



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**RESPUESTA SÍSMICA INELÁSTICA DE
MARCOS DE ACERO CONSIDERANDO
DEGRADACIÓN DE RIGIDEZ Y
RESISTENCIA EN RÓTULAS
PLÁSTICAS**

ALDO MAURICIO CAMPOS PÉREZ

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de
Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:

DIEGO LÓPEZ-GARCÍA GONZÁLEZ

Santiago de Chile, enero, 2015.

AGRADECIMIENTOS

El periodo en el que cursé el programa de magíster significó un desafío personal por el hecho de introducirme en el campo de la ingeniería estructural sísmica, un mundo que encontré fascinante, y que me motivó a aprovechar al máximo cada una de las áreas desarrolladas.

Quiero agradecer en primer lugar a mi familia, en especial a mi hija hermosa, por el tiempo valioso que tuve que destinar a estudiar, postergando con ello muchos momentos familiares, pero que estoy seguro, han servido para motivarla y enseñarle el valor y la satisfacción que produce el conocimiento adquirido con esfuerzo y dedicación.

Agradezco a todos mis profesores, en especial a Diego López-García, por darme la oportunidad y guiarme en la elaboración de este trabajo, además de facilitar mi participación en el seminario internacional. También agradezco al profesor Jorge Vásquez y a Elena Cornejo, por aceptarme en el programa, teniendo en cuenta que mi formación profesional no era afín con las exigencias del programa, pero que logré ir superando hasta concluir con éxito el programa académico.

Finalmente, quiero dar las gracias a los profesores Matías Hube, Hernán Santa María, Christian Ledezma y don Carl Lüders por su calidad pedagógica, originalidad en las formas de entregar conocimiento y la motivación que le imprimieron a mi paso por el programa.

INDICE GENERAL

	Pag.
AGRADECIMIENTOS	ii
INDICE GENERAL	iii
INDICE DE TABLAS	v
INDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
2 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO	4
2.1 Descripción del análisis realizado	6
2.2 Descripción de la estructura	7
2.3 Cargas sísmicas y gravitacionales	12
2.4 Periodos modales de la estructura	14
3 ANÁLISIS DE SISTEMAS NO LINEALES	16
3.1 Integración numérica de sistemas no lineales	18
3.2 Modelos fenomenológicos de rótula plástica	21
3.2.1 Rótula Elastoplástica Perfecta (EPP)	21
3.2.2 Rótula Ibarra Krawinkler Modificado (IKM).....	23
3.2.3 Rótula Ibarra Medina Krawinkler modificado (ModIMKPO)	25
3.3 Rótulas plásticas de vigas y columnas	28
4 REGISTROS SÍSMICOS Y ESCALAMIENTO CONDICIONAL	32
4.1 Registro de Concepción	32
4.2 Registro de Maipú	33
4.3 Registro de Llolleo	33

4.4	Escalamiento de registros sísmicos	34
5	ANÁLISIS DE RESPUESTA SÍSMICA	37
5.1	Resumen de respuestas registro Concepción	37
5.2	Resumen de respuestas registro Maipú	40
5.3	Resumen de respuestas registro Llolleo	42
6	ANÁLISIS CONCLUSIONES	46
7	BIBLIOGRAFIA	52
	ANEXOS	53
	A.1 Respuestas detalladas registro de Concepción	53
	A.2 Respuestas detalladas registro de Maipú	62
	A.3 Respuestas detalladas registro de Llolleo	71

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1: Propiedades del Acero.....	10
Tabla 2-2: Propiedades de las Secciones de Vigas y Columnas.....	10
Tabla 2-3: Resumen los resultados de periodos modales para cada modelo con P-Delta.....	15
Tabla 3-1: Propiedades de las Rótulas Plásticas para las secciones [kgf-cm].....	28
Tabla 4-1: Valores PSa para 2% de amortiguamiento de los tres registros sísmicos.....	35

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2-1: Método de escalamiento de registro sísmico	5
Figura 2-2: Método de análisis tiempo historia no lineal	5
Figura 2-3: Representación esquemática de estructura	8
Figura 2-4: Representación de elementos de acero.....	9
Figura 2-5: Ubicación de zona de panel rígido en nudos	11
Figura 2-6: Representación de masas sísmicas.....	12
Figura 2-7: Cargas gravitacionales a través de la columna apoyada.....	13
Figura 3-1: Comportamiento no lineal inelástico	17
Figura 3-2: Tipos de análisis no lineal y recursos en OpenSEES	18
Figura 3-3: Método de Newton Raphson estático.....	19
Figura 3-4: Método de Newton Raphson Dinámico	20
Figura 3-5: Método de Newton Raphson Modificado.....	21
Figura 3-6: Comportamiento de rótula elastoplástica perfecta.	22
Figura 3-7: Comportamiento de Rótula Ibarra Krawinkler Modificada.....	23
Figura 3-8: Rótula Ibarra Medina Krawinkler Modificado máximo orientado	26
Figura 3-9: Diagrama de momento curvatura de viga W30x132.....	28
Figura 3-10: Diagrama de momento curvatura de viga W16x31.....	29
Figura 3-11: Diagrama de momento curvatura de viga W24x162.....	29
Figura 4-1: Registro de acelerograma y Espectro Elástico, Concepción.....	32
Figura 4-2: Registro de acelerograma y Espectros Elásticos, Maipú.....	33
Figura 4-3: Registro de acelerograma y Espectros Elásticos, Lloleto.....	34
Figura 4-4: Espectros elásticos con $\xi=2\%$ a) original b) escalado.....	35
Figura 4-5: Acelerogramas Escalados. a) Concepción b) Maipú c) Lloleto.....	36
Figura 5-1: Deriva de entrepiso, registro de Concepción.....	38
Figura 5-2: Aceleraciones máximas de piso, registro de Concepción.....	38
Figura 5-3: Espectro de aceleración de 4° piso, $\xi=2\%$, registro de Concepción	39
Figura 5-4: Secuencia de Rótulas Elastoplástica, IKM y ModIKMPO, registro de Concepción	39
Figura 5-5: Deriva de entrepiso, registro de Maipú	40
Figura 5-6: Aceleraciones máximas de piso, registro de Maipú.....	40
Figura 5-7: Espectro de aceleración de 4° piso, $\xi=2\%$, registro de Maipú.....	41
Figura 5-8: Secuencia de Rótulas Elastoplástica, IKM y ModIKMPO, registro de Maipú.....	42
Figura 5-9: Deriva de entrepiso, registro de Lloleto	43
Figura 5-10: Aceleraciones máximas de piso, registro de Lloleto.....	43
Figura 5-11: Espectro de aceleración de 4° piso, $\xi=2\%$, registro de Lloleto.....	44
Figura 5-12: Secuencia de Rótulas Elastoplástica, IKM, registro de Lloleto.....	44
Figura 5-13: Secuencia de Rótulas ModIKMPO, registro de Lloleto.....	45
Figura 6-1: Cuadro resumen de respuesta de Drift de entrepisos	47
Figura 6-2: Cuadro resumen de respuesta de aceleración de piso.....	48
Figura 6-3: Desplazamiento de techo para registro de Concepción.....	49
Figura 6-4: Desplazamiento de techo para registro de Concepción con rótula ModIMKPO	50
Figura 6-5: Desplazamientos relativos de techo, máximo y residual.....	50

<i>Figura 7-1:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula EPP	53
<i>Figura 7-2:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula EPP	54
<i>Figura 7-3:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula EPP.....	54
<i>Figura 7-4:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula EPP.....	55
<i>Figura 7-5:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula IKM	56
<i>Figura 7-6:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula IKM	57
<i>Figura 7-7:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula IKM.....	57
<i>Figura 7-8:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula IKM.....	58
<i>Figura 7-9:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula ModIMKPO	59
<i>Figura 7-2:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula ModIMKPO	60
<i>Figura 7-11:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula ModIMKPO	60
<i>Figura 7-12:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula ModIMKPO	61
<i>Figura 7-13:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula EPP	62
<i>Figura 7-14:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula EPP	63
<i>Figura 7-15:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula EPP.....	63
<i>Figura 7-16:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula EPP.....	64
<i>Figura 7-17:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula IKM	65
<i>Figura 7-18:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a inicial. Rótula IKM.....	66
<i>Figura 7-19:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula IKM.....	66
<i>Figura 7-20:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula IKM.....	67
<i>Figura 7-21:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula ModIMKPO	68
<i>Figura 7-22:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula ModIMKPO	69
<i>Figura 7-23:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula ModIMKPO	69
<i>Figura 7-24:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula ModIMKPO	70
<i>Figura 7-25:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula EPP	71
<i>Figura 7-26:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula EPP	72
<i>Figura 7-27:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula EPP.....	72
<i>Figura 7-28:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula EPP.....	73
<i>Figura 7-29:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula IKM	74
<i>Figura 7-2:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula IKM	75
<i>Figura 7-31:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula IKM.....	75
<i>Figura 7-32:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula IKM.....	76
<i>Figura 7-33:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula ModIMKPO	77
<i>Figura 7-34:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula ModIMKPO	78
<i>Figura 7-35:</i> Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula ModIMKPO	78

Figura 7-36: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula ModIMKPO
..... 79

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar con técnicas avanzadas en sistemas estructurales inelásticos, la influencia de distintos comportamientos histeréticos de rótulas plásticas en elementos viga y columna. El objeto de estudio es una estructura de marcos de acero sometida a diferentes sismos chilenos escalados según un criterio condicional considerando igualar la ordenada espectral de los tres sismos, para el periodo fundamental de la estructura.

La metodología utilizada consiste en realizar análisis tiempo historia no lineal, considerando los sismos de Concepción, Maipú y Lolleo para el evento del Maule 2010. La estructura es del tipo marcos de acero, cuatro pisos y un vano. El análisis considera varios tipos de comportamiento en las rótulas momento-rotación en los extremos de los elementos. Las rótulas se modelan como resortes inelásticos que representan el comportamiento plástico con y sin degradación. Las cargas gravitacionales se aplican mediante una columna apoyada y considerando efecto P-Delta en todos los casos.

Las rótulas estudiadas modelan el comportamiento elastoplástico perfecto sin degradaciones, una segunda rótula con histéresis bilineal con degradación de resistencia y una tercera considerando degradación de rigidez y resistencia, siendo estas dos últimas derivaciones de los trabajos de Ibarra Krawinkler.

A partir de los resultados obtenidos, se observó una reducción en las aceleraciones de piso y en los drift de entrepiso, a medida que la rótula incorpora los mecanismos de degradación cíclica. En el caso de rótula con doble degradación, los resultados obtenidos de drift de entrepiso fueron menores en amplitud y mostraron menor dependencia del sismo considerado. Junto a lo anterior, las deformaciones máximas de techo y la deformación remanente, fueron menores en amplitud al considerar las rótulas con doble degradación para todos los casos.

ABSTRACT

The goal of this work is to analyze, using the latest techniques in inelastic structural analysis, the influence of the hysteretic behavior of plastic hinges on the seismic response of a steel frame structure.

Nonlinear time history analysis was performed considering the ground motions recorded at the Concepcion, Maipu and Lolleo stations during the 2010 Maule earthquake. The records were scaled considering the spectral ordinate at the fundamental period of the structure.

The 2D structure considered in this study is a one-bay, 4-story steel frame. P-Delta effects were considered by including a leaning column (and the corresponding gravity loads) in the model. Plastic hinges were assumed lumped at the ends of beams and columns, and were modeled as rotational springs. Three different moment-rotation hysteretic relationships were considered: an ideal model with no degradation, a model with strength degradation, and a model with stiffness and strength degradation. The two latter models were assumed to behave as predicted by the Ibarra-Medina-Krawinkler model.

Results indicate reductions in the floor acceleration response, in the interstory drift response, and in residual displacements when degradation of the plastic hinge properties is accounted for. The case where both stiffness and strength degradation is considered is the one that minimizes both the response and the ground motion dependency.

1 INTRODUCCIÓN

Durante el primer semestre del año 2014, en el Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica de la Pontificia Universidad Católica de Chile, se realizó el seminario “Análisis Avanzado y Técnicas de Modelación en Ingeniería Estructural Sísmica”, dictado por el Profesor Finley Charney, profesor de la universidad Virginia Tech. Este trabajo es correspondiente al trabajo de finalización del seminario y pasa a ser parte de la actividad de graduación del programa de magíster.

Uno de los temas analizados en el seminario, corresponde al análisis de sistemas inelásticos incorporando plastificación concentrada y distribuida de elementos resistentes a momento, incorporando también degradación cíclica de rigidez y resistencia. Además se incluye el efecto por no linealidad geométrica, P-Delta y co-rotacional. Se analiza el efecto de la degradación cíclica dada la importancia que este efecto tiene para solicitaciones sísmicas de larga duración como las vistas en terremotos de subducción presentes en Chile.

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis comparativo para la respuesta tiempo historia inelástica en un edificio de marcos de acero resistentes a momento, con cuatro pisos, el cual es sometido a un conjunto de registros sísmicos chilenos escalados a igual intensidad de ordenada espectral, en el periodo fundamental de la estructura. En cada análisis, se utilizan diversas formulaciones de rótulas plásticas concentradas en los extremos de las vigas y las columnas.

Las herramientas utilizadas para realizar los análisis inelásticos están incluidas en el programa computacional OpenSees (*Open System for Earthquake Engineering Simulation*), desarrollado por el Pacific Earthquake Engineering Research Center PEER, y puesto a libre disposición para análisis académico. Estas facilidades de software permiten analizar el comportamiento inelástico de rótulas plásticas con degradación de resistencia y de rigidez cíclica, lo que permite tomar en consideración la duración e intensidad del sismo. Dentro de cada análisis, es posible alterar dentro de cada iteración, una serie de métodos para la

integración numérica de sistemas no lineales, destacando en este trabajo los métodos de Newton Raphson y de Krylov.

El trabajo está dividido en cinco capítulos. El primero corresponde a la presente introducción, el segundo a la metodología de análisis y descripción de la estructura. En el tercer capítulo se presenta una descripción del análisis a sistemas inelásticos y detalle de las rótulas plásticas concentradas incorporadas en el modelo. En el cuarto capítulo se describen los registros sísmicos utilizados, sus espectros elásticos y su factor de escalamiento condicionado. El quinto capítulo muestra los resultados de las respuestas de desplazamiento, deriva de entrepiso, comportamiento de las rótulas y aceleraciones absolutas. Cada respuesta representa los diferentes análisis tiempo historia y las variantes de comportamiento no linealidad introducida. El sexto capítulo corresponde al análisis comparativo y las conclusiones, donde se trata de interpretar las causas de las variaciones de respuesta encontradas. El capítulo de Anexos contiene las respuestas detalladas de cada análisis para todos los registros sísmicos y cada variante del modelo.

1.1 Objetivo general

Realizar un análisis comparativo de la respuesta de desplazamiento, deriva de entrepiso y aceleraciones absolutas, respecto a tres registros sísmicos chilenos seleccionados y escalados, aplicados a una estructura de marcos de acero de cuatro pisos en la cual se realizan variaciones en los comportamientos inelásticos de las rótulas plásticas de vigas y columnas. Se realizan análisis de tiempo-historia no lineal, modificando el comportamiento histerético de vigas y columnas incorporando modelos con y sin degradación cíclica.

1.2 Objetivos específicos

- a) Definir y escalar la componente horizontal de mayor intensidad para los registros sísmicos chilenos ocurridos en el evento del 27 de febrero de 2010,

localizados en Concepción, Maipú y Lolleo. La escala se condiciona al primer periodo modal estructural y con intensidad suficiente para la formación de rótulas plásticas.

- b) Calcular la respuesta Tiempo-Historia para cada uno de los registros sísmicos analizados, para cada una de las variantes fenomenológicas inelásticas en las rótulas concentradas. Considerando rótulas Elasto-Plástico Perfecto, de Ibarra-Krawinkler Modificado (lazos histeréticos bilineales) y de Ibarra-Medina-Krawinkler Modificado (lazos histeréticos con máximos orientados).
- c) Obtener las curvas de comparación de la respuesta de desplazamiento de techo, aceleraciones absolutas de piso, derivas de entrepiso y lazos histeréticos en las rótulas.
- d) Realizar el análisis con amortiguamiento proporcional de Rayleigh con dos variantes, calculando la matriz de amortiguamiento con factores calculados con la matriz de rigidez inicial y otro con la matriz de rigidez tangente en cada iteración.
- e) Comparar las respuestas de desplazamiento, deriva de entrepiso y aceleraciones absolutas de piso para cada caso y realizar comentarios de aspectos relevantes sobre los resultados.

2 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

El trabajo analiza un tipo estructural de edificio de marco de acero con vigas y columnas con secciones tipo W de ala ancha. El edificio tiene un vano y cuatro pisos, además se incluyen las cargas gravitacionales mediante una columna apoyada (Leaning Column).

Se realizan diversos análisis a la estructura, el primero corresponde a un análisis de modos para determinar los periodos de vibración, luego se utilizan tres tipos de rótulas plásticas no lineales, de tipo plasticidad concentrada en una longitud finita en vigas y columnas. En todos los casos se incluye una zona de panel rígido en el nudo conformado por las uniones entre viga y columna, de esta manera se considera como un cacho rígido en los nudos.

La matriz de amortiguamiento de Rayleigh se calcula con dos variantes. La primera considera las constantes de proporcionalidad basados en los modos de vibración iniciales, multiplicando a la matriz de rigidez inicial de la estructura. El segundo caso, utiliza las mismas constantes iniciales, pero multiplica la matriz de rigidez actualizada, considerando la rigidez tangente de cada elemento. El amortiguamiento considerado es del 2% para el primer y tercer modo de vibración.

Cada modelo fue sometido a un conjunto de tres registros sísmicos correspondientes a Concepción, Maipú y Lolleo, para el evento sísmico del 27 de febrero de 2010. Estos registros son escalados con intensidad suficiente para abrir las rótulas plásticas de vigas y columnas con un criterio condicionado de coincidencia en el periodo fundamental de la estructura.

Se obtiene del análisis de los sistemas no lineales, las respuestas de desplazamiento de techo, deriva de entrepiso, curvas esfuerzo-deformación de rótulas y aceleraciones absolutas de piso. Se construye un cuadro comparativo de las respuestas y un análisis de la influencia de las distintas rótulas consideradas en el análisis.

Las siguientes figuras muestran un esquema de la metodología de escalamiento condicionado de los registros sísmicos a la ordenada de un periodo de la estructura, que en este caso es el periodo fundamental.

