -W3*L/2, W3*L**2/12)
    if i == [7, 8, 9, 12, 13, 14]:
        ops.load(i, 0, -2*W1*L/2, 0)
    if i == [17, 18, 19]:
        ops.load(i, 0, -2*W3*L/2, 0)

```

CARGA AXIAL

```

# Crear el analisis
ops.system('UmfPack')
ops.numberer('RCM')
ops.constraints('Plain')
ops.test('EnergyIncr', 0.000001, 100)
ops.algorithm('Newton')
Nsteps = 10
ops.integrator('LoadControl', 1/Nsteps)
# determine the next time step for an analysis
# Analysis Type
ops.analysis('Static')
ok = ops.analyze(Nsteps) # apply gravity

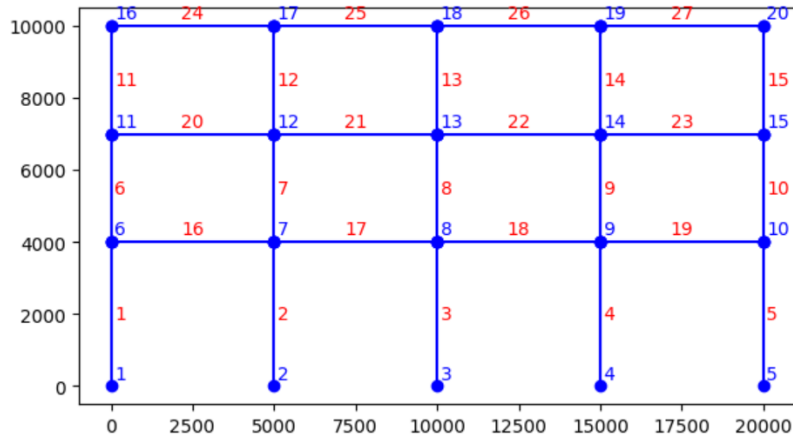
if ok == 0:
    print('Carga axial aplicada')
else:
    print('Error al aplicar carga axial')
ops.wipeAnalysis()

Carga axial aplicada

```

PLOTEO

```
# plot model with tag labels
szer, wys = 18., 10. # Tamaño de la ventana
fig = plt.figure(figsize=(szer/2.54, wys/2.54))
opsv.plot_model()
```



ANÁLISIS NO LINEAL ESTÁTICO - PUSHOVER

```
if ok == 0: # Si todo funciona, proseguir
# Define la carga pushover
ops.timeSeries('Linear', 2)
ops.pattern('Plain', 2, 2)
ops.load(8, 1e4, 0, 0)
ops.load(13, 2e4, 0, 0)
ops.load(18, 3e4, 0, 0)

ops.constraints('Plain') # Para 2D
ops.numberer('RCM') # Para 2D
ops.system('BandGeneral')
ops.test('EnergyIncr', 1e-6, 100)
ops.algorithm('Newton')
maxDisp = 200
NumSteps = 100
deltaDisp = maxDisp/NumSteps
ops.integrator('DisplacementControl', 18, 1, deltaDisp)
# determine the next time step for an analysis
# Analysis Type
ops.analysis('Static')

ops.recorder('Node', '-file', 'Push_DisRoof.out', '-time', '-node', 18, '-dof', 1, 'disp')
ops.recorder('Node', '-file', 'Push_FzCorteBase.out', '-time', '-nodeRange', 1, 5, '-dof', 1, 'reaction')
ops.recorder('Node', '-file', 'Push_Displaz.out', '-time', '-node', 8, 13, 18, '-dof', 1, 'disp')

ops.recorder('Element', '-file', 'Push_FzCort.out', '-time', '-eleRange', 1, 15, '-dof', 1, 'globalForce')

# nodeDisp(nodeTag, dof=-1)
while ops.nodeDisp(18,1) <= maxDisp:
    for n in [1, 2, 4, 10]: #Para generar diferentes pasos
        ops.integrator('DisplacementControl', 18, 1, deltaDisp/n)
        ok = ops.analyze(n)
        if ok != 0:
            ops.test('NormDispIncr', 1e-5, 1000)
            ops.algorithm('Newton', '-initial')
            ok = ops.analyze(n)
            ops.test('EnergyIncr', 1e-6, 100)
        if ok != 0:
            ops.test('NormDispIncr', 1e-4, 1000)
            ops.algorithm('Newton', '-initial')
            ok = ops.analyze(n)
            ops.test('EnergyIncr', 1e-6, 100)
        if ok != 0:
            ops.test('NormDispIncr', 1e-3, 1000)
            ops.algorithm('Newton', '-initial')
            ok = ops.analyze(n)
            ops.test('EnergyIncr', 1e-6, 100)
```



```

        if ok != 0:
            ops.test('NormDispIncr', 1e-2, 1000)
            ops.algorithm('Newton', '-initial')
            ok = ops.analyze(n)
            ops.test('EnergyIncr', 1e-6, 100)
        if ok == 0:
            break
    if ok != 0:
        print('El analisis Pushover fallo', ops.nodeDisp(18,1))
        break
    if ok == 0:
        print('El analisis es correcto')
    ops.wipeAnalysis()
ops.remove('recorders')

```

El analisis es correcto

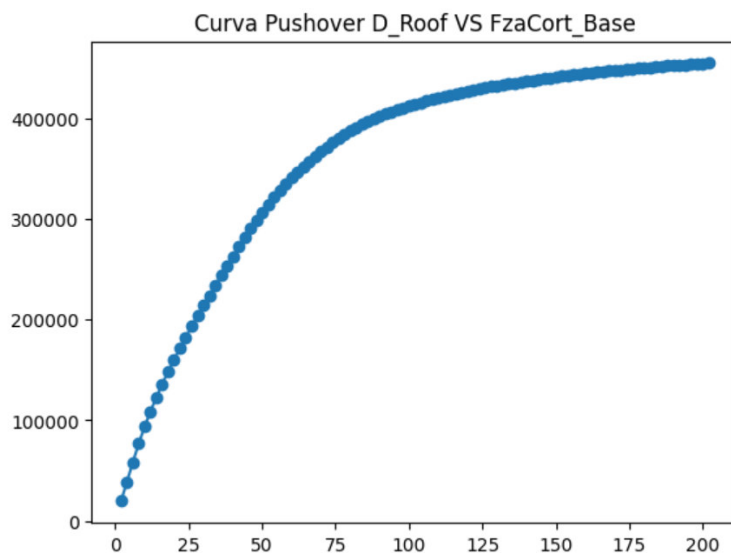
GRAFICA RPTA NL PUSHOVER