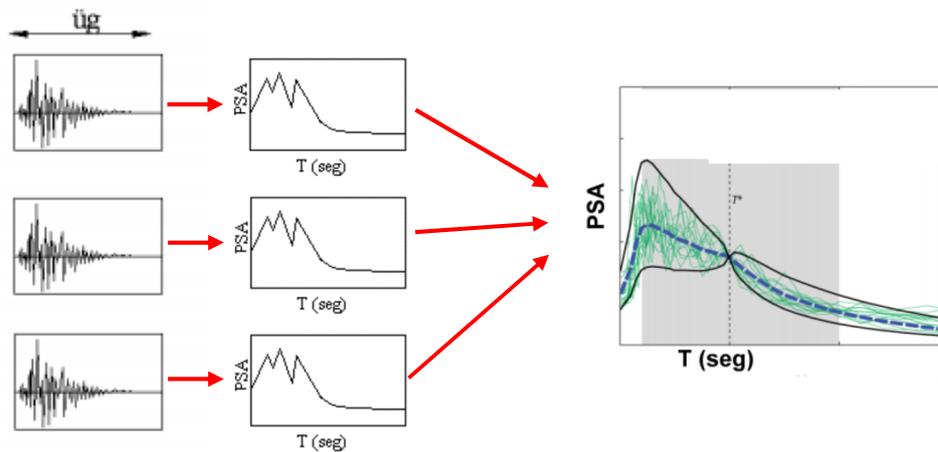


Figura 2-1: Método de escalamiento de registro sísmico

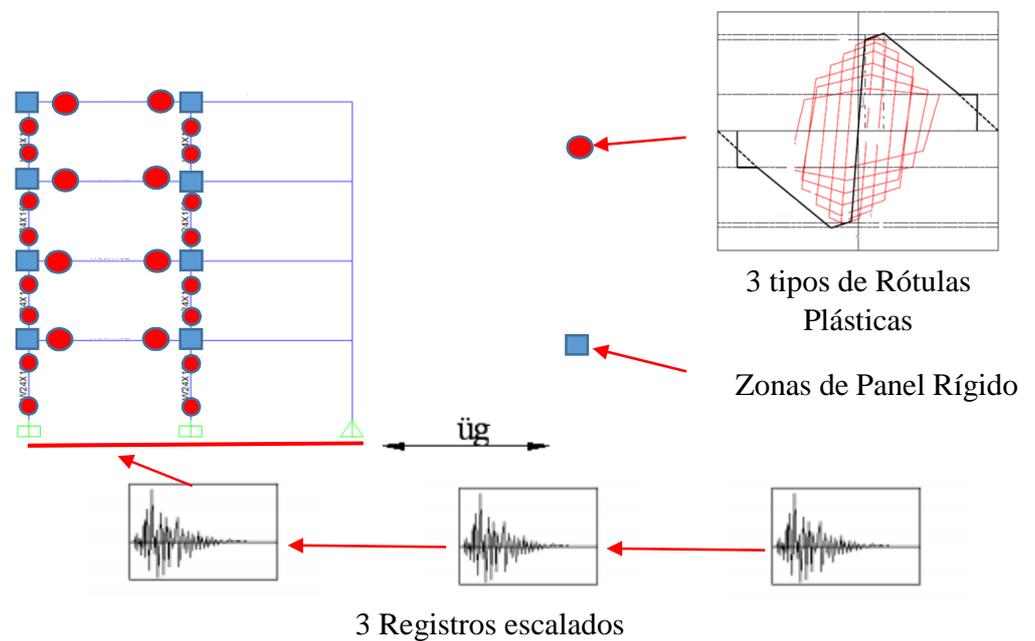


Figura 2-2: Método de análisis tiempo historia no lineal

2.1 Descripción del análisis realizado

El cálculo de los sistemas estructurales no lineales se realiza en el programa OpenSees, estableciendo las definiciones de nodos y elementos, las matrices de conectividad de los elementos estructurales, las masas sísmicas y el estado de cargas gravitacionales mediante el uso de una columna apoyada con efecto P-Delta. Se incluye en el ensamblaje, los parámetros de rigidez considerando el módulo de Young (E), Área (A) y momentos de inercia (I).

El cálculo de los modos de vibración del sistema, se realizan para cada escenario, y el programa considera en cada caso la rigidez inicial de los elementos. Como las definiciones de los segmentos de rótula, se definen con parámetros distintos, se verifica que todos los modelos presenten el mismo periodo.

Tanto los cálculos de modos de vibración, así como las respuestas tiempo-historia no lineal, consideran la transformación geométrica tipo P-Delta, la cual reduce en este caso, marginalmente la rigidez lateral del sistema.

El amortiguamiento se calcula con dos métodos ya descritos, con proporcionalidad a la matriz de rigidez inicial y la rigidez tangente, donde los factores se calculan con las matrices de masa y rigidez inicial, para los periodos primero y tercero iniciales.

Las estructuras modeladas consideran en vigas y columnas tres variaciones de rótulas plásticas, y estas son:

- f) Rótula elasto-plástica perfecta (Código OpenSees *uniaxialMaterial ElasticPP*);
- g) Rótula Bilineal – basado en el modelo de deterioro Ibarra-Medina-Krawinkler con respuesta histerética bilineal para degradación de rigidez. (Código OpenSees *uniaxialMaterial Bilin*); y

- h) Rótula con modelo de deterioro Ibarra-Medina-Krawinkler modificado con respuesta histerética de máximo orientado para degradación doble de rigidez y resistencia (Código OpenSees *uniaxialMaterial ModIMKPeakOriented*).

2.2 Descripción de la estructura

Una estructura de marcos resistentes de momento, de cuatro pisos y un vano es modelada con la incorporación de una columna apoyada (Leaning Column) adicional para tomar las cargas gravitacionales y el efecto P-Delta.

La columna apoyada es conectada mediante elementos rígidos tipo truss y articulados al marco principal a nivel de cada piso. La carga gravitacional en la columna apoyada, es utilizada para modelar efecto P-Delta de cada piso, a través de la transformación geométrica P-Delta que reduce la rigidez lateral de la estructura.

Las vigas y columnas son conectadas con rótulas de resortes rotacionales que modelan el comportamiento no lineal histerético de un segmento del elemento representativo de la plastificación concentrada.

Los resortes rotacionales de vigas y columna se configuran en tres modelos diferentes, utilizando los tres modelos no lineales considerados para modelar las rotulas plásticas.

Las zonas de panel corresponde a las áreas donde se intersectan vigas y columnas. Esta zona se considera como nudo rígido amplificando las propiedades de rigidez del elemento en un orden de magnitud de 10^4 .

La siguiente figura muestra un esquema del modelo estructural analizado. Las barras negras corresponde a vigas de ala ancha, las líneas punteadas corresponde a barras rígidas, y la columna articulada en la base, representa al columna apoyada. La zona

de panel rígida se modela con ocho nodos unidos por barras rígidas y un resorte en un vértice de alta rigidez.

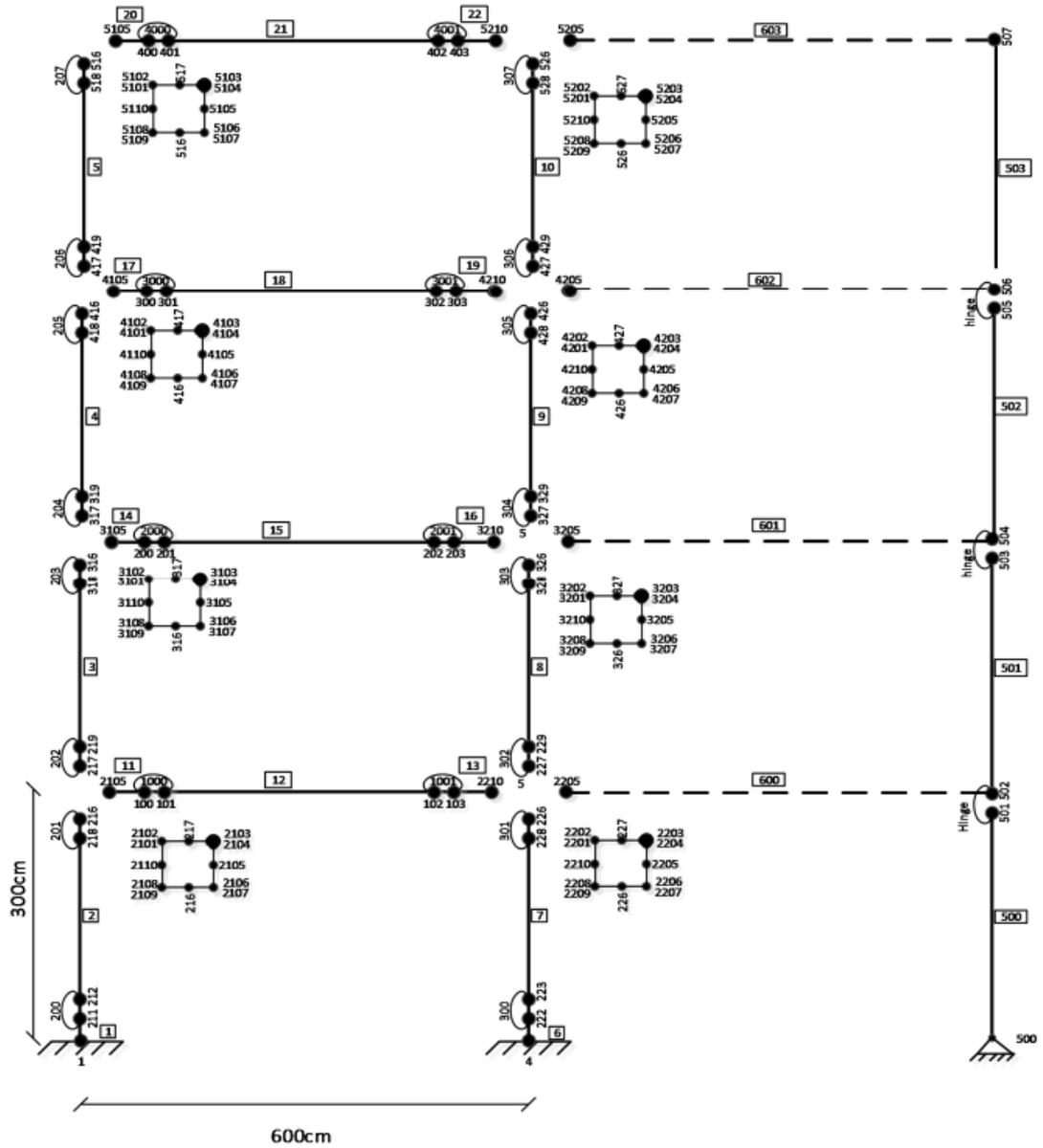


Figura 2-3: Representación esquemática de estructura

La figura muestra los elementos estructurales de vigas y columnas, y el eje de la columna apoyada rígida y articulada.

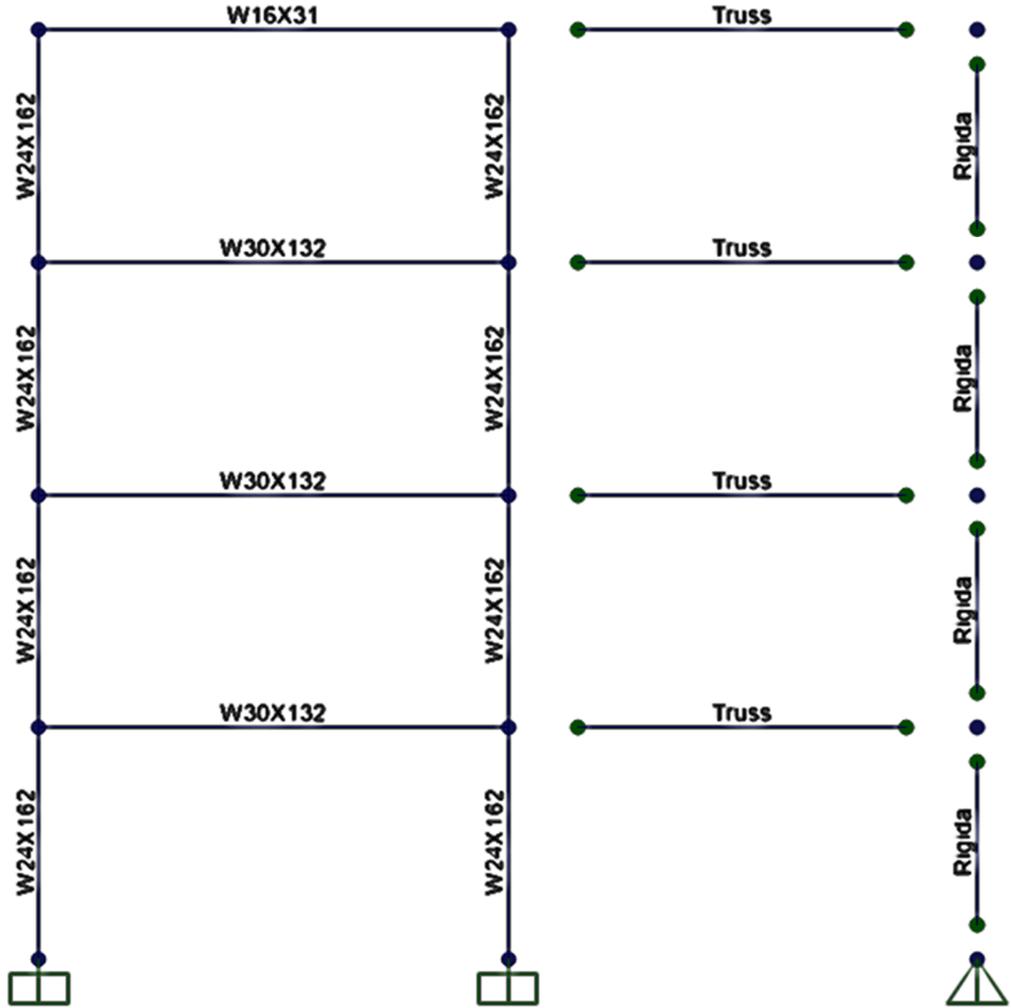


Figura 2-4: Representación de elementos de acero

Las siguientes tablas contienen las propiedades del acero y de las secciones utilizadas en el edificio modelado.

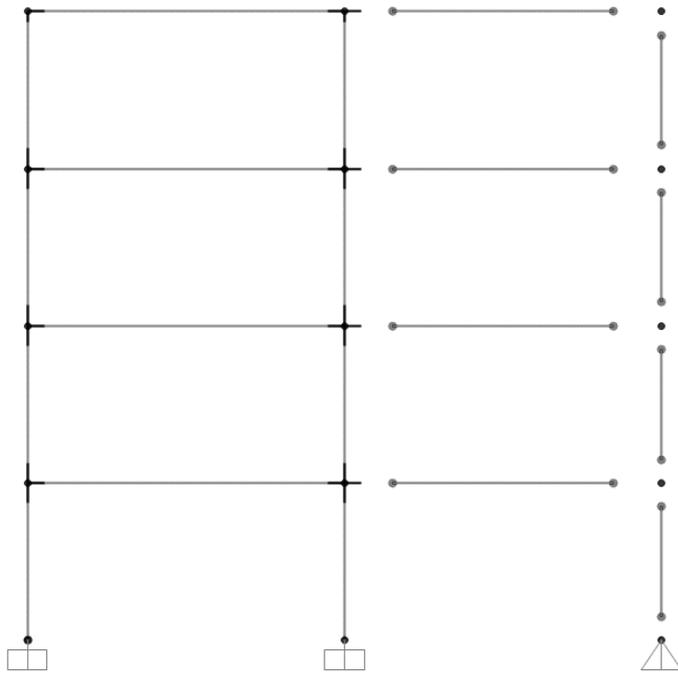
Tabla 2-1: Propiedades del Acero

Módulo de Young de acero E_s	2 100 000 kgf/cm ²
Tensión de Fluencia de acero F_y	3 500 kgf/cm ²
Tensión de rotura F_u	4 500 kgf/cm ²

Tabla 2-2: Propiedades de las Secciones de Vigas y Columnas

Propiedad	Viga W30X132	Viga W16X31	Columna W24x162
Área [cm ²]	250.97	58.84	307.74
Momento de Inercia [cm ⁴]	240 165.53	15 608.68	215 191.65
Altura de Sección [cm]	76.99	40.34	63.50
Módulo Resistente [cm ³]	6 239.09	773.95	6 777.69
Módulo Plástico [cm ³]	7 161.15	884.90	7 669.15
M_y [kgf cm]	21 836 815	2 708 825	23 721 915
M_p [kgf cm]	25 064 025	3 097 150	26 842 025

Las zonas de panel son configuradas como placas con alta rigidez, aumentando el módulo de Young, en un factor 10^4 por lo tanto presenta un comportamiento de segmento o cacho rígido.



Las zonas de panel son configuradas como segmento o cacho rígido.

Figura 2-5: Ubicación de zona de panel rígido en nudos

2.3 Cargas sísmicas y gravitacionales

El sistema estructural tiene masas sísmicas en cada nodo que se indican en la siguiente figura.

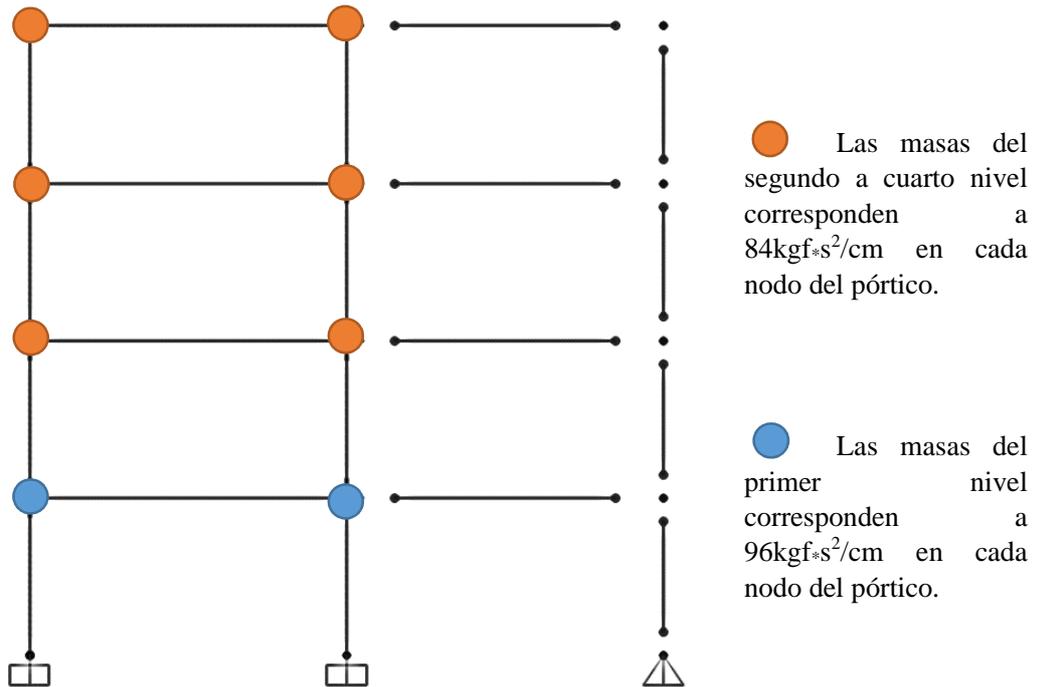


Figura 2-6: Representación de masas sísmicas

La masa sísmica total de la estructura es equivalente a 682.8 tonf. Las cargas gravitacionales del edificio tienen relevancia en el efecto P-Delta, el cual es modelado mediante la columna apoyada, la cual está unida a cada nivel por barras rígidas articuladas. La columna apoyada no presenta rigidez lateral.

La carga gravitacional del cuarto nivel es de 180tonf

La carga gravitacional del primero a tercer nivel es de 210tonf

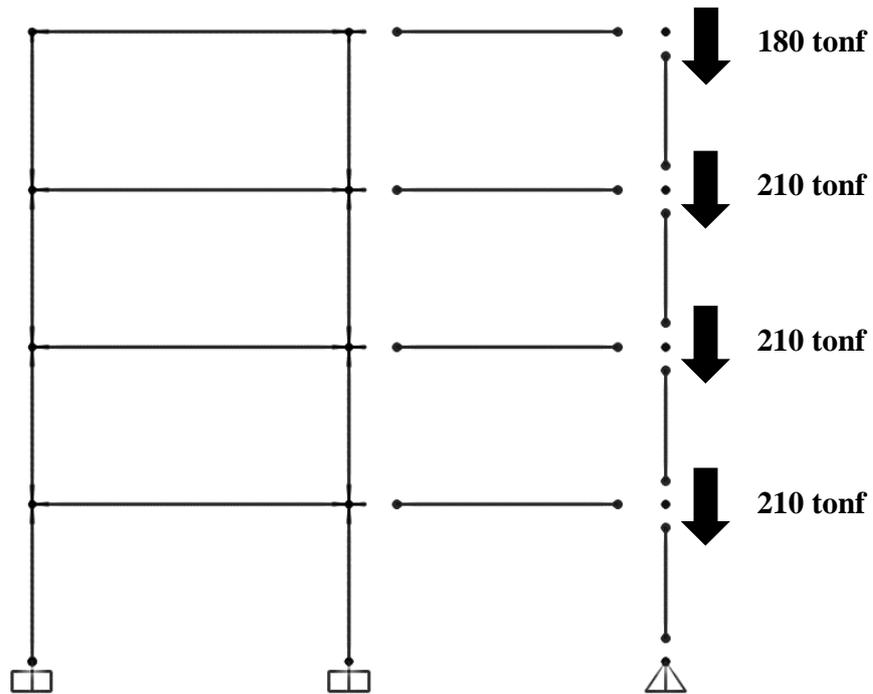


Figura 2-7: Cargas gravitacionales a través de la columna apoyada

2.4 Periodos modales de la estructura

Se realiza cálculo un cálculo de los periodos modales de la estructura, considerando el efecto P-Delta Inicial, que consiste en tomar las cargas gravitacionales de la columna apoyada y reducir la rigidez lateral por este efecto. Posteriormente se comprueban los resultados para los modelos con variaciones que incluyen las rótulas elastoplástica perfecta (EPP), Ibarra Krawinkler Modificada (IKM) y Rótula Ibarra Medina Krawinkler Modificada con máximo orientado (ModIMKPO). El propósito de calcular los periodos en los tres modelos, es para verificar que en la etapa en comportamiento lineal de pequeñas deformaciones, los periodos de todos los modelos son coincidentes.

Tabla 2-3: Resumen los resultados de periodos modales para cada modelo con P-Delta.

Tipo de Cálculo	Periodo Modo 1 [s]	Periodo Modo 2 [s]	Periodo Modo 3 [s]
Lineal	0.631	0.260	0.122
Rótulas EPP	0.631	0.260	0.122
Rótula IKM	0.631	0.260	0.122
Rótula ModIMKPO	0.631	0.260	0.122

3 ANÁLISIS DE SISTEMAS NO LINEALES

En primer lugar, decimos que el análisis estructural es no lineal, cuando no se cumple la relación causa-efecto de tipo lineal. Esta no linealidad puede tener causas en las constitutivas de los materiales, o debido a que las deformación no son lo suficientemente pequeñas, en cuyo caso hablamos de no linealidad geométrica.

Los componentes esenciales del análisis estructural son:

- a) Equilibrio. La estructura debe estar en equilibrio en todo el análisis, y para el caso del análisis de sistemas no lineales, representa la mayor complejidad.
- b) Compatibilidad. Los desplazamientos y las deformaciones deben ser compatibles con los supuestos respecto de la distribución de deformaciones internas, continuidad de los elementos y las condiciones de borde.
- c) Relaciones Constitutivas. La relación tensión/deformación, deben ser consistentes con las definiciones y además debe tener un comportamiento realista.

La ecuación de equilibrio dinámico es:

$$M\ddot{u} + C(t)\dot{u} + K(t)u = F_g(t) + F_E(t) \quad (3-1)$$

Las no linealidades más importantes son debidas a la dependencia de la rigidez $K(t)$ de \dot{u} y u , referidos a la base de la estructura. También se pueden tener no linealidades en $C(t)$, como elementos de viscosidad no lineal. Mayor complejidad se suma si $C(t)$ esta formulado en función de $K(t)$. $F_g(t)$ representa las cargas gravitacionales incrementales y F_E las cargas sísmicas.

Dentro de los comportamientos no linealidades de $K(t)$ están las de los materiales, que pueden ser elásticas o inelásticas, estas últimas generalmente con dependencia cíclica; y fracturas de materiales por deformaciones o fatiga. Otro importante tipo de no linealidad refiere a los cambios de geometría.

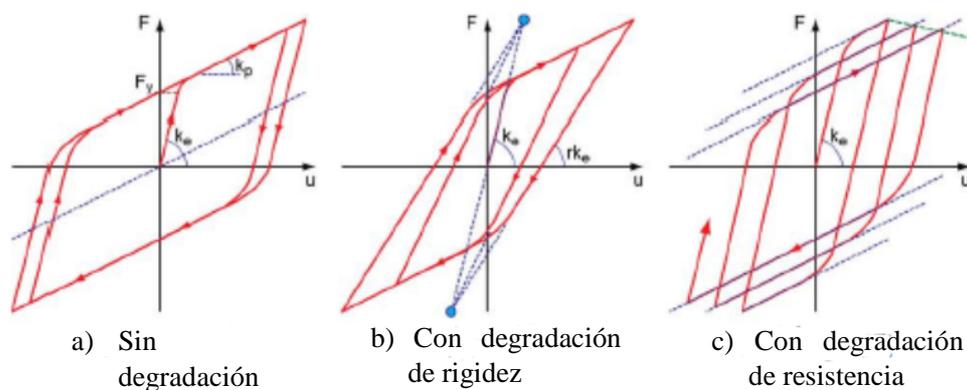


Figura 3-1: Comportamiento no lineal inelástico

En este trabajo se muestra un tipo de análisis de elementos a través de la plasticidad concentrada utilizando modelos fenomenológicos, que consiste en el uso de un resorte rotacional que representa el comportamiento inelástico de la rótula plástica.

En OpenSEES se pueden programar análisis de tipo fenomenológico de plasticidad concentrada, como rótulas modeladas por resortes inelásticos y rótulas de plasticidad en zonas finitas del elemento, mediante el uso de modelos de fibras.

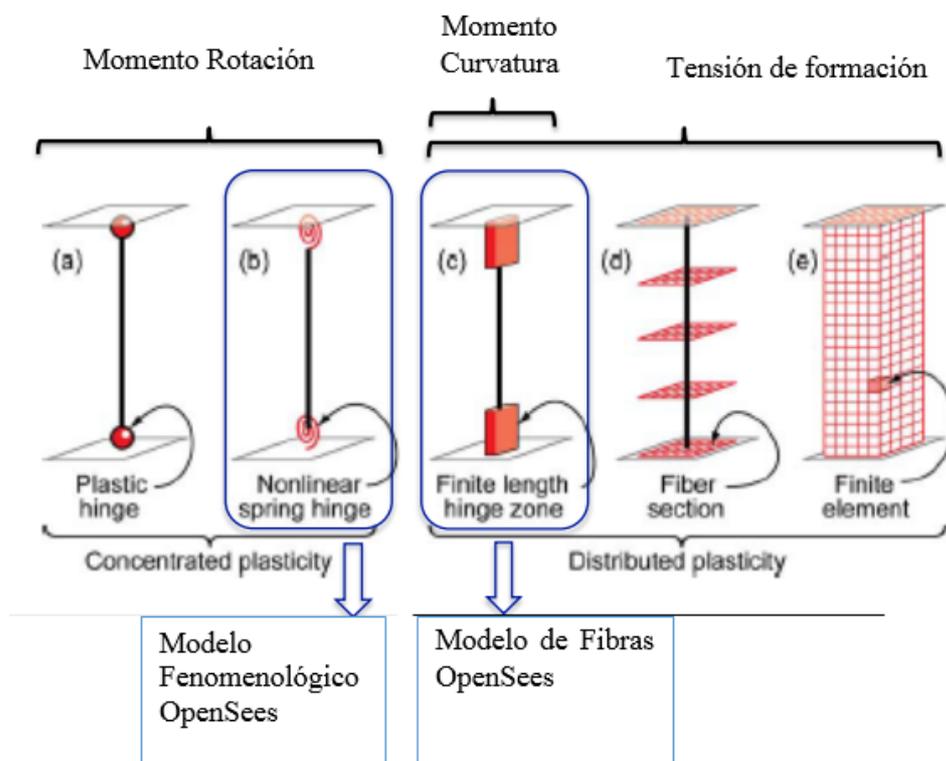


Figura 3-2: Tipos de análisis no lineal y recursos en OpenSEES

3.1 Integración numérica de sistemas no lineales

La integración de sistemas no lineales se realiza con los métodos de Diferencia Central, Newton Raphson, Newmark para sistemas no lineales, Krylov y otros. Se presenta una breve reseña de los dos métodos utilizados el presente trabajo.

El Método Newton Raphson estático, realiza iteraciones a partir de un desplazamiento hallado Δ_1 , hacia un incremento de desplazamiento δ_2 usando la rigidez tangente. Se realizan iteraciones hasta que el valor R_i sea casi cero, dentro de un criterio de convergencia. (Riley y Sturges, 1996, p. 576)

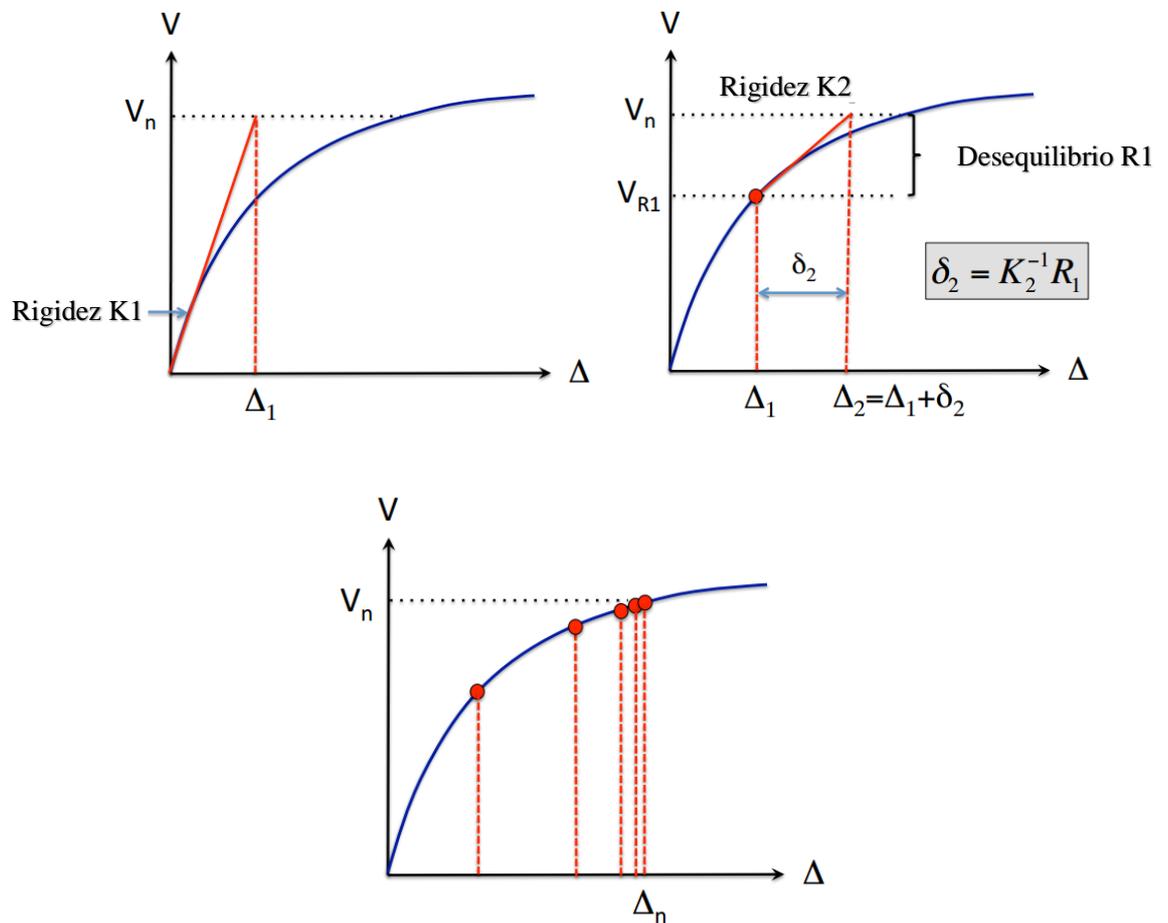


Figura 3-3: Método de Newton Raphson estático

El método de Newton Raphson dinámico opera de manera similar al método estático, pero define \hat{p} y \hat{K}_T se definen en base a los términos a_1 , a_2 y a_3 como en el método de Newmark no lineal. (Chopra, 2012, p. 188) . En OpenSEES, el algoritmo es llamado *Newton*.

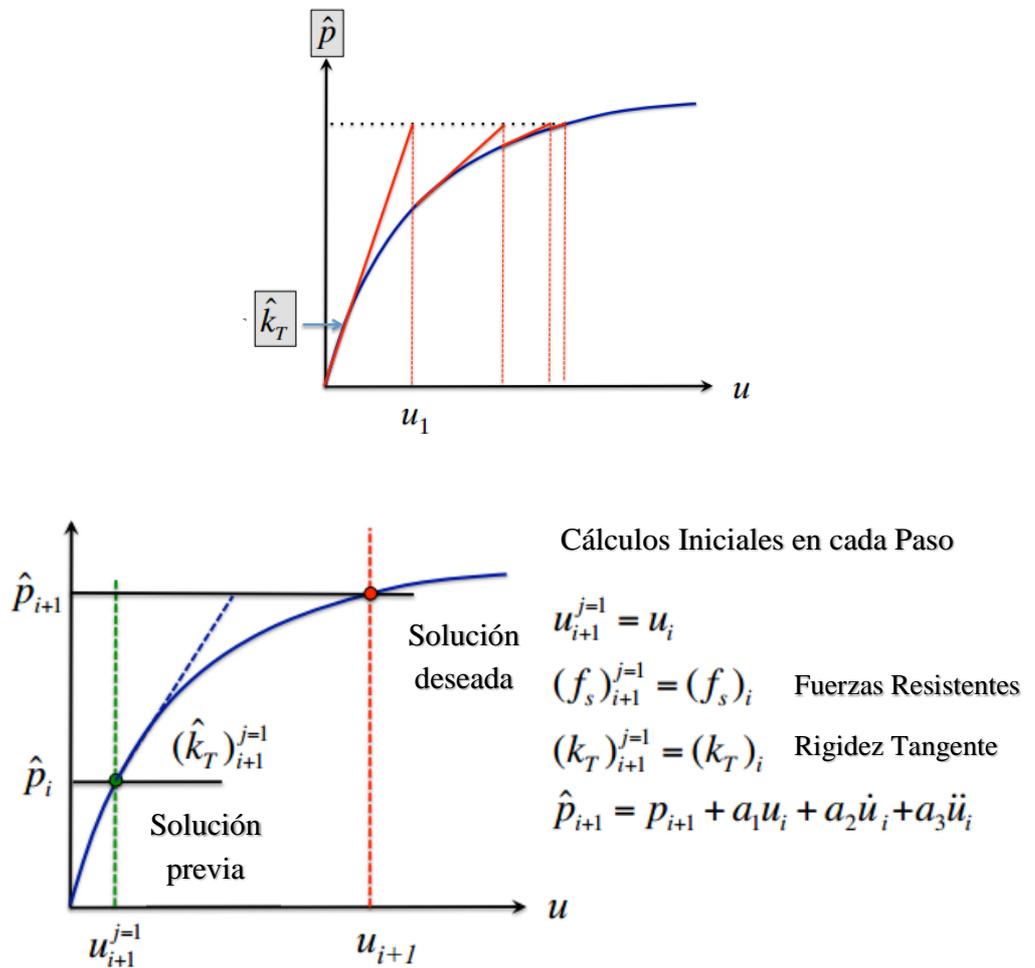


Figura 3-4: Método de Newton Raphson Dinámico

Método de Newton Raphson Modificado utiliza la rigidez tangente constante durante la iteración. Las ventajas son que no se necesita reformular K en cada incremento pero se incrementa el número de iteraciones. En OpenSEES, el algoritmo es llamado *Newton-initial*.

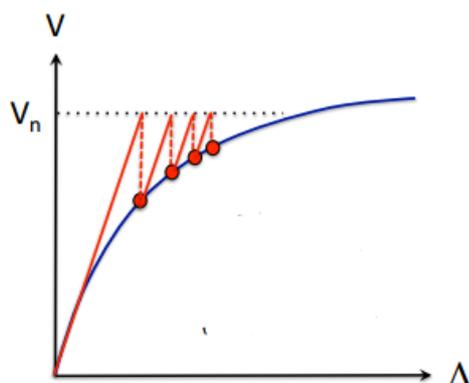


Figura 3-5: Método de Newton Raphson Modificado

El método de Sub-espacio de Krylow acelera la convergencia del método de Newton Raphson Modificado, con un costo computacional menor (Scott y Fenves, 2010). En OpenSEES, el algoritmo es llamado *KrylovNewton*.