```

PushD = np.loadtxt('Push_DisRoof.out')
PushL = np.loadtxt('Push_FzCorteBase.out')
V1 = -PushL[:,1]-PushL[:,2]-PushL[:,3]-PushL[:,4]-PushL[:,5]
plt.figure()
plt.plot(PushD[:,1], V1, '-o')
plt.title('Curva Pushover D_Roof VS FzaCort_Base')
plt.show()

Disp = np.loadtxt('Push_Displaz.out')
FCort = np.loadtxt('Push_FzCort.out')
V1 = -FCort[:,1]-FCort[:,2]-FCort[:,3]-FCort[:,4]-FCort[:,5]
V2 = -FCort[:,6]-FCort[:,7]-FCort[:,8]-FCort[:,9]-FCort[:,10]
V3 = -FCort[:,11]-FCort[:,12]-FCort[:,13]-FCort[:,14]-FCort[:,15]
DR1 = Disp[:,1]; DR2 = Disp[:,2]-Disp[:,1]; DR3 = Disp[:,3]-Disp[:,2]
plt.figure()
plt.subplot(3,1,1)
plt.plot(DR1, V1, '-o')
plt.title('DR1 VS V1')
plt.subplot(3,1,2)
plt.plot(DR2, V2, '-o')
plt.title('DR2 VS V2')
plt.subplot(3,1,3)
plt.plot(DR3, V3, '-o')
plt.title('DR3 VS V3')
plt.show()

```



Anexo C. OpenSeesPy análisis no lineal dinámico

INICIO

```
import openseespy.opensees as ops
import openseespy.postprocessing.ops_vis as opsv
import pandas as ps
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math

ops.wipe()
ops.model('basic', '-ndm', 2, '-ndf', 3)
```

NODOS, RESTRICCIONES DE NODOS

```
nodos = np.loadtxt('Nodos.txt', delimiter = ',')
for i in range(len(nodos)):
    ops.node(i+1, nodos[i, 1], nodos[i, 2])
for i in range(len(nodos)):
    if i <= 4:
        ops.fix(i+1, 1, 1, 1)
    else:
        ops.fix(i+1, 0, 1, 0)
# Nodos Disipador
nodosDisip = np.loadtxt('NodosDisip.txt', delimiter = ',')
for i in range(len(nodosDisip)):
    ops.node(i+21, nodosDisip[i, 1], nodosDisip[i, 2])
```

TRANSFORMACIÓN ELEMENTOS

```
# Columnas y vigas
ops.geomTransf('Linear', 101)
```

MATERIALES Y SECCIONES FIBRA

```
# DEFINICIÓN DE MATERIALES:
fpc = -20.60 # En MPA
epsc0 = -0.002 # Deformación para f'c (0.002)
Ec = 2*fpc/epsc0
fpcu = -17.23
epsU = -0.0045 # Deformación para La tensión de rotura confinado (conservador)
Fy = 412
Es = 196200
b = 0.01
# uniaxialMaterial('Concrete02', matTag, fpc, epsc0, fpcu, epsU, lambda, ft, Ets)
ops.uniaxialMaterial('Concrete02', 1, fpc, epsc0, fpcu, epsU, 0.3, 2.83, 0.04*fpc/(2.0*fpc/Ec))
# uniaxialMaterial('Steel02', matTag, Fy, E0, b, *params, a1=a2*Fy/E0, a2=1.0, a3=a4*Fy/E0, a4=1.0, sigInit=0.0)
ops.uniaxialMaterial('Steel02', 2, Fy, Es, b, 18, 0.925, 0.15, 0.05, 1.0, 0.05, 1.0, 0.0)
# Columnas C1 350x350 nivel 1 2
GJ1 = 1.89e13
ops.section('Fiber', 1, '-GJ', GJ1)
ops.patch('rect', 1, 10, 10, *[-175, -175], *[175, 175])
ops.layer('straight', 2, 3, 284, *[-125, -125], *[-125, 125])
ops.layer('straight', 2, 3, 284, *[125, -125], *[125, 125])

ops.layer('straight', 2, 2, 127, *[-75, 0], *[75, 0])

# Secciones Elásticas
A1, A2, A3, A4 = 122500, 90000, 180000, 125000
# section('Elastic', secTag, E_mod, A, Iz)
ops.section('Elastic', 5, Ec, A1, 1.25e9) # C2 350x350 nivel 1 2
ops.section('Elastic', 6, Ec, A2, 6.75e8) # C1 300x300 nivel 1 2
ops.section('Elastic', 7, Ec, A3, 5.40e9) # Viga Int 300x600
ops.section('Elastic', 8, Ec, A4, 2.60e9) # Viga Ext 250x500
```