3.2 Modelos fenomenológicos de rótula plástica

En este capítulo se detallan los comportamientos inelásticos de tres tipos de rótulas utilizadas en las modelaciones como variantes de análisis.

3.2.1 Rótula Elastoplástica Perfecta (EPP)

La rótula elastoplástica perfecta es la más sencilla que se puede considerar. Se caracteriza por una constitutiva bilineal, con un plano de corte que corresponde a un equivalente energético entre el momento de fluencia y el momento plástico del elemento. Este se configura con los datos de rigidez inicial, y rotación de fluencia del elemento.

En OpenSEES, el comando de creación del elemento rótula elastoplástica perfecta es:

```
uniaxialMaterial ElasticPP $matTag $E $epsyP <$epsyN $eps0>
```

Donde:

$\$matTag$: Identificador del material (entero)

$\$E$: Módulo Tangente de elasticidad o rigidez

$\$epsyP$: Deformación o desplazamiento en que se alcanza estado plástico (tensión)

$\$epsyN$: Deformación o desplazamiento en que se alcanza estado plástico (compresión)

$eps0$: Deformación o desplazamiento inicial (defecto toma valor 0).

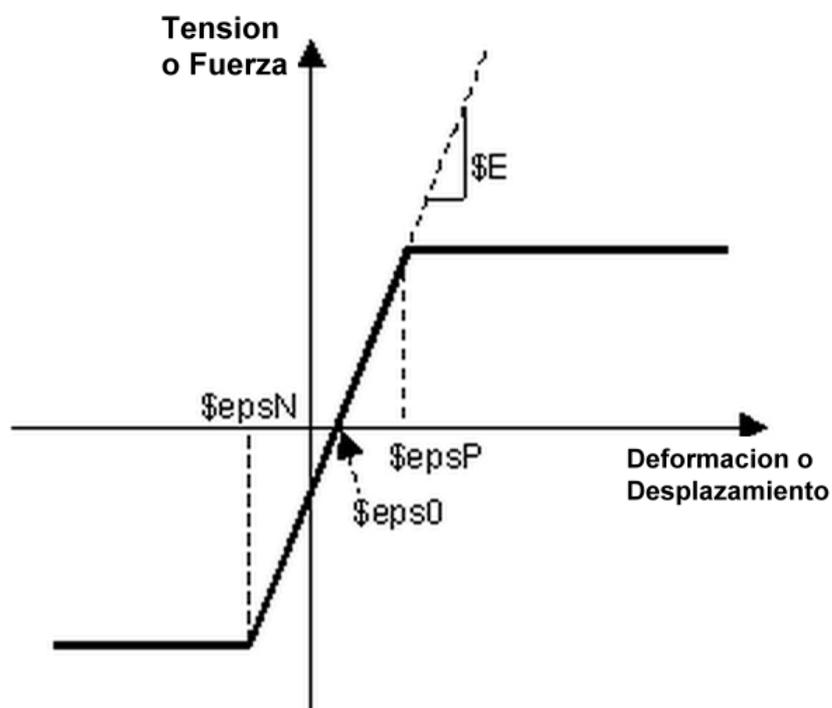


Figura 3-6: Comportamiento de rótula elastoplástica perfecta.

3.2.2 Rótula Ibarra Krawinkler Modificado (IKM)

El modelo de rotula plástica Ibarra Krawinkler modificado, con respuesta histerética bilineal para elementos de acero, incorpora el deterioro de resistencia cíclico y el deterioro dentro del ciclo de carga y descarga. (Lignos y Krawinkler, 2011). Para ajustar los parámetros de calibración se utilizan los valores provistos en las bases de datos y utilidades de modelamiento en página web de Dimitrios Lignos. (Al-Shawwa y Lignos, 2013)

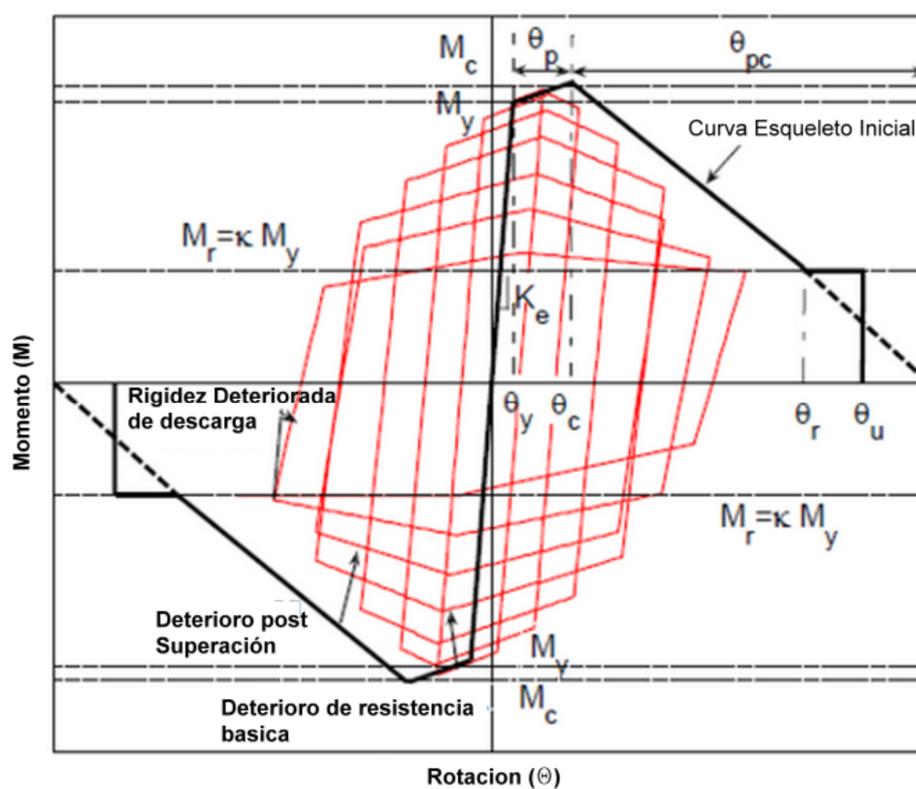


Figura 3-7: Comportamiento de Rótula Ibarra Krawinkler Modificada

En OpenSEES, el comando de creación del elemento no lineal de IKM perfecta se detalla a continuación.

uniaxialMaterial Bilin \$matTag \$K0 \$as_Plus \$as_Neg \$My_Plus \$My_Neg \$Lamda_S \$Lamda_C \$Lamda_A \$Lamda_K \$c_S \$c_C \$c_A \$c_K \$theta_p_Plus \$theta_p_Neg \$theta_pc_Plus \$theta_pc_Neg \$Res_Pos \$Res_Neg \$theta_u_Plus \$theta_u_Neg \$D_Plus \$D_Neg <\$nFactor>

Donde:

\$matTag	Identificador del material (entero);
\$K0	Rigidez elástica;
\$as_Plus	Razón de endurecimiento positiva;
\$as_Neg	Razón de endurecimiento negativo;
\$My_Plus	Momento de fluencia positivo;
\$My_Neg	Momento de fluencia negativo (valor negativo);
\$Lamda_S	Parámetro de deterioro de resistencia cíclico;
\$Lamda_C	Parámetro de deterioro de resistencia post saturación cíclico;
\$Lamda_A	Parámetro de deterioro de rigidez para aceleración de recarga (no es un modo de deterioro para un componente con respuesta histerética bilineal);
\$Lamda_K	Parámetro de deterioro cíclico para rigidez en descarga;
\$c_S	Razón de deterioro de resistencia. Valor de defecto es 1.0;
\$c_C	Razón de deterioro de resistencia post saturación. Valor de defecto es 1.0;
\$c_A	Razón de deterioro por recarga acelerada. Valor de defecto es 1.0;
\$c_K	Razón de deterioro de rigidez en descarga. Valor de defecto es 1.0;
\$theta_p_Plus	Rotación pre-saturación en sentido positivo (capacidad de rotación plástica);
\$theta_p_Neg	Rotación pre-saturación en sentido negativo (capacidad de rotación plástica) Se usa un valor positivo;
\$theta_pc_Plus	Rotación post-saturación en sentido positivo (valor positivo);
\$theta_pc_Neg	Rotación post-saturación en sentido negativo (valor positivo);
\$Res_Pos	Razón de resistencia residual positiva;
\$Res_Neg	Razón de resistencia residual negativa (valor positivo);

θ_u _Plus	Capacidad de rotación última positiva;
θ_u _Neg	Capacidad de rotación última negativa (valor positivo);
D _Plus	Razón de deterioro cíclico positivo para vigas no simétricas, en otro caso usar 1.0;
D _Neg	Razón de deterioro cíclico negativo para vigas no simétricas, en otro caso usar 1.0;
n Factor	Factor de amplificación de rigidez, para uso con rotulas plásticas concentradas. Valor por defecto (0)

3.2.3 Rótula Ibarra Medina Krawinkler modificado (ModIMKPO)

El modelo de histéresis con máximo orientado (peak oriented) propuesto en el trabajo de Ibarra-Medina-Krawinkler (Ibarra, et al., 2005, p. 1489) incluye una rama rigidez negativa-post tope de la curva esqueleto para capturar deterioro de ciclo, así como un algoritmo que cíclicamente va deteriorando la resistencia y rigidez basándose en la energía acumulada por disipación histerética. En el modelo se deben indicar, la rigidez inicial, el momento plástico, la capacidad plástica, la rotación plástica post tope, la rotación última y el momento residual. La calibración del modelo produce una degradación calibrada para 200 elementos de hormigón armado. En este trabajo se utilizará para fines de comparación de un comportamiento inelástico con un lazo histerético distinto, e intencionalmente será aplicado a una sección de acero.

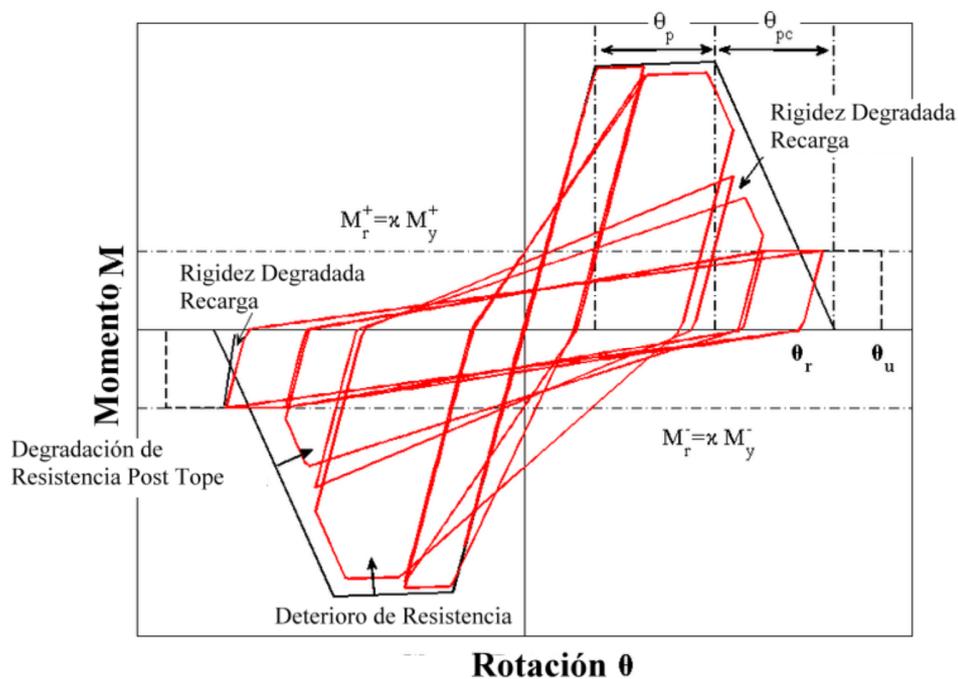


Figura 3-8: Rótula Ibarra Medina Krawinkler Modificado máximo orientado

En OpenSEES, el elemento no lineal de ModIMKPO se detalla en la línea siguiente.

```

uniaxialMaterial ModIMKPeakOriented $matTag $K0 $as_Plus $as_Neg $My_Plus
$My_Neg $Lamda_S $Lamda_C $Lamda_A $Lamda_K $c_S $c_C $c_A $c_K
$theta_p_Plus $theta_p_Neg $theta_pc_Plus $theta_pc_Neg $Res_Pos $Res_Neg
$theta_u_Plus $theta_u_Neg $D_Plus $D_Neg

```

Donde:

\$matTag	Identificador de material
\$K0	Rigidez elástica
\$as_Plus	Razón de endurecimiento sentido positivo
\$as_Neg	Razón de endurecimiento sentido negativo
\$My_Plus	Momento de fluencia efectivo, positivo
\$My_Neg	Momento de fluencia efectivo, valor negativo
\$Lamda_S	Parámetro de deterioro de resistencia
\$Lamda_C	Parámetro de deterioro de resistencia cíclico post tope

\$Lamda_A	Parámetro de deterioro cíclico para rigidez por recarga acelerada
\$Lamda_K	Parámetro de deterioro cíclico de rigidez para descarga
\$c_S	Razón de deterioro de resistencia. Por defecto es 1.0.
\$c_C	Razón de deterioro de resistencia post tope. Por defecto es 1.0.
\$c_A	Razón de deterioro por recarga acelerada. Por defecto es 1.0.
\$c_K	Razón de deterioro de rigidez en descarga. Por defecto es 1.0.
\$theta_p_Plus	Rotación Pre tope carga positiva (Capacidad de rotación plástica)
\$theta_p_Neg	Rotación Pre tope carga negativa (Capacidad de rotación plástica) (valor positivo)
\$theta_pc_Plus	Rotación post tope positiva
\$theta_pc_Neg	Rotación post tope negativa (valor positivo)
\$Res_Pos	resistencia residual positiva
\$Res_Neg	resistencia residual negativo (valor positivo)
\$theta_u_Plus	capacidad de rotación última positiva
\$theta_u_Neg	capacidad de rotación última positiva (valor positivo)
\$D_Plus	Razón de deterioro cíclico positivo (Para histéresis simétricas, usar 1.0)
\$D_Neg	Razón de deterioro cíclico negativo (Para histéresis simétricas, usar 1.0)

3.3 Rótulas plásticas de vigas y columnas

Se detallan las propiedades plásticas de los elementos utilizados en el modelo.

Tabla 3-1: Propiedades de las Rótulas Plásticas para las secciones [kgf-cm]

Propiedad	Viga W30X132	Viga W16x31	Col. W24x162
M_y	21 836 815	2 708 825	23 721 915
M_p	25 064 025	3 097 150	26 842 025
Longitud de rotula L_r	38.5	20.2	31.8
Θ_y fluencia	1.7 E-3	1.7 E-3	1.7 E-3
M_y/Θ_y	13 102 081 977	1 625 098 066	14 233 148 503
Θ_{ep} inicio etapa plástica	0.001913	0.0019058	0.0018859

El diagrama momento curvatura de cada elemento se muestra en las siguientes figuras.

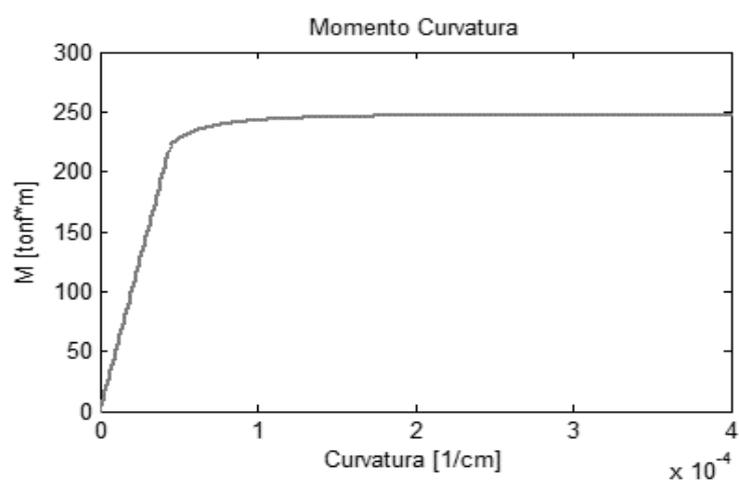


Figura 3-9: Diagrama de momento curvatura de viga W30x132

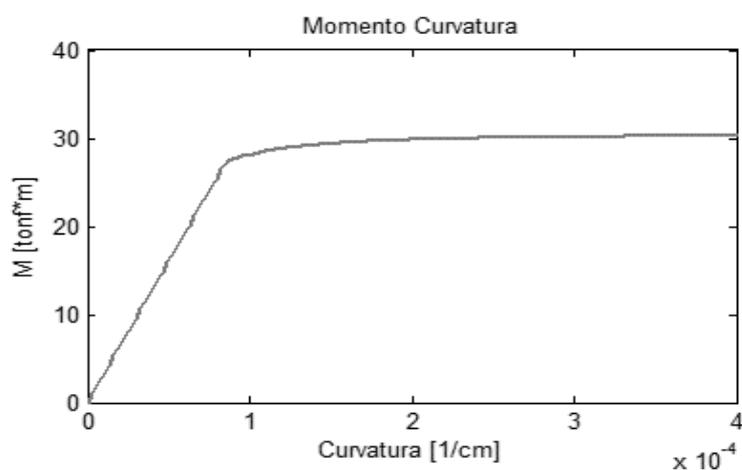


Figura 3-10: Diagrama de momento curvatura de viga W16x31

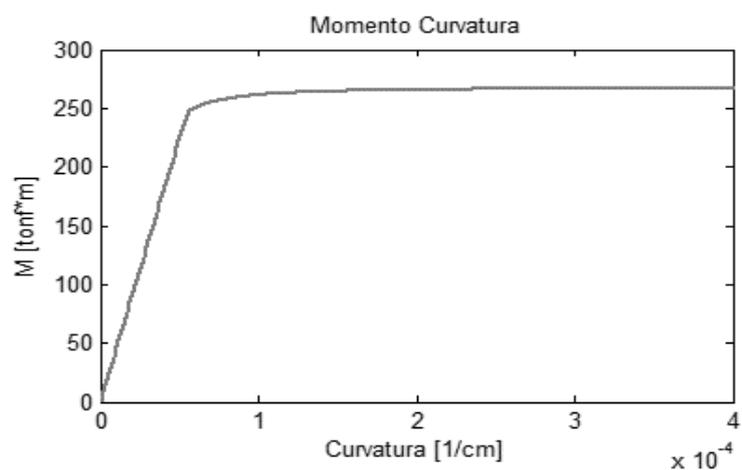


Figura 3-11: Diagrama de momento curvatura de viga W24x162

Con los valores de comportamiento inelástico calculados para cada sección se definen las rótulas fenomenológicas en OpenSEES.