```

FyCRP, EsCRP = 345, 180000
# Define Materiales Disipador
# ops.uniaxialMaterial('SteelMPF', matTag, fyp, fyn, E0, bp, bn, *params, a1=0.0, a2=1.0, a3=0.0, a4=1.0)
ops.uniaxialMaterial('SteelMPF', 3, FyCRP, 1.15*FyCRP, EsCRP, 0.006, 0.006, 25.0, 0.89, 0.16, 0.1, 1, 0.1, 1)
ops.uniaxialMaterial('Fatigue', 4, 3)
a1n, b1n = 25, 35 # Lados del nucleo disipador 1
a1c, b1c = 25, 70 # Lados de conexión disipador 1
a2n, b2n = 25, 25
a2c, b2c = 25, 55
a3n, b3n = 20, 25
a3c, b3c = 20, 45
# G CRP, J nucleo, J conexión
Gs, J1n, J1c, J2n, J2c, J3n, J3c = EsCRP/2.4, 1.02e5, 2.83e5, 0.55e5, 2.57e5, 0.34e5, 1.13e5

# Nucleo Disip
GJ1n = Gs*J1n
ops.section('Fiber', 9, '-GJ', GJ1n)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a1n/2, -b1n/2], *[a1n/2, b1n/2])
GJ2n = Gs*J2n
ops.section('Fiber', 10, '-GJ', GJ2n)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a2n/2, -b2n/2], *[a2n/2, b2n/2])
GJ3n = Gs*J3n
ops.section('Fiber', 11, '-GJ', GJ3n)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a3n/2, -b3n/2], *[a3n/2, b3n/2])

# Conexión Disip
GJ1c = Gs*J1c
ops.section('Fiber', 12, '-GJ', GJ1c)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a1c/2, -b1c/2], *[a1c/2, b1c/2])
GJ2c = Gs*J2c
ops.section('Fiber', 13, '-GJ', GJ2c)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a2c/2, -b2c/2], *[a2c/2, b2c/2])
GJ3c = Gs*J3c
ops.section('Fiber', 14, '-GJ', GJ3c)
ops.patch('rect', 4, 10, 10, *[-a3c/2, -b3c/2], *[a3c/2, b3c/2])

```

ELEMENTOS

```

# ops.beamIntegration('HingeRadau', tag, secI, lpI(d/2), secJ, lpJ, secE(seccion central))
ops.beamIntegration('HingeRadau', 1, 1, 200, 1, 200, 5)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 2, 2, 200, 2, 200, 6)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 3, 3, 200, 3, 200, 7)
ops.beamIntegration('HingeRadau', 4, 4, 200, 4, 200, 8)

# ops.beamIntegration('Lobatto', Tag, SeccionTag, nPC)
ops.beamIntegration('Lobatto', 5, 9, 5)
ops.beamIntegration('Lobatto', 6, 10, 5)
ops.beamIntegration('Lobatto', 7, 11, 5)

ops.beamIntegration('Lobatto', 8, 12, 5)
ops.beamIntegration('Lobatto', 9, 13, 5)
ops.beamIntegration('Lobatto', 10, 14, 5)

```

```

for i in range(1,28):
    if i <= 10:
        #Columnas centrales C1 nivel 1 y 2
        ops.element('forceBeamColumn', i, i, i+5, 101, 1, '-mass', 2.35e-5*A1/9810 )
    if 11 <= i and i <= 15:
        #Columnas centrales C2 nivel 3
        ops.element('forceBeamColumn', i, i, i+5, 101, 2, '-mass', 2.35e-5*A2/9810)
    if 16 <= i and i <= 19:
        #Vigas nivel 1
        ops.element('forceBeamColumn', i, i-10, i-9, 101, 3, '-mass', 2.35e-5*A3/9810)
    if 20 <= i and i <= 23:
        #Vigas nivel 2
        ops.element('forceBeamColumn', i, i-9, i-8, 101, 3, '-mass', 2.35e-5*A3/9810)
    if 24 <= i and i <= 27:
        #Vigas nivel roof
        ops.element('forceBeamColumn', i, i-8, i-7, 101, 4, '-mass', 2.35e-5*A4/9810)

# Elementos Est. Disip
elmtoDisip = np.loadtxt('ElmtoDisip.txt', delimiter = ',')
for i in range(len(elmtoDisip)):
    if i <= 3:
        # ops.element('elasticBeamColumn', eleTag, *eleNodes, secTag, transfTag)
        ops.element('forceBeamColumn', 28+i, int(elmtoDisip[i, 1]), int(elmtoDisip[i, 2]), 101, 8, '-mass', 7.79e-05*a1c*b1c/9810)
    if 4 <= i <= 7:
        ops.element('forceBeamColumn', 28+i, int(elmtoDisip[i, 1]), int(elmtoDisip[i, 2]), 101, 9, '-mass', 7.79e-05*a2c*b2c/9810)
    if 8 <= i <= 11:
        ops.element('forceBeamColumn', 28+i, int(elmtoDisip[i, 1]), int(elmtoDisip[i, 2]), 101, 10, '-mass', 7.79e-05*a3c*b3c/9810)
    if 12 <= i <= 13:
        ops.element('forceBeamColumn', 28+i, int(elmtoDisip[i, 1]), int(elmtoDisip[i, 2]), 101, 5, '-mass', 7.79e-05*a1n*b1n/9810)
    if 14 <= i <= 15:
        ops.element('forceBeamColumn', 28+i, int(elmtoDisip[i, 1]), int(elmtoDisip[i, 2]), 101, 6, '-mass', 7.79e-05*a2n*b2n/9810)
    if 16 <= i <= 17:
        ops.element('forceBeamColumn', 28+i, int(elmtoDisip[i, 1]), int(elmtoDisip[i, 2]), 101, 7, '-mass', 7.79e-05*a3n*b3n/9810)

```

CARGAS EN ELEMENTOS

```

# timeSeries/Constraint (no depende ddl tiempo) | tSTag | 1 (fact de escala, opcional)
ops.timeSeries('Constant', 1)
# Creando patron de carga
# pattern('Plain', patternTag, tSTag, '-fact', fact)
ops.pattern("Plain", 1, 1)
Wx1 = 2.88 #N/mm
Wx2 = 2.12
Wy1 = 4.23
Wy2 = 2.94
# eleLoad('-ele', *eleTags, '-range', eleTag1, eleTag2, '-type', '-beamUniform', Wy, <Wz>, Wx=0.0)
ops.eleLoad('-range', 1, 10, '-type', '-beamUniform', 0, Wx1)
ops.eleLoad('-range', 11, 15, '-type', '-beamUniform', 0, Wx2)
ops.eleLoad('-range', 16, 23, '-type', '-beamUniform', Wy1, 0)
ops.eleLoad('-range', 24, 27, '-type', '-beamUniform', Wy2, 0)

```

MASAS

```

# mass(NODE_TAG, masX N s2/mm), masY, masZ, JX, JY, JZ)
Mzero = 1.0e-6;
ops.mass(8, 72, Mzero, Mzero)
ops.mass(13, 72, Mzero, Mzero)
ops.mass(18, 51, Mzero, Mzero)

```

MODAL

```

N = 3 # Nro de modos
lamda = ops.eigen(N) # Valores propios
lamda = np.array(lamda) # # Convierte la Lista en un array de NumPy, se puede realizar operaciones
wn = lamda**0.5
Tn = 2*np.pi/wn
for i in range(N):
    print('Modo', i+1, 'T = ', round(Tn[i],3), 's', ' w =', round(wn[i],2))

```

```

Modo 1 T = 0.487 s w = 12.91
Modo 2 T = 0.186 s w = 33.77
Modo 3 T = 0.186 s w = 33.78

```

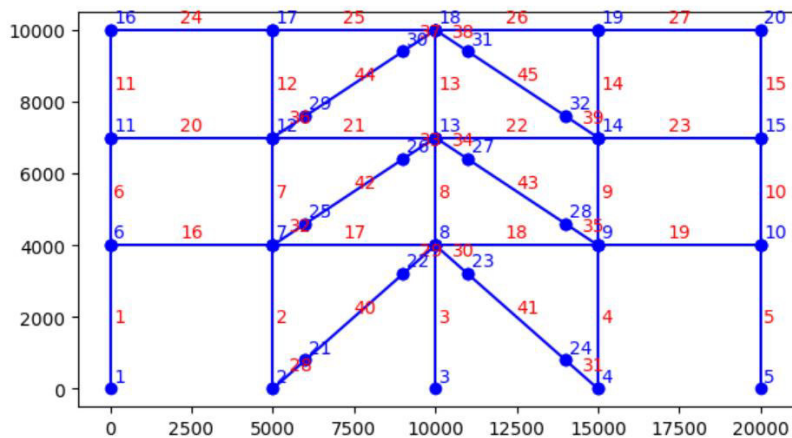
CARGA AXIAL

```
# Crear el analisis
ops.constraints('Transformation') # Para 3D
ops.numberer('RCM') # Para 3D
ops.system('BandGeneral')
ops.test('EnergyIncr', 0.000001, 30)
ops.algorithm('Newton')
Nsteps = 30
ops.integrator('LoadControl', 1/Nsteps)
# determine the next time step for an analysis
# Analysis Type
ops.analysis('Static')
ok = ops.analyze(Nsteps) # apply gravity
if ok == 0:
    print('Carga axial aplicada')
else:
    print('Error al aplicar carga axial')
```

Carga axial aplicada

PLOTEO

```
# plot model with tag labels
szer, wys = 18., 10. # Tamaño de la ventana
fig = plt.figure(figsize=(szer/2.54, wys/2.54))
opsv.plot_model()
```



ANÁLISIS NO LINEAL DINÁMICO

```
# Amortiguamiento Rayleigh
zeta = 0.05
# Determinar los coef alpha y beta... resolviendo un sist matricial
wi = wn[0]
Tj = 1.91*Tn[0]
wj = 2*np.pi/Tj
a0 = zeta*2*wi*wj/(wi+wj)
a1 = zeta*2/(wi+wj)
# ops.rayleigh(alphaM, betaK, betaKinit, betaKcomm)
ops.rayleigh(a0, 0, 0, a1)
print(a0, a1)
# Definir la función de aceleración
ops.timeSeries('Path', 2, '-filePath', 'sismo04.txt', '-dt', 0.02, '-factor', (3.8*9810))
# pattern('UniformExcitation', Tag, dir, '-accel', accelSeriesTag, '-vel0', vel0, '-fact', fact)
ops.pattern('UniformExcitation', 2, 1, '-accel', 2, '-factor', 1.0)

ops.wipeAnalysis()
ops.constraints('Transformation')
ops.numberer('RCM')
ops.system('UmfPack')
# ops.test('NormDispIncr', Tolerancia, pasos)
ops.test('NormDispIncr', 1e-4, 100)
ops.algorithm('KrylovNewton')
ops.integrator('Newmark', 0.5, 0.25)
ops.analysis('Transient')
```

```

t = ops.getTime()
ops.recorder('Node', '-file', 'DespDinDisRoof.out', '-time', '-node', 18, '-dof', 1, 'disp')
ops.recorder('Element', '-file', 'FzCortDinDis.out', '-time', '-eleRange', 1, 15, '-dof', 1, 'globalForce')
ops.recorder('Element', '-file', 'FzCRP.out', '-time', '-ele', 40, 42, 44, '-dof', 1, 'globalForce')
ops.recorder('Node', '-file', 'DesDinDis.out', '-time', '-node', 8, 13, 18, '-dof', 1, 'disp')
ops.recorder('Element', '-file', 'CRP_FzaAxial.out', '-time', '-ele', 40, 42, 44, '-dof', 1, 'localForce')
ops.recorder('Node', '-file', 'CRP_DefAxial.out', '-time', '-node', 22, 26, 30, '-dof', 1, 'disp')

dt = 0.02
Acel = np.loadtxt('sismo04.txt')
N_Acel = len(Acel)
Tfinal = (N_Acel*dt)

while t < Tfinal:
    ok = ops.analyze(1, dt)
    if ok != 0:
        print('El análisis Dinámico fallo a los t = ', t)
        break
    t = ops.getTime()
if ok == 0:
    print('Análisis Completado')

ops.wipeAnalysis()
ops.remove('recorders')

```

0.44348608275743434 0.005085895045827598
Análisis Completado

GRAFICA RPTA NL DINAMICO