Las líneas de código OpenSEES para definir rótulas de sección se detallan a continuación. (<http://opensees.berkeley.edu>)

W30x132, elastoplástica perfecta (EPP), Ibarra Krawinkler Modificada (IKM) y Rótula Ibarra Medina Krawinkler Modificada con máximo orientado (ModIMKPO).

- a) *uniaxialMaterial ElasticPP 2 13102081977.0508 0.001913*
- b) *uniaxialMaterial Bilin 2 13102081977.0508 0.0073 0.0073 21836815 -
21836815 0.7 0.7 0.7 0.7 1.0 1.0 1.0 1.0 0.025 0.025 0.13 0.13 0.4 0.4 0.050
0.05 1.0 1.0*
- c) *uniaxialMaterial ModIMKPeakOriented 2 13102081977.0508 0.0073
0.0073 21836815 -21836815 0.7 0.7 0.7 0.7 1.0 1.0 1.0 1.0 0.025 0.025 0.13
0.13 0.4 0.4 0.050 0.05 1.0 1.0*

W16x31, elastoplástica perfecta (EPP), Ibarra Krawinkler Modificada (IKM) y Rótula Ibarra Medina Krawinkler Modificada con máximo orientado (ModIMKPO).

- a) *uniaxialMaterial ElasticPP 3 1625098066.4353 0.0019058*
- b) *uniaxialMaterial Bilin 3 1625098066.4353 0.0073 0.0073 2708825 -
2708825 0.7 0.7 0.7 0.7 1.0 1.0 1.0 1.0 0.025 0.025 0.15 0.15 0.4 0.4 0.05
0.05 1.0 1.0*
- c) *uniaxialMaterial ModIMKPeakOriented 1625098066.4353 0.0073 0.0073
2708825 -2708825 0.7 0.7 0.7 0.7 1.0 1.0 1.0 1.0 0.025 0.025 0.15 0.15 0.4
0.4 0.05 0.05 1.0 1.0*

W246x162, elastoplástica perfecta (EPP), Ibarra Krawinkler Modificada (IKM) y Rótula Ibarra Medina Krawinkler Modificada con máximo orientado (ModIMKPO).

- a) *uniaxialMaterial ElasticPP 1 14233148503 0.0018859*
- b) *uniaxialMaterial Bilin 1 14233148503.937 0.0073 0.0073 23721915 -
23721915 0.8 0.8 0.8 0.8 1.0 1.0 1.0 1.0 0.025 0.025 0.18 0.18 0.4 0.4 0.05
0.05 1.0 1.0*
- c) *uniaxialMaterial ModIMKPeakOriented 14233148503.937 0.0073 0.0073
23721915 -23721915 0.8 0.8 0.8 0.8 1.0 1.0 1.0 1.0 0.025 0.025 0.18 0.18 0.4
0.4 0.05 0.05 1.0 1.0*

4 REGISTROS SÍSMICOS Y ESCALAMIENTO CONDICIONAL

Los registros de aceleraciones utilizados para el análisis tiempo historia no lineal corresponden a acelerogramas corregidos para las zonas de Concepción, Maipú y Lolleo correspondientes el evento sísmico del Maule el 27 de febrero de 2010. Estos registros y la información detallada de ubicación y equipos, están contenidos en la página web de Renadic de la Universidad de Chile. (<http://terremotos.ing.uchile.cl>)

Las figuras siguientes tres figuras muestran el acelerograma para el componente de mayor aceleración PGA, y el gráfico del espectro elástico de Pseudo aceleraciones para una razón de amortiguamiento crítico de 2% y 5%.

4.1 Registro de Concepción

Este sismo corresponde al canal 1 (L) orientado 60° respecto del norte (sentido anti horario). Ubicación, Subterráneo de edificio Concepción Centro, Región de Bío-Bío. Filtro RAMPS de 0.15-0.25 y 23-25 Hz. Intervalo de muestreo 0.005s.

PGA=0.40082g a los 20.395s. En este registro se observa en los espectros elásticos, la respuesta del suelo que produce dos picos en el espectro, fenómeno observado en el evento del 27 de febrero de 2010. (Ruiz y Saragoni, 2011)

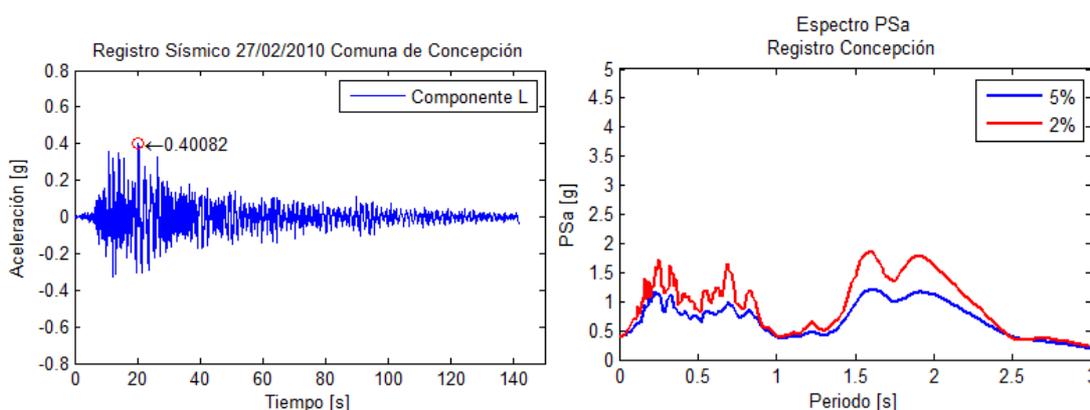


Figura 4-1: Registro de acelerograma y Espectro Elástico, Concepción

4.2 Registro de Maipú

Este sismo corresponde al canal 1 (NS) orientado 0° respecto del norte. Ubicado en el primer piso del centro de referencia de salud (C.R.S.) en la comuna de Maipú, Región Metropolitana. Filtro RAMPS de 0.15-0.25 y 23-25 Hz. Intervalo de muestreo 0.01s. PGA=0.56018g a los 72.23s

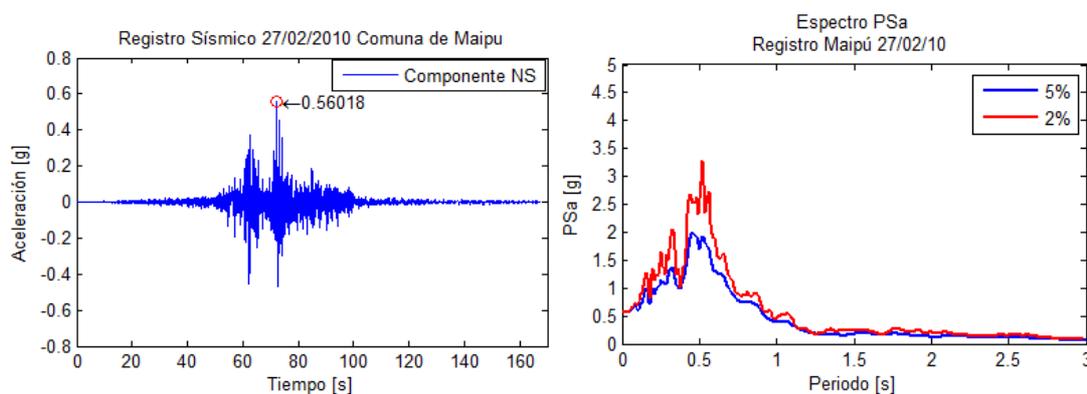


Figura 4-2: Registro de acelerograma y Espectros Elásticos, Maipú

4.3 Registro de Llole

Este sismo corresponde al canal 3 (R) orientado 70° respecto del norte sentido horario. Ubicación Subterráneo edificio de 2 pisos en localidad de Llole, San Antonio, Región de Valparaíso. Filtro RAMPS de 0.15-0.25 y 23-25 Hz. Intervalo de muestreo 0.005s. PGA= 0.55721g a los 44.665s.

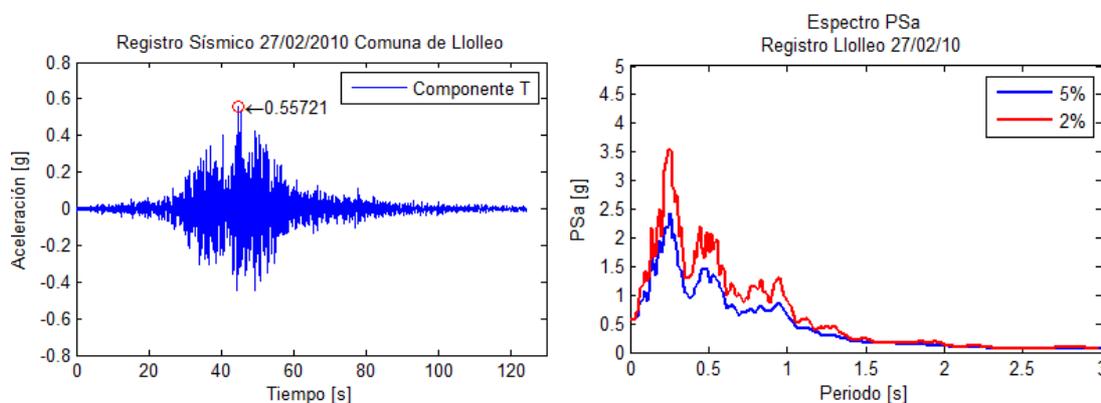


Figura 4-3: Registro de acelerograma y Espectros Elásticos, Llolleo

4.4 Escalamiento de registros sísmicos

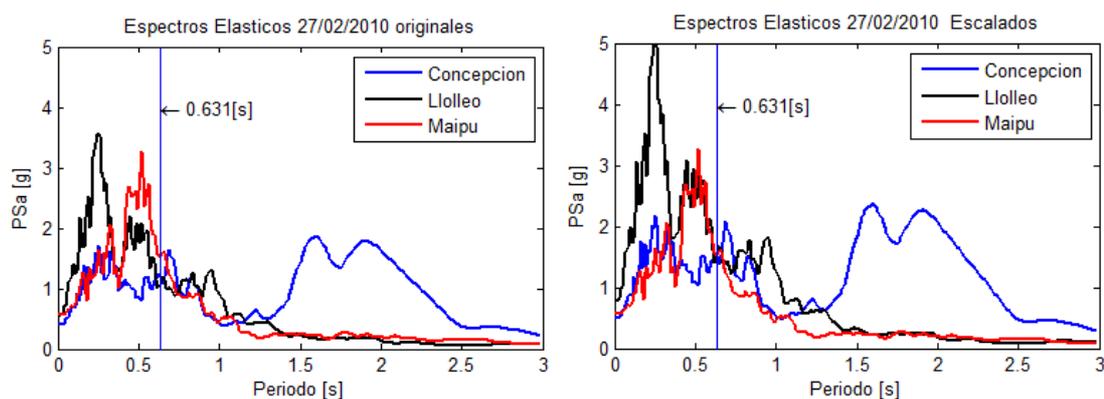
El escalamiento de registros se realiza en base al valor de aceleración pseudo espectral, leído para cada uno de los tres registros analizados, para el periodo fundamental de la estructura. Una vez tabulados estas tres lecturas, se escoge el mayor valor. Luego se estima el factor de escala de los otros dos registros menores respecto al máximo, con la finalidad de igualar este valor en el periodo fundamental de la estructura. (NIST, 2011)

El periodo fundamental de la estructura según análisis modal lineal corresponden a $T_1 = 0.631s$. Los espectros elásticos se leen para un 2% del amortiguamiento crítico. La Tabla 4-1 muestra los valores de PSa al 2% de cada registro sísmico.

Tabla 4-1: Valores PSa para 2% de amortiguamiento de los tres registros sísmicos.

Registro Sísmico	PSa en g @ 0.631 [s]	Factor de escala condicionado
Concepción	1.2072	1.2680
Maipú	1.5307	1.0000
Llolleo	1.0920	1.4018
Máximo	1.5307	

Luego de los procesos de escalamiento de los registros, se obtienen los espectros de respuesta elásticos modificados que se muestran en la Figura 4-4.

Figura 4-4: Espectros elásticos con $\xi=2\%$ a) original b) escalado

El escalamiento condiciona los espectros elásticos de 2% en el periodo de 0.631 a un valor único de 1.53g. Se observa en el espectro de Llolleo una amplificación significativa en 0.25s de periodo, lo cual afecta directamente al segundo modo de la estructura. En los sismos de Maipú y Llolleo también hay máximos entre los periodos de 0.45s 0.52s.

Los acelerogramas escalados y utilizados en el análisis se muestran en la Figura 4-5. Las aceleraciones PGA de los registros usados son 0.508g, 0.560g y 0.781g para los registros de Concepción, Maipú y Llolleo respectivamente.

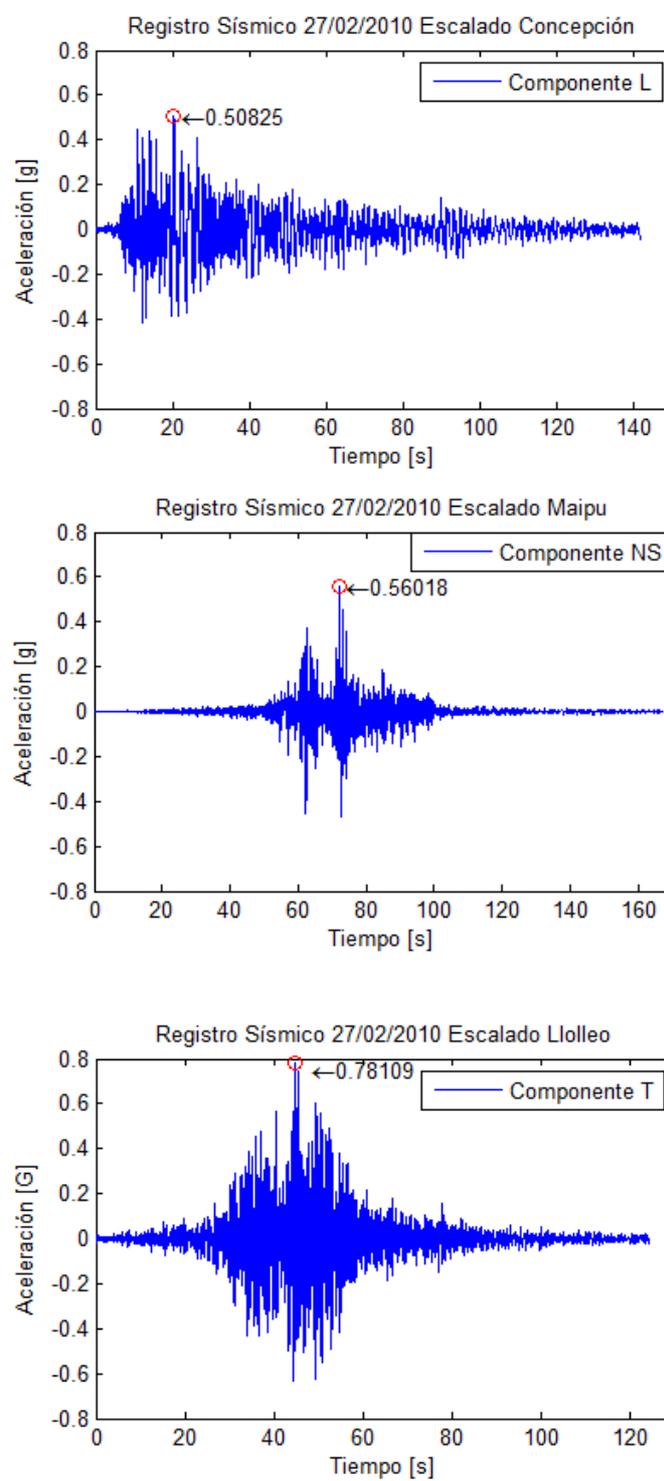


Figura 4-5: Acelerogramas Escalados. a) Concepción b) Maipú c) Llole

5 ANÁLISIS DE RESPUESTA SÍSMICA

En este capítulo se muestran las respuestas de desplazamiento, respuestas de aceleración de piso, derivas de entrepiso. Todas las respuestas se calculan en funciones tiempo historia, y en el caso de las aceleraciones de piso, se obtienen los espectros elásticos de piso para amortiguamientos de 2% en el techo de la estructura. Las figuras muestran el caso considerando amortiguamiento de Rayleigh con rigidez inicial. Dado que las diferencias entre ambos casos de amortiguamiento son poco significativas, las respuestas de ambos casos se muestran en el capítulo Anexos.

A continuación se muestra un resumen con los resultados de respuestas de deriva o drift de entrepisos y aceleraciones de piso. Luego se muestra un resumen de la secuencia de formación de rótulas plásticas para cada registro y comportamiento inelástico de estas. El esquema muestra la ubicación y el orden de activación de rótulas.

5.1 Resumen de respuestas registro Concepción

De la comparación de drift de entrepiso entre los distintos tipos de rótula inelástica, las diferencias son relevantes entre ellas, siendo la mayor magnitud la correspondiente a rótulas elastoplástica perfecta, y la de menor drift, el caso con la rótula histerética de máximo orientado Figura 5-1.

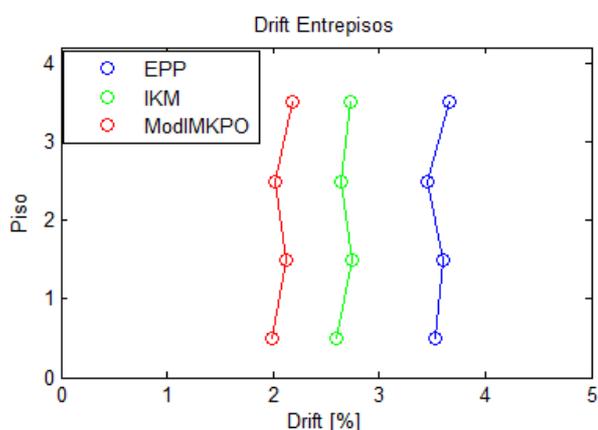


Figura 5-1: Deriva de entrepiso, registro de Concepción

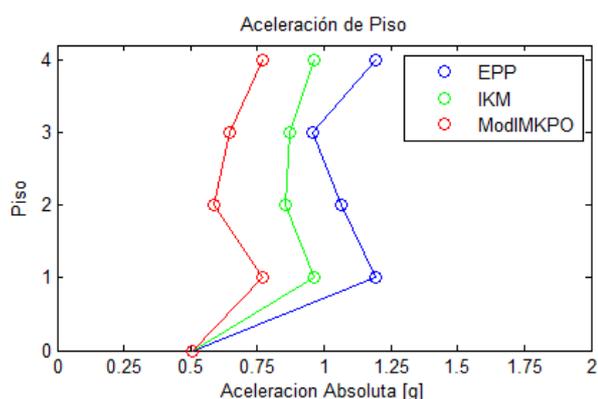


Figura 5-2: Aceleraciones máximas de piso, registro de Concepción

Al analizar las aceleraciones de piso, se puede ver comportamiento en jerarquía de respuesta, similar al drift de entrepiso, con altas aceleraciones de piso, concentradas en el segundo modo de vibración, inferido por la forma de las distribuciones de esta y el valor en el espectro elástico. Las máximas aceleraciones de piso se dan en el sistema con rótula elasto-plástica perfecta, mientras las menores aceleraciones se presentan en el sistema con rótulas histeréticas de máximo orientado. Al mismo tiempo se puede observar un ensanchamiento de ancho de banda en torno al segundo periodo de vibración con la rótula de doble degradación. La Figura 5-3 muestra el espectro de piso para el techo de la estructura.