```

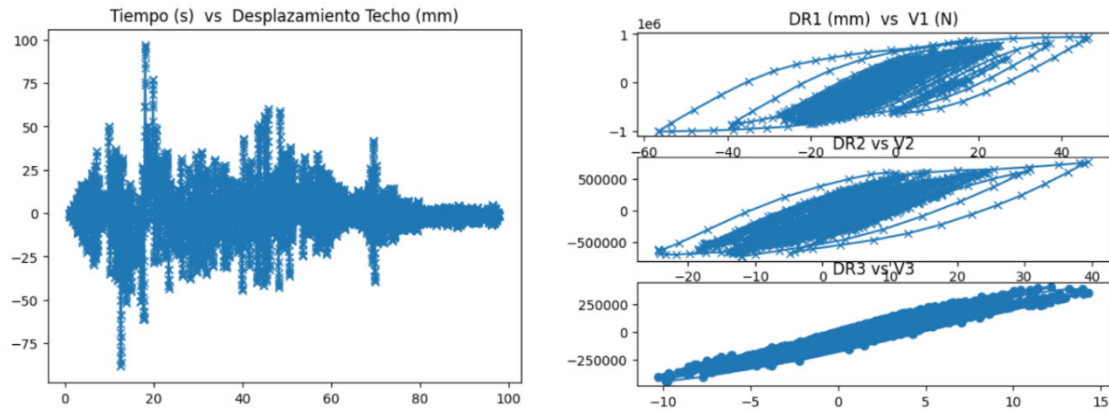
TD = np.loadtxt('DespDinDisRoof.out')
plt.figure()
plt.plot(TD[:,0], TD[:,1], '-x')
plt.title('Tiempo (s) vs Desplazamiento Techo (mm)')
plt.show()

ADisip = np.loadtxt('CRP_FzaAxial.out')
DDisip = np.loadtxt('CRP_DefAxial.out')
tita = math.atan(4/5)
DDisip = DDisip*math.cos(tita)
plt.figure()
plt.plot(DDisip[:,1], -ADisip[:,1], '-x')
plt.title('Desplazamiento (mm) vs Fuerza Axial (N) de CRP')
plt.show()

D = np.loadtxt('DesDinDis.out')
F = np.loadtxt('FzCortDinDis.out')
FRP = np.loadtxt('FzCRP.out')
V1 = -F[:,1]-F[:,2]-F[:,3]-F[:,4]-F[:,5]-2*FRP[:,1];
V2 = -F[:,6]-F[:,7]-F[:,8]-F[:,9]-F[:,10]-2*FRP[:,2];
V3 = -F[:,11]-F[:,12]-F[:,13]-F[:,14]-F[:,15]-2*FRP[:,3];
DR1 = D[:,1]; DR2 = D[:,2]-D[:,1]; DR3 = D[:,3]-D[:,2];

plt.figure()
plt.subplot(3,1,1)
plt.plot(DR1, V1, '-x')
plt.title('DR1 (mm) vs V1 (N)')
plt.subplot(3,1,2)
plt.plot(DR2, V2, '-x')
plt.title('DR2 vs V2')
plt.subplot(3,1,3)
plt.plot(DR3, V3, '-o')
plt.title('DR3 vs V3')
plt.show()

```



DESPLAZAMIENTOS MAXIMOS Y ENERGÍA EN PLANTAS CON DISIPADORES

```
maxDR = round(max(abs(DR1)),2), round(max(abs(DR2)),2), round(max(abs(DR3)),2)
Ep = round(np.trapz(V1,DR1)/1e3,2), round(np.trapz(V2,DR2)/1e3,2), round(np.trapz(V3,DR3)/1e3,2)
for i in range(N):
    print('Max Dr', i+1, ' = ', maxDR[i], 'mm')
for i in range(N):
    print('Energía Planta', i+1, ' = ', Ep[i], 'J')
```