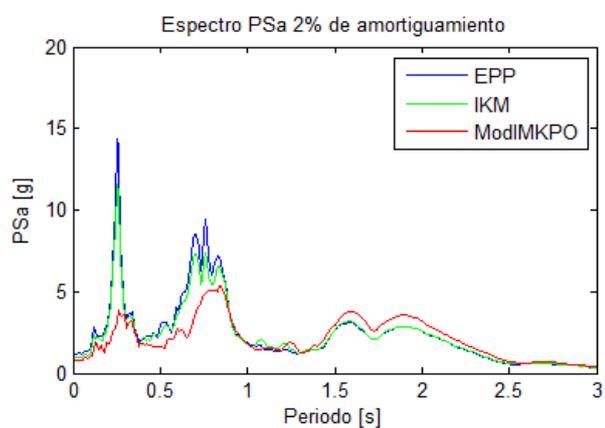


Figura 5-3: Espectro de aceleración de 4° piso, $\xi=2\%$, registro de Concepción

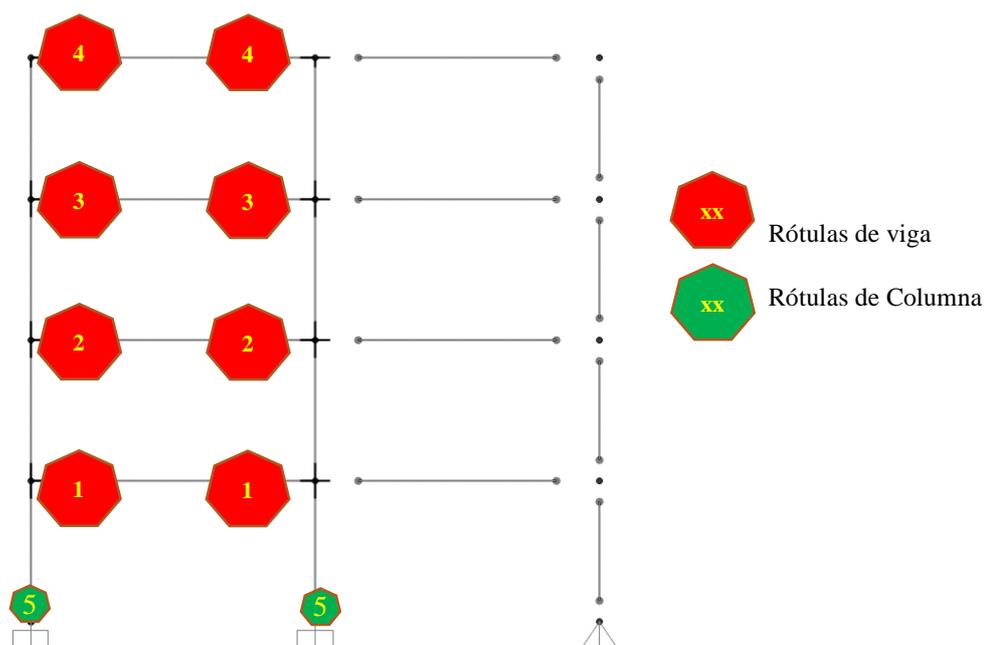


Figura 5-4: Secuencia de Rótulas Elastoplástica, IKM y ModIKMPO, registro de Concepción

5.2 Resumen de respuestas registro Maipú

Se repite el comportamiento similar para todos los casos al modificar el tipo de amortiguamiento de Rayleigh con diferencias poco relevantes entre estos casos.

De la comparación de drift de entrepiso entre los distintos tipos de rótula, las diferencias son relevantes al comparar el comportamiento de rótulas elastoplástica perfecta, con las rótulas con degradación cíclica IKM y de máximo orientado. Al comparar las rótulas con degradación, se observa convergencia de respuestas, excepto en el piso cuarto.

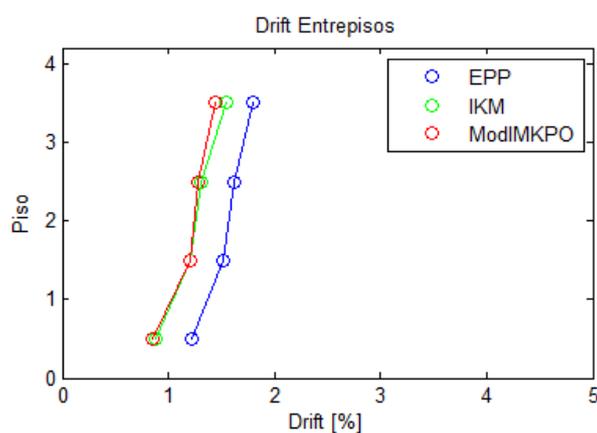


Figura 5-5: Deriva de entrepiso, registro de Maipú

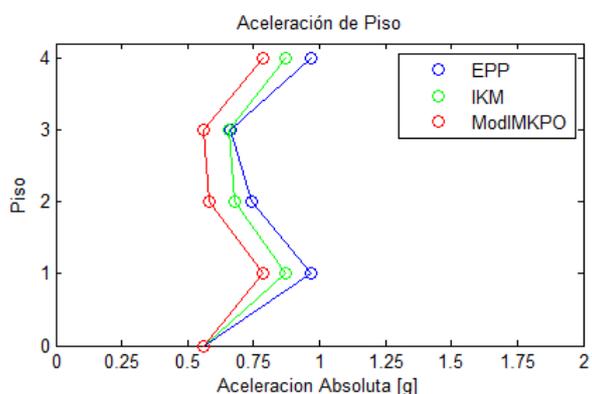


Figura 5-6: Aceleraciones máximas de piso, registro de Maipú

Al analizar las aceleraciones de piso, se puede ver valores, concentradas en el primer y segundo modo de vibración. Las máximas aceleraciones de piso se dan en el sistema con rótula elasto-plástica perfecta, mientras las menores aceleraciones se presentan en el sistema con rótulas histeréticas de máximo orientado. El espectro de respuesta elástico de piso para el caso de rótula con histéresis de máximo orientada, se encuentra distribuido.

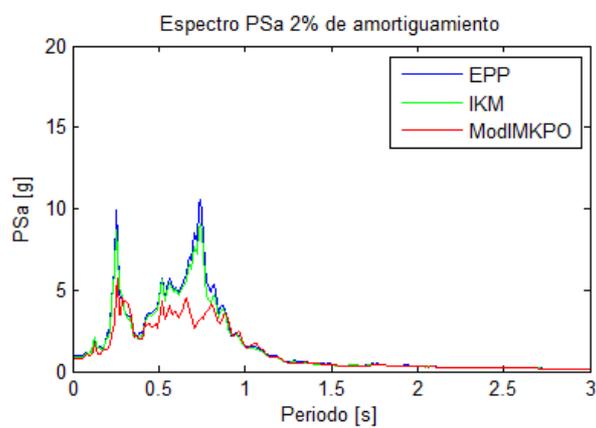


Figura 5-7: Espectro de aceleración de 4° piso, $\xi=2\%$, registro de Maipú

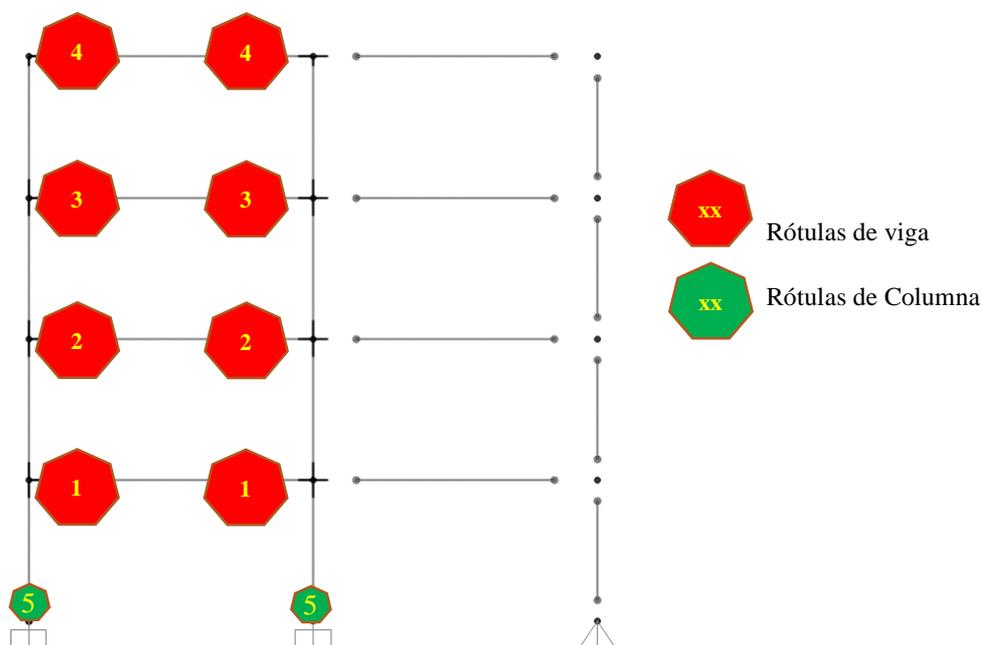


Figura 5-8: Secuencia de Rótulas Elasto-plástica, IKM y ModIKMPO, registro de Maipú

5.3 Resumen de respuestas registro Lollole

Al comparar la respuesta de drift de entre pisos (deriva), se observan diferencia poco significativa al variar el tipo de amortiguamiento de Rayleigh con Rigidez K-inicial a Rigidez K-Tangente.

Al comparar los drift de entrepiso entre los distintos tipos de rótula, las diferencias son poco relevantes respecto a los sismos de Concepción y Maipú. En este caso, se observa cierta convergencia entre las respuestas de las rótulas por pisos 2 y 3, en cambio el drift de entrepisos entre los últimos pisos es significativamente mayor a los pisos inferiores para el caso de rótula elasto-plástica perfecta.

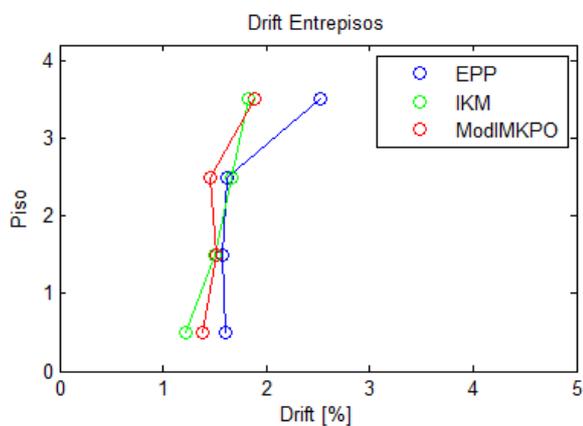


Figura 5-9: Deriva de entrepiso, registro de Llolleo

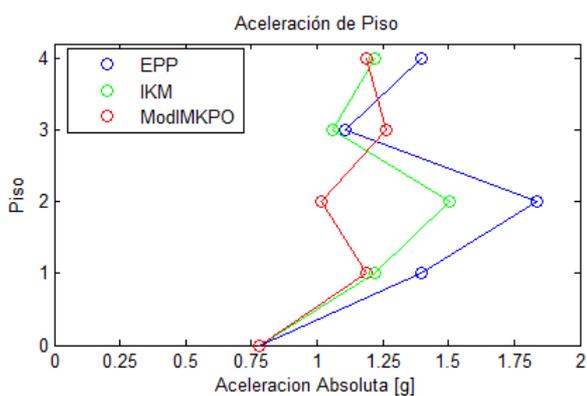


Figura 5-10: Aceleraciones máximas de piso, registro de Llolleo

Al analizar las aceleraciones de piso, se puede ver valores máximo concentrados en el segundo modo de vibración. Las máximas aceleraciones de piso se dan en el sistema con rótula elastoplástica perfecta, mientras las menores aceleraciones se presentan en el sistema con rótulas histeréticas de máximo orientado.

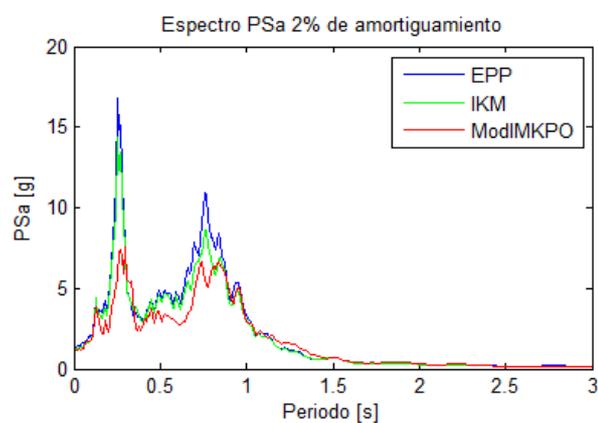


Figura 5-11: Espectro de aceleración de 4^o piso, $\xi=2\%$, registro de Llolleo

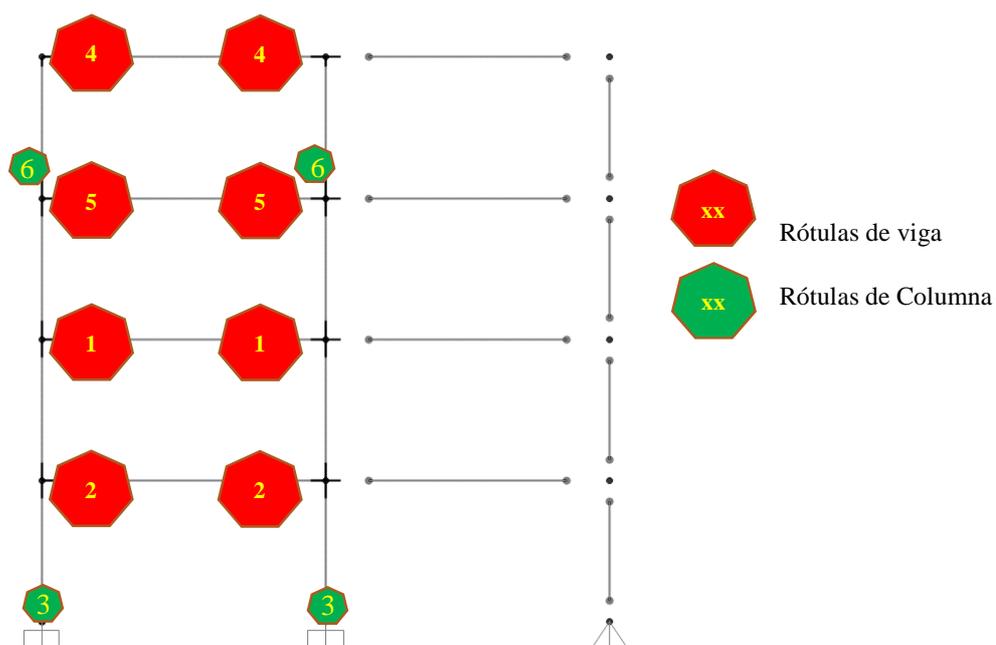


Figura 5-12: Secuencia de Rótulas Elastoplástica, IKM, registro de Llolleo

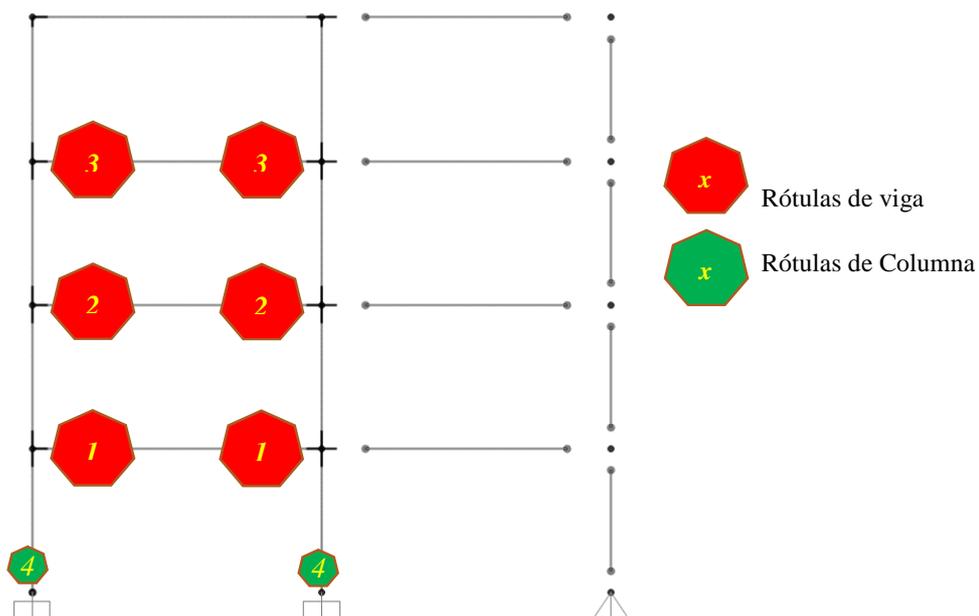


Figura 5-13: Secuencia de Rótulas ModIKMPO, registro de L1olleo

En el capítulo de Anexos, más adelante, se muestra en detalle la respuesta tiempo historia de desplazamiento de cada piso, las aceleraciones de piso y drift de entrepisos para todos los registros sísmicos y cada una de las rótulas inelásticas. Se muestran las respuestas con las dos variantes de amortiguamiento de Rayleigh

6 ANÁLISIS CONCLUSIONES

Los registros sísmicos utilizados en el análisis corresponden al evento sísmico de magnitud Mw 8.8 del 27 de febrero de 2010. Los registros presentan varios picos en el espectro elástico de 2% amortiguamiento. En el caso del registro de Concepción, los máximos de respuesta espectrales están en 0.25s y 0.7s. El registro de Maipú contiene los máximos de respuesta en 0.3s y 0.5s, y el registro de Llolleo contiene los valores de respuesta mayores en 0.24s y 0.45s.