```
Max Dr 1 = 56.53 mm
Max Dr 2 = 39.51 mm
Max Dr 3 = 14.29 mm
Energía Planta 1 = 343503.24 J
Energía Planta 2 = 153764.33 J
Energía Planta 3 = 12948.12 J
```

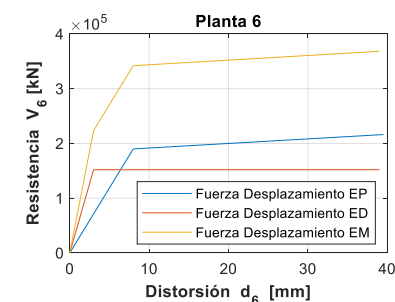
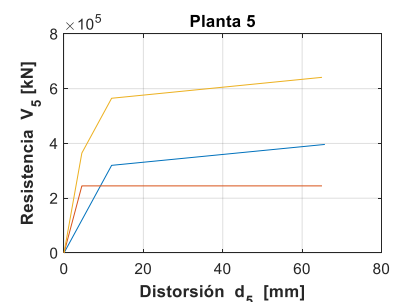
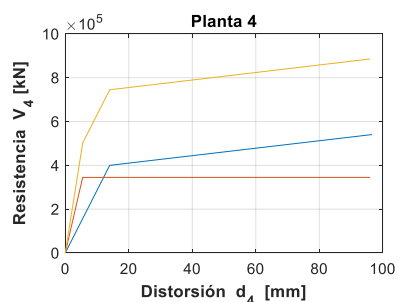
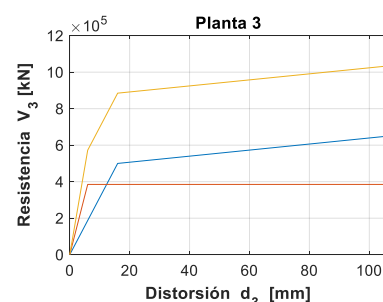
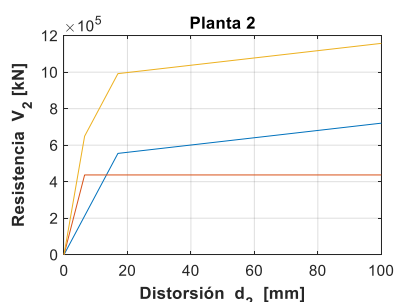
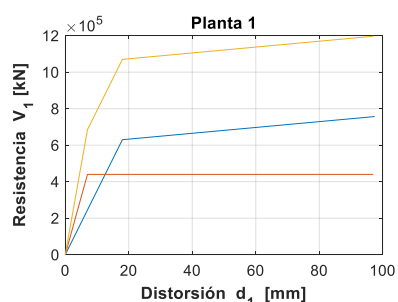
Anexo D. Dimensionado de disipadores CRP estructuras de 6 niveles

Planta	m_k (N s ² /mm)	M	h_k (mm)	d_{rk} (mm)	$V_{pyk,MPC}$ (N)	d_{pyk} (mm)	V_{pyk} (N)	K_{pk}
1	92.64	522.60	4000.00	97.00	756826	18	630000	35000.00
2	89.64		3000.00	100.00	720787	17	555000	32647.06
3	89.64		3000.00	106.00	648708	16	500000	31250.00
4	86.40		3000.00	96.00	540590	14	400000	28571.43
5	86.40		3000.00	65.00	396433	12	320000	26666.67
6	77.88		3000.00	39.00	216236	8	190000	23750.00

Planta	$d_{dyk} \leq 0.4 d_{pyk}$	$V_{dyk} \leq V_{pyk,MPC}$	K_{dk}
1	7.00	OK	440000
2	6.50	OK	437000
3	6.00	OK	385000
4	5.50	OK	345000
5	4.50	OK	245000
6	3.00	OK	152000

Planta	θ	$K_{dk}/(\cos\theta)^2$	$V_{dyk}/\cos\theta$	Nº disp.	K_{Dk} (N/mm)	V_{Dk} (N)	K_k (N/mm)
1	38.66	103086.27	563476	2.00	51543	281738	97857.14
2	30.96	91426.65	509605	2.00	45713	254803	99877.83
3	30.96	87259.80	448966	2.00	43630	224483	95416.67
4	30.96	85302.38	402320	2.00	42651	201160	91298.70
5	30.96	74038.62	285705	2.00	37019	142853	81111.11
6	30.96	68901.25	177254	2.00	34451	88627	74416.67

$$T_1 = 0.772 \text{ s}$$



Coeficiente de resistencia optima			Coeficiente de resistencia de 3N		
Planta	\bar{m}_k	$\bar{\alpha}_{k,opt}$	α_k	$\bar{\alpha}_k$	
1	1.00	1.00	0.31	1.00	100%
2	0.65	1.23	0.38	1.23	100%
3	0.31	1.59	0.49	1.59	100%

Planta	K_{Dk} (N/mm)	γ	Ac (mm ²)	A (mm ²)	η	f_k	L_w (mm)	E (Mpa)	K_{CRP} (N/mm ²)
1	51543	0.60	1575	2450	0.643	1.17	6400	180000	51680
2	45713	0.60	1200	2250	0.533	1.23	5830	180000	45553
3	43630	0.60	1200	1950	0.615	1.18	5830	180000	43786
4	42651	0.60	1200	1800	0.667	1.15	5830	180000	42750
5	37019	0.60	1050	1500	0.700	1.14	5830	180000	36839
6	34451	0.60	1000	1375	0.727	1.12	5830	180000	34655

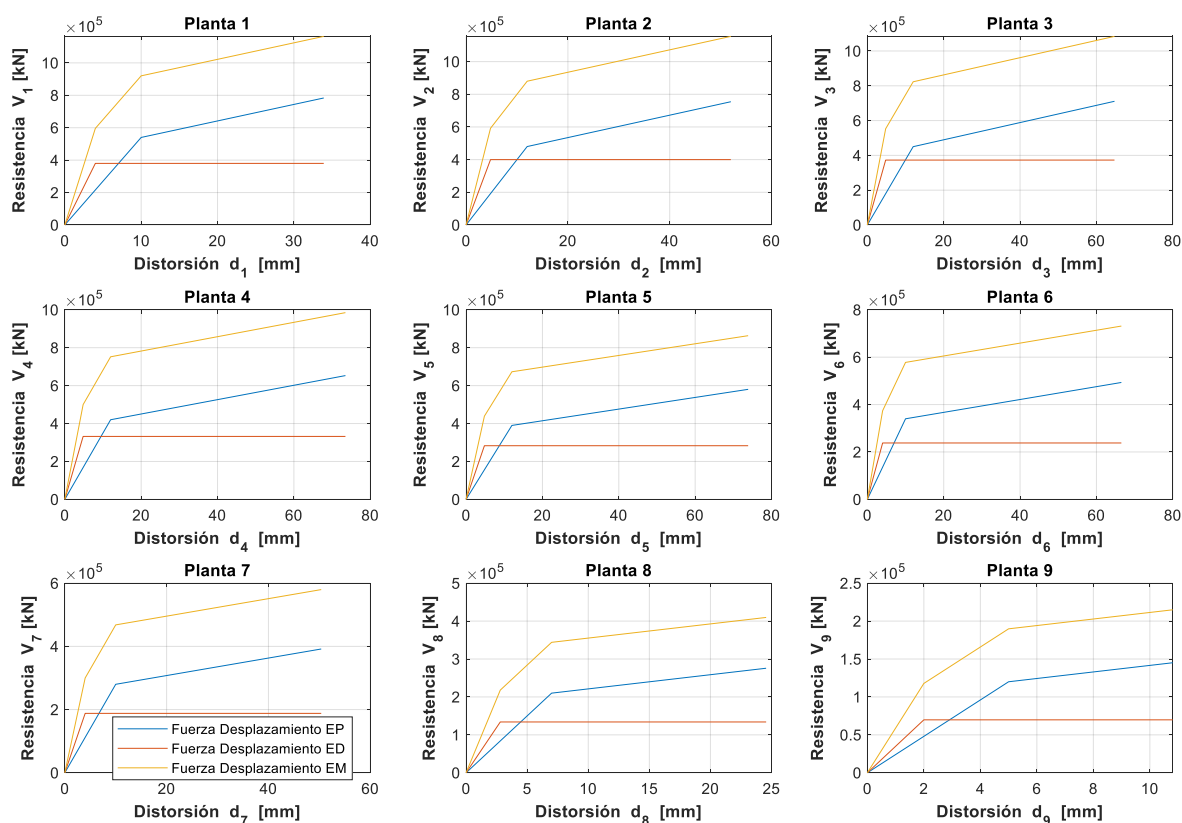
Anexo E. Dimensionado de disipadores CRP estructuras de 9 niveles

Planta	m_k (N s ² /mm)	M	h_k (mm)	d_{rk} (mm)	$V_{pyk,MPC}$ (N)	d_{pyk} (mm)	V_{pyk} (N)	K_{pk}
1	96.92	780.86	4000.00	34	783481.00	10	540000	54000.00
2	92.60		3000.00	52	754463.00	12	480000	40000.00
3	92.60		3000.00	65	710937.00	12	450000	37500.00
4	88.64		3000.00	74	652901.00	12	420000	35000.00
5	88.64		3000.00	74	580356.90	12	390000	32500.00
6	88.64		3000.00	67	493302.80	10	340000	34000.00
7	85.40		3000.00	50	391740.20	10	280000	28000.00
8	85.40		3000.00	25	275669.10	7	210000	30000.00
9	62.02		3000.00	11	145089.02	5	120000	24000.00

Planta	$d_{dyk} \leq 0.4 d_{pyk}$		$V_{dyk} \leq V_{pyk,MPC}$		K_{dk}
1	4.00	OK	380000	OK	95000.00
2	4.80	OK	400000	OK	83333.33
3	4.80	OK	373000	OK	77708.33
4	4.80	OK	332000	OK	69166.67
5	4.80	OK	283000	OK	58958.33
6	4.00	OK	238000	OK	59500.00
7	4.00	OK	188000	OK	47000.00
8	2.80	OK	134000	OK	47857.14
9	2.00	OK	69800	OK	34900.00

Planta	θ°	$K_{dk}/(\cos\theta)^\circ$	$V_{dyk}/\cos\theta^\circ$	Nº disp.	K_{Dk} (N/mm)	V_{Dk} (N)	K_k (N/mm)
1	38.66	155800.83	486639	2.00	77900	243319	149000.00
2	30.96	113324.42	466458	2.00	56662	233229	123333.33
3	30.96	105675.02	434972	2.00	52838	217486	115208.33
4	30.96	94059.27	387160	2.00	47030	193580	104166.67