La mayor energía sísmica del registro de Concepción está en 0.25s y en periodos largos entre 1.5 y 2.5s cuyo rango está fuera de influencia en la estructura estudiada. En el registro de Maipú la mayor respuesta está en 0.5s y para el caso de Llolleo está en 0.24s.

La estructura de acero de cuatro niveles, tiene periodos modales en 0.631s, 0.260s y 0.122s, por lo tanto el segundo modo se ve influenciado por las componentes de 0.24 a 0.30s de los registros del sismo del Maule. La componente espectral de 0.45s a 0.7s de los registros también se acerca a los periodos de 0.63 de la estructura.

Al analizar los drift de entrepiso, el sismo de Concepción produce los mayores valores en la respuesta, con valores de 3% a 2%, donde el máximo es para el modelo con plasticidad elastoplástica perfecta, y el menor para la rótula con histéresis con doble degradación de rigidez y resistencia.

Por el contrario, los menores valores de drift se producen con el registro de Maipú, y el comportamiento de las rótulas muestra que el elemento con inelasticidad EPP tiene los valores mayores de 1.3 a 1.7%, en cambio las rótulas con degradación simple o doble presentan valores menores al 1.5%.

Para el registro sísmico de Llolleo, los valores de drift están en torno a 1.6%, pero en este caso los valores para las distintas rótulas consideradas son menos dispersas en sus resultados

para los distintos casos de rótula. En este caso se da un caso singular, con la rótula EPP con un drift de 2.5% como un máximo aislado en el último piso, valor significativamente mayor que el promedio aritmético general del caso que es de 1.4%. Es en este mismo caso de rótula EPP con sismo de Llolleo donde se activa una rótula de columna del cuarto piso, pero también se activan las rótulas de columna de cuarto piso en el caso de rótulas IKM y registro de Llolleo, pero no se observa un drift significativamente más alto. La Figura 6-1 muestra un resumen de drift de entrepiso para todos los casos analizados.

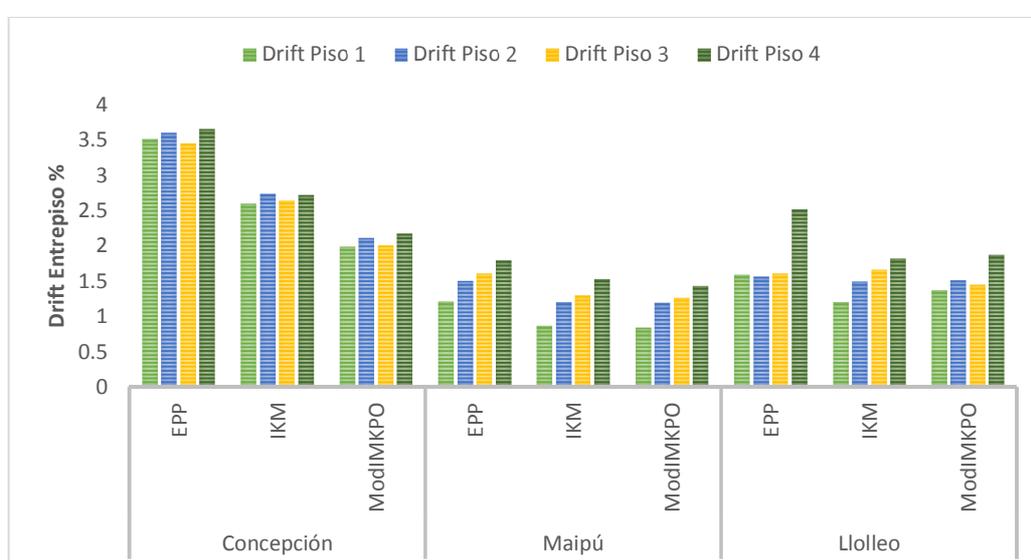


Figura 6-1: Cuadro resumen de respuesta de Drift de entrepisos

Por el contrario, al analizar las aceleraciones de piso, estas son mayores para el análisis con el registro de Llolleo y las menores magnitudes se dan para el registro de Maipú. Para todos los registros se repite el patrón de máxima aceleración en pisos para rótulas de tipo EPP, y el mínimo para las rótulas de doble degradación. En el caso del registro de Llolleo, las aceleraciones de piso son sustancialmente diferentes al comparar las distintas rotulas plásticas, dándose unos máximos de 1.8g y 1.5g para las rótulas EPP y IKM respectivamente. Nuevamente destacamos que en estos casos se activó rótulas de columna en último piso.

Las aceleraciones para el caso de la rótula ModIMKPO las menores, con máximos en el rango de 1.2g.

Para todos los análisis los máximos de aceleración de piso se presentan el piso 1 y el piso cuarto, excepto en los dos casos recién mencionados del registro de Llolleo. Además las aceleraciones de piso en todos los casos son significativamente mayores a la aceleración pico del suelo PGA, en razones cercanas al doble. La Figura 6-2 resume las aceleraciones de piso de todos los análisis realizados.

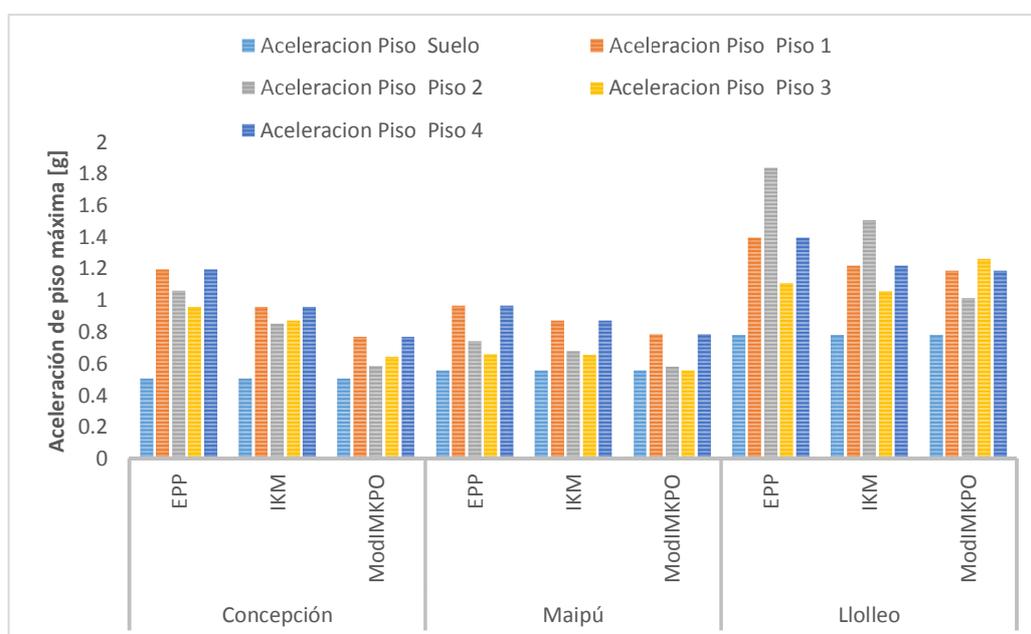


Figura 6-2: Cuadro resumen de respuesta de aceleración de piso

Al analizar los valores de desplazamiento de techo, estos varían entre 28 a 40 cm en el caso del sismo de Concepción, bajando a un rango de 14 a 16cm en los análisis realizados con los sismos de Maipú y Llolleo.

Los desplazamientos remanentes al terminar el sismo, son un parámetro que cuantifica también el daño del edificio, y los resultados del análisis son muy dispares, registrándose

valores que van de unos pocos milímetros hasta 26cm. Al analizar la respuesta de desplazamiento tiempo historia, se observa la activación de las rótulas de columna que producen el desplazamiento de techo remanente, y se observan casos donde la rótula es devuelta a su posición neutra, dejando un giro remanente de muy baja amplitud respecto al máximo registrado durante el sismo y que incursiona en el rango no lineal. La Figura 6-3 muestra el caso del registro de Concepción.

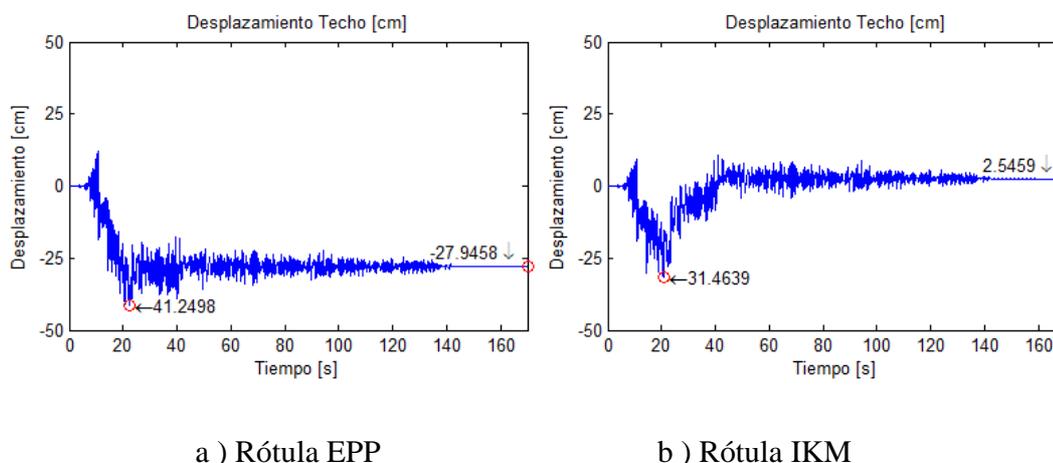


Figura 6-3: Desplazamiento de techo para registro de Concepción

Un hecho relevante es que la deformación residual que se va acumulando a medida que transcurre el sismo, en el caso de la rótula con doble degradación, se produce de manera gradual, cosa que no se repite en las rótulas EPP y IKM, donde se observan algunos desplazamientos súbitos en las respuestas de desplazamiento de techo incluyendo algunos retornos a valores de deformación residual menores. La Figura 6-4 muestra el caso de respuesta de desplazamiento para rótula con doble degradación (ModIMKPO) con registros sísmico de Concepción donde se puede observar la deformación residual permanente al final del evento. La figura Figura 6-5 muestra un cuadro de resumen de los desplazamientos de techo, máximos y residuales.

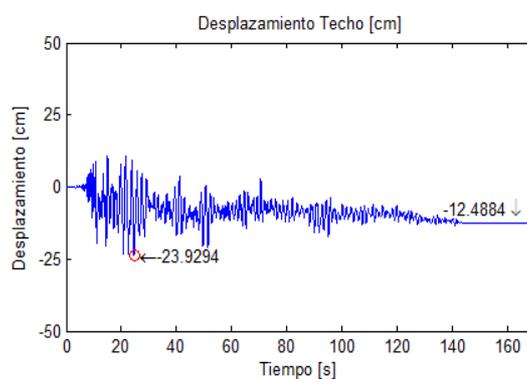


Figura 6-4: Desplazamiento de techo para registro de Concepción con rótula

ModIMKPO

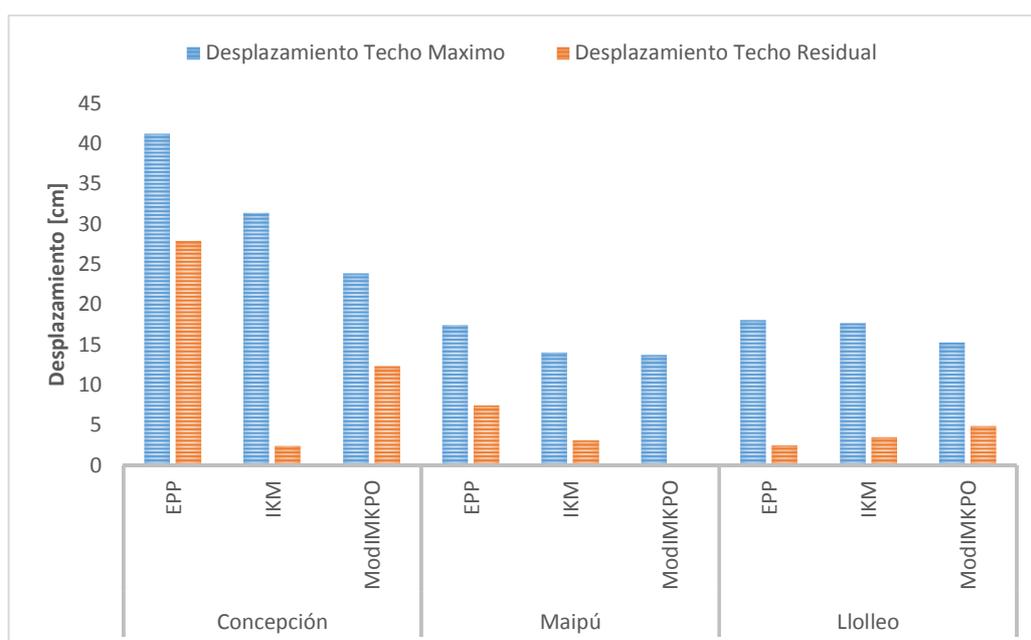


Figura 6-5: Desplazamientos relativos de techo, máximo y residual

El amortiguamiento de Rayleigh calculado con la matriz C , proporcional a masa y rigidez, ya sea con la matriz de rigidez inicial o la matriz de rigidez tangente, no produce diferencias significativas en los análisis realizados en este trabajo.

Independiente del tipo de rótula plástica activa, el registro de Concepción produce los mayores desplazamientos de techo y deformaciones residuales. Del mismo modo se puede afirmar que el registro de Lolleo produce en este edificio los desplazamientos relativos instantáneos y residuales menores, pero las aceleraciones de piso son máximas y es el único registro que activa la rótula de base de columna del cuarto piso.

Finalmente, en los análisis realizados, la influencia del tipo de rótula plástica utilizada en la modelación, tiene un efecto significativo en las respuestas de drift, de desplazamiento de techo residual, donde el efecto varía según el registro sísmico que se utilice. Las respuestas en general siempre tendrán una dependencia del sismo utilizado, por lo que será necesario realizar un análisis de varios registros representativos de la zona geográfica de análisis para sacar conclusiones relevantes, pero sin perjuicio de lo anterior, se observa la fuerte tendencia de que las respuestas son influidas por el tipo de rotulación plástica en los elementos.

7 BIBLIOGRAFIA

Al-Shawwa, N. y Lignos, D., (2013), *Web-Based Interactive Tools for Performance-Based Earthquake Engineering*. <http://dimitrios-lignos.research.mcgill.ca/databases/component/> Consultado el 6 noviembre 2014.

Chopra, A. K., (2012), *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs: New Jersey.

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad De Chile, (2010). *Terremotos de Chile*. <http://terremotos.ing.uchile.cl>. Consultado el 27 octubre 2014.

Ibarra, L. F., Medina, R. A. y Krawinkler, H., (2005). Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 34(12), pp. 1489-1511.

Lignos, D. G. y Krawinkler, H., (2011). Deterioration Modeling of Steel Components in Support of Collapse Prediction of Steel Moment Frames Under Earthquake Loading. *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. 137(11), pp. 1291-1302.

Lignos, D. G. y Krawinkler, H., (2013). Development and Utilization of Structural Component Databases for Performance-Based Earthquake Engineering. *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. 139(SPECIAL ISSUE: NEES 2), pp. 1382-1394.

NIST, (2011). *Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-History Analyses*, NIST GCR 11-917-15: prepared by NEHRP Consultants Joint Venture for the National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland.

Pacific Earthquake Engineering Research Center, (2011). *OpenSEES Wiki*. http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/UniaxialMaterial_Command. Consultado el 5 octubre 2014.

Riley, W. F. y Sturges, L. D., (1996). *Ingeniería mecánica - estática. I*. Reverté S.A., Barcelona.

Ruiz, S. y Saragoni, R., (2011). *Observed Soil Effect In Two Peaks Response Spectra Of 2010 Chile Subduction Mega-Earthquake*. 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 13-17 enero de 2011, Santiago-Chile.

Scott, M. H. y Fenves, G. L., (2010). Krylov Subspace Accelerated Newton Algorithm: Application to Dynamic Progressive Collapse Simulation of Frames. *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol. 136(5), pp. 473-480.