5	30.96	80177.03	330019	2.00	40089	165009	91458.33
6	30.96	80913.63	277542	2.00	40457	138771	93500.00
7	30.96	63914.97	219235	2.00	31957	109618	82000.00
8	30.96	65080.59	156263	2.00	32540	78132	77857.14
9	30.96	47460.27	81397	2.00	23730	40698	58900.00

$$T_1 = 0.75 \text{ s}$$

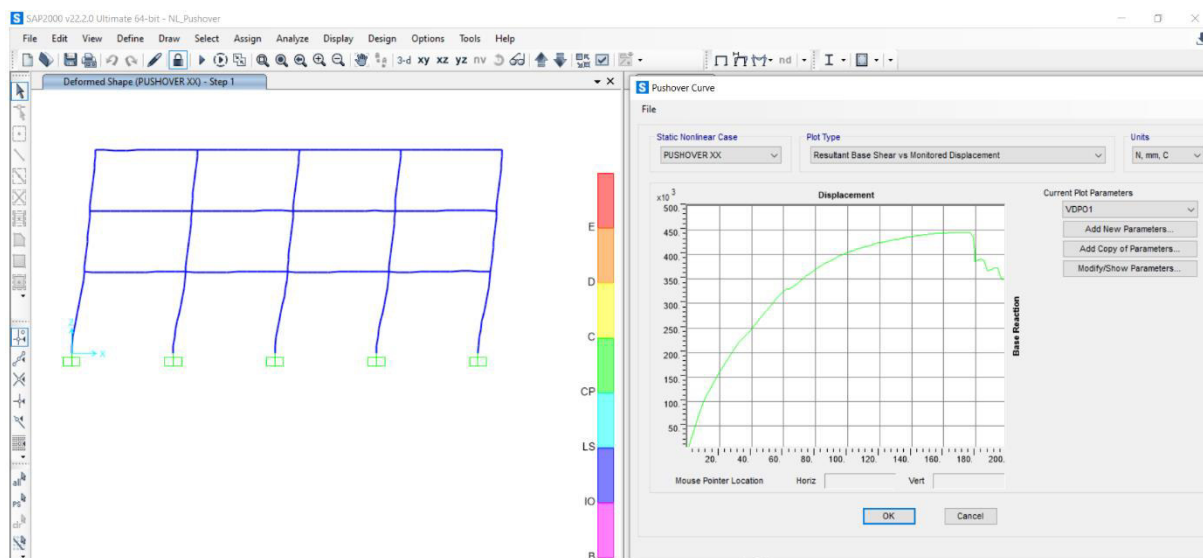


Coeficiente de resistencia optima			Coeficiente de resistencia de N3		
Planta	\bar{m}_k	$\bar{\alpha}_{k,opt}$	α_k	$\bar{\alpha}_k$	
1	1.000	1.00	0.120	1.00	100%
2	0.876	1.09	0.131	1.09	100%
3	0.757	1.18	0.142	1.18	100%
4	0.639	1.28	0.154	1.28	100%
5	0.525	1.39	0.167	1.39	100%
6	0.412	1.53	0.183	1.53	100%
7	0.298	1.71	0.205	1.71	100%
8	0.189	1.98	0.238	1.98	100%
9	0.079	2.60	0.312	2.60	100%

Planta	K_{Dk} (N/mm)	γ	A_c (mm ²)	A (mm ²)	η	f_k	L_w (mm)	E (Mpa)	K_{CRP} (N/mm ²)
1	77900	0.60	2250	4275	0.526	1.23	6400	180000	78074
2	56662	0.60	1600	2400	0.667	1.15	5830	180000	57000
3	52838	0.60	1400	2625	0.533	1.23	5830	180000	53145
4	47030	0.60	1200	2550	0.471	1.27	5830	180000	47003
5	40089	0.60	1050	2100	0.500	1.25	5830	180000	40523
6	40457	0.60	1050	2100	0.500	1.25	5830	180000	40523
7	31957	0.60	875	1375	0.636	1.17	5830	180000	31614
8	32540	0.60	875	1500	0.583	1.20	5830	180000	32419
9	23730	0.60	625	1125	0.556	1.22	5830	180000	23469

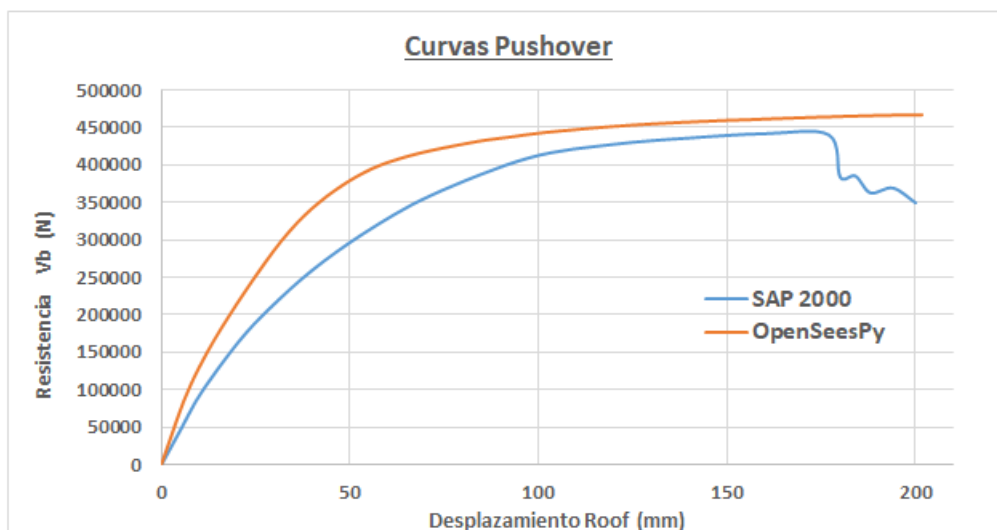
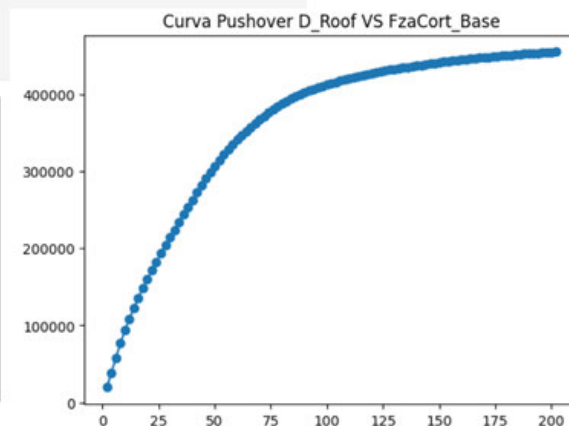
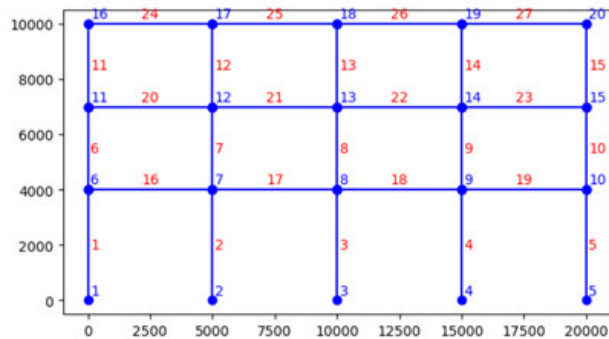
Anexo F. Comparación OpenSeesPy y SAP2000

Análisis no lineal Pushover



PLOTEIO

```
# plot model with tag labels
szer, wys = 18., 10. # Tamaño de La ventana
fig = plt.figure(figsize=(szer/2.54, wys/2.54))
opsv.plot_model()
```



Análisis no lineal Dinámico

Periodos fundamental T_1	
SAP 2000	0,781 s
OpenSeesPy	0,785 s