ANEXOS

A.1 Respuestas detalladas registro de Concepción

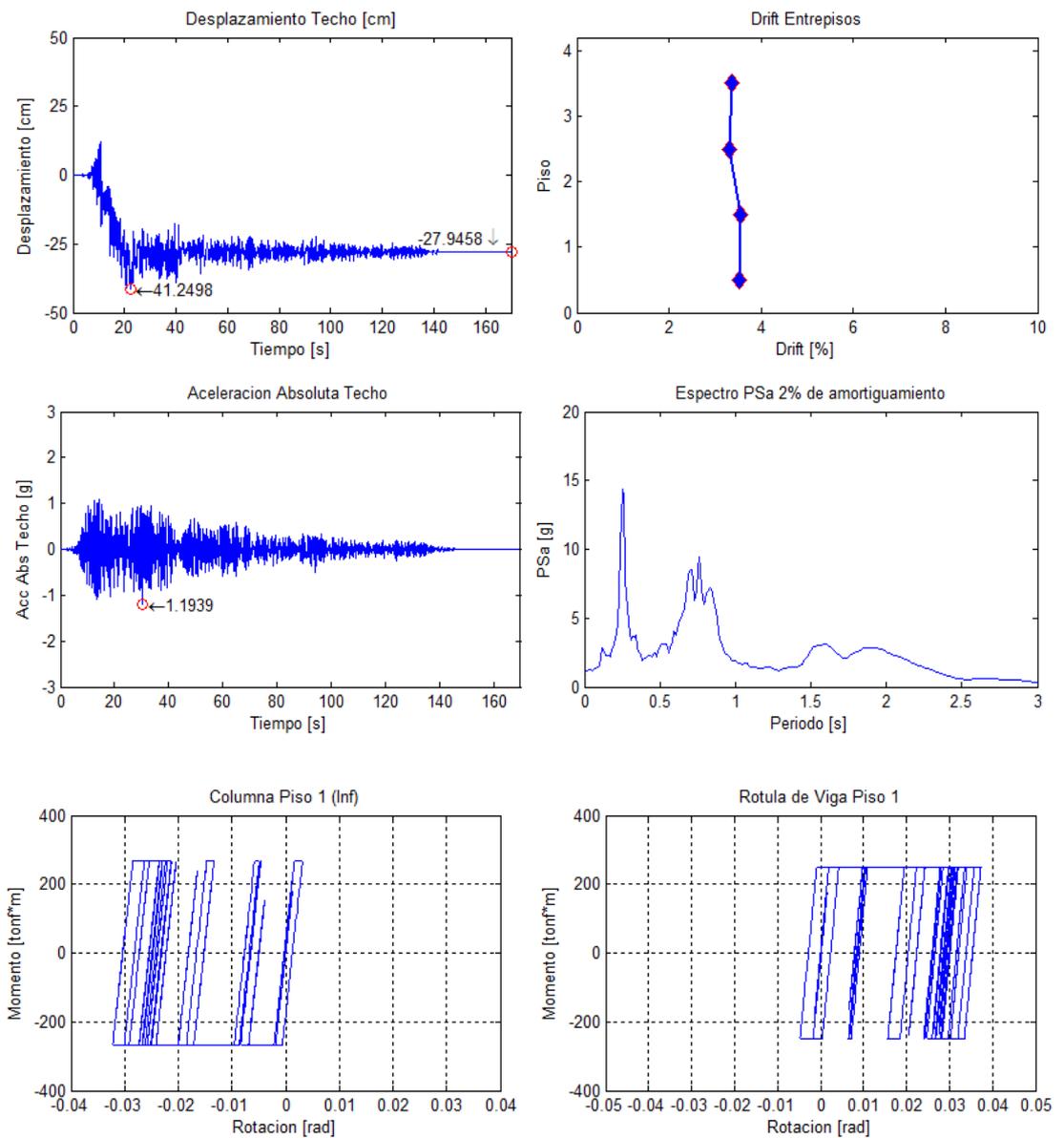


Figura 7-1: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula EPP

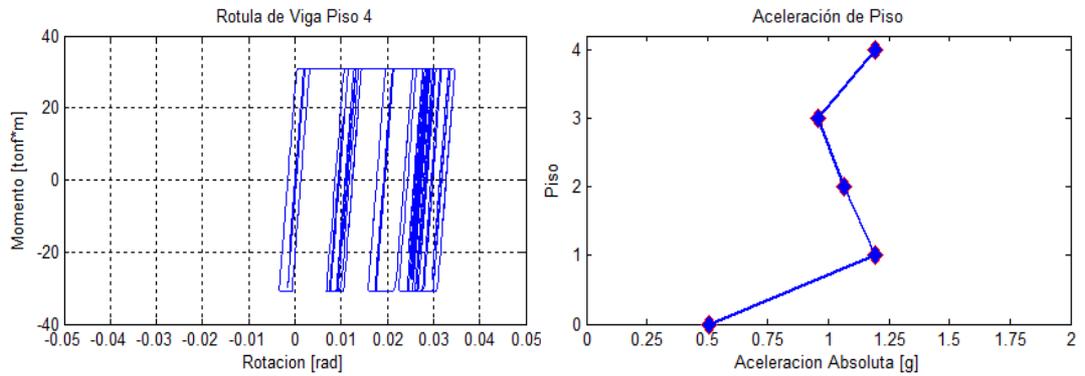


Figura 7-2: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula EPP

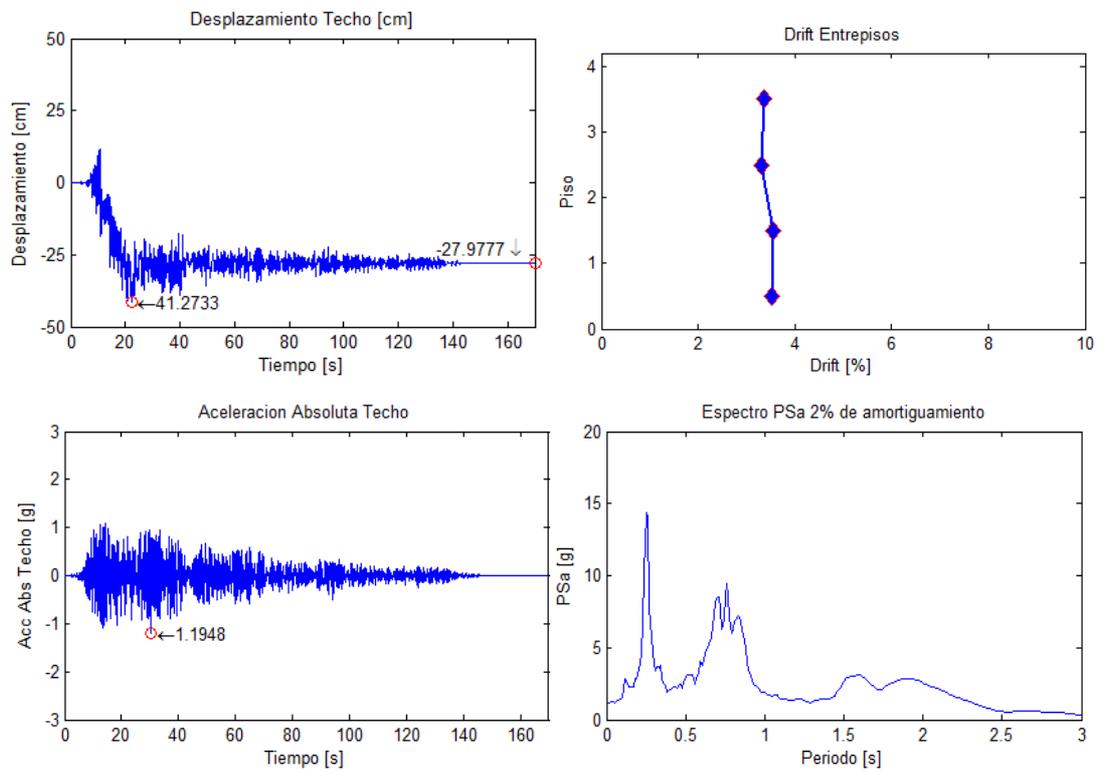


Figura 7-3: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula EPP

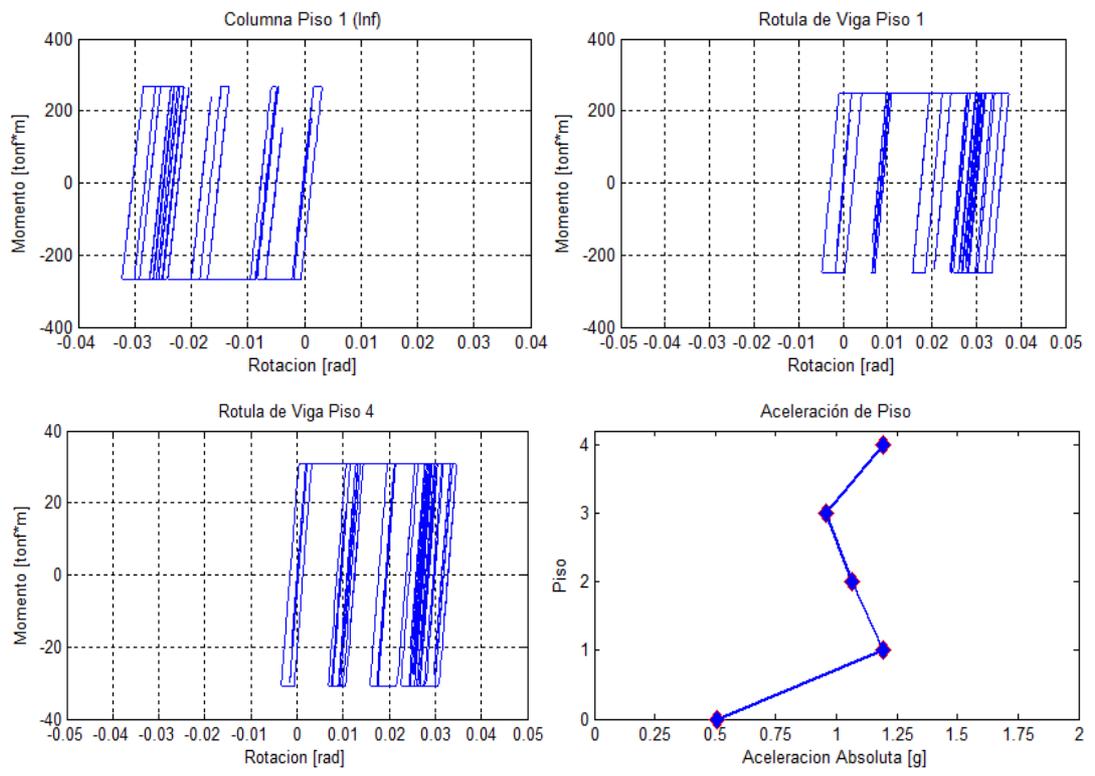


Figura 7-4: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula EPP

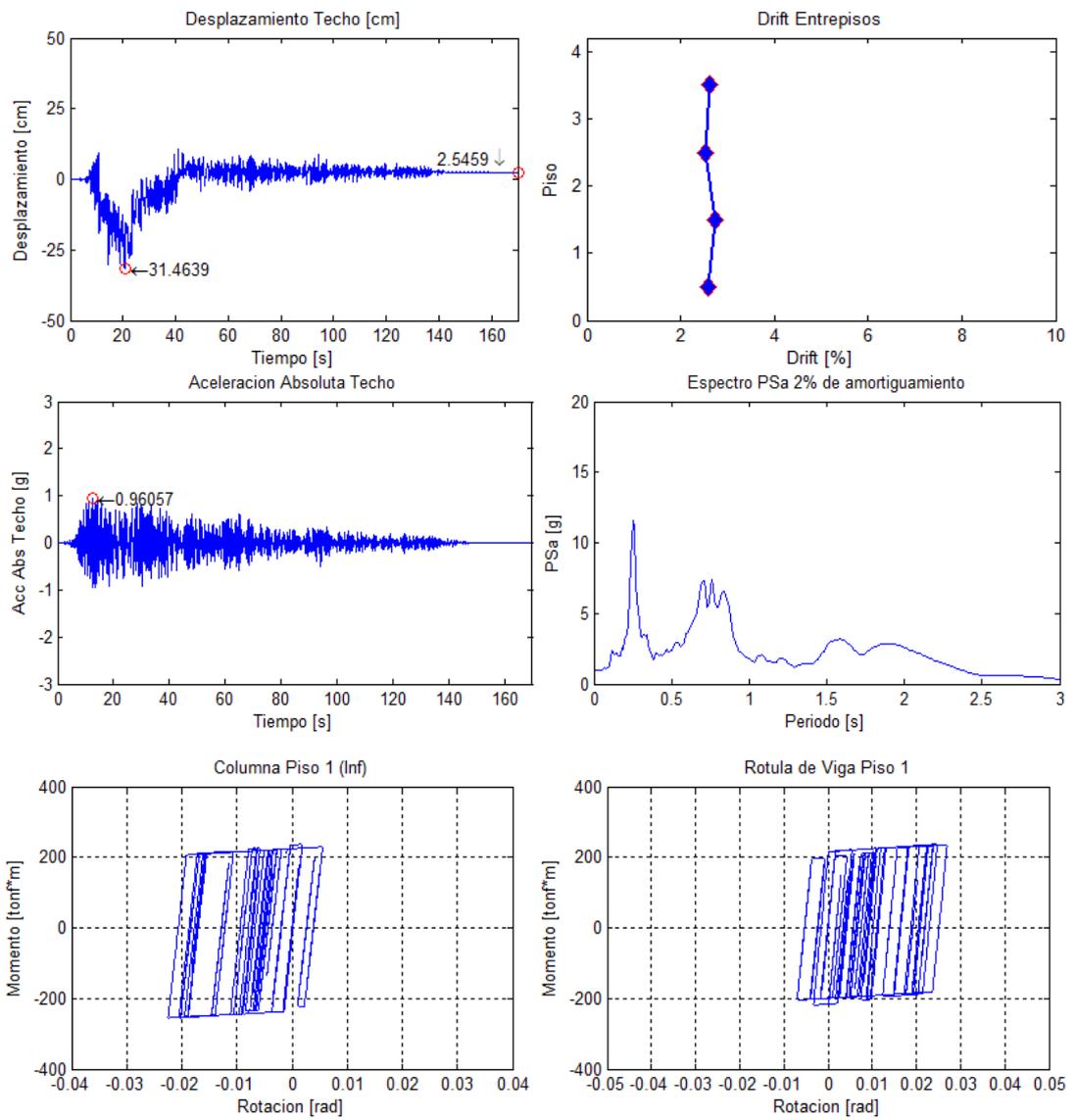


Figura 7-5: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula IKM

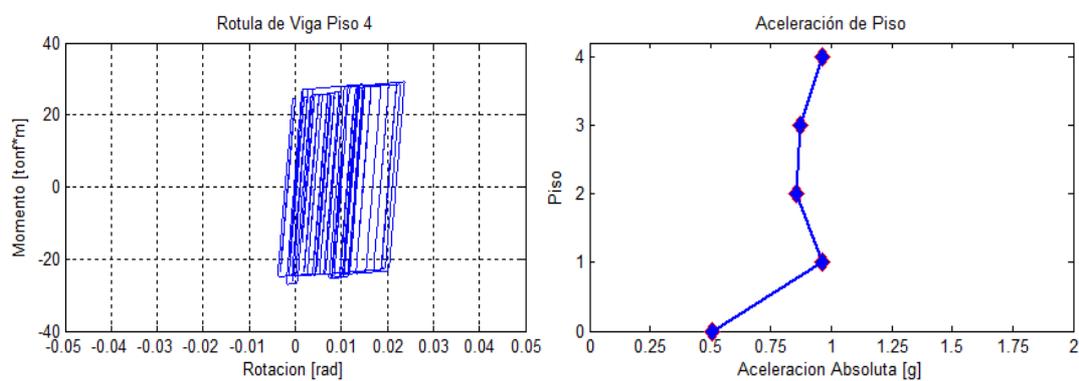


Figura 7-6: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula IKM

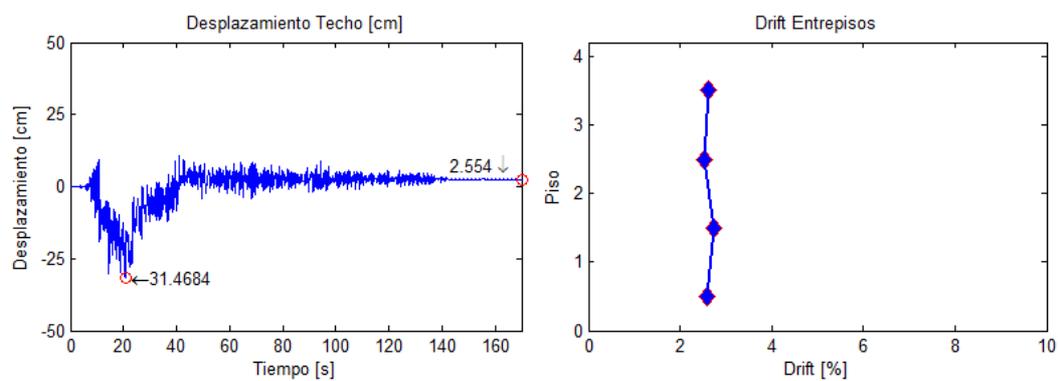


Figura 7-7: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula IKM

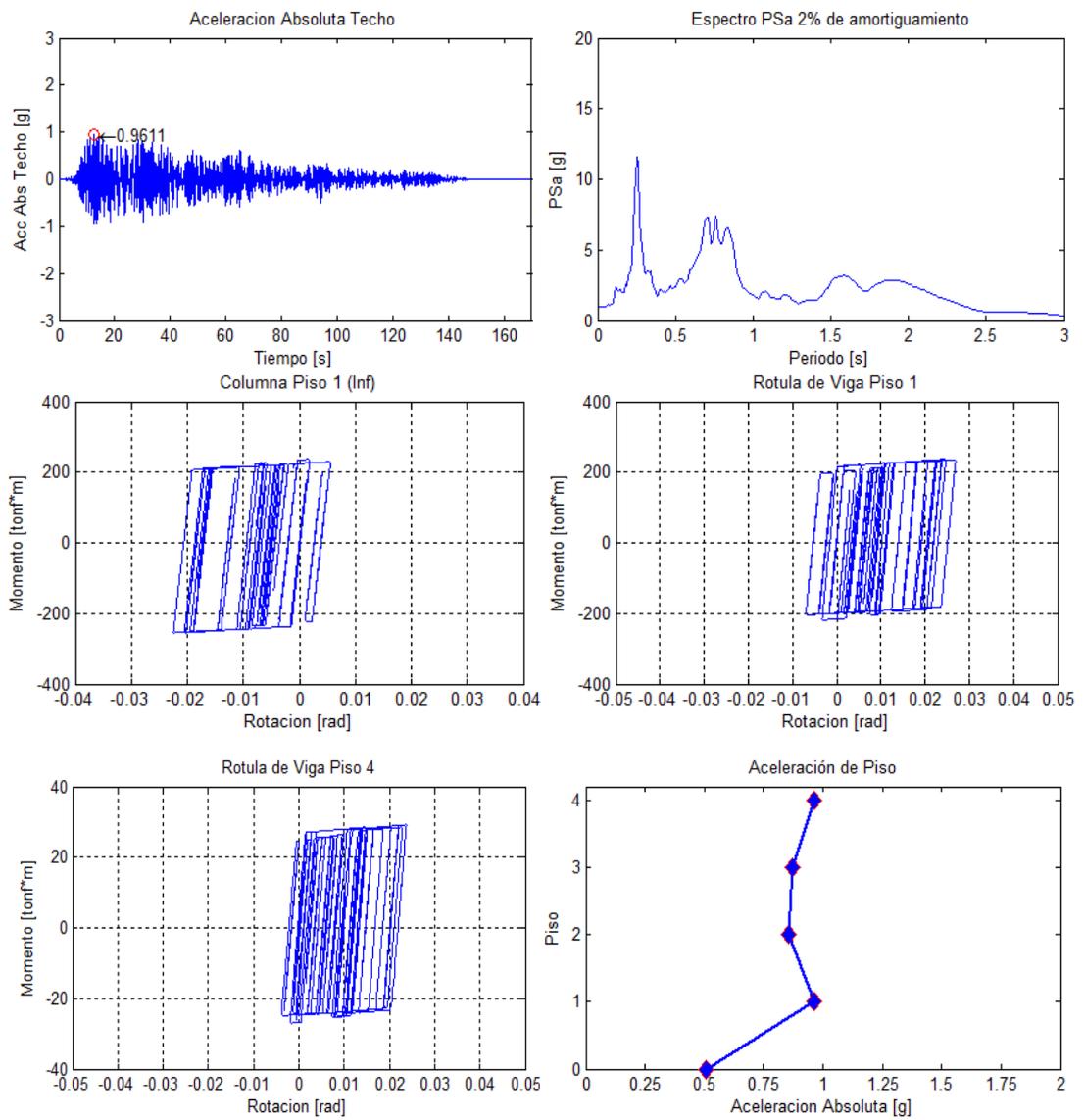


Figura 7-8: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula IKM

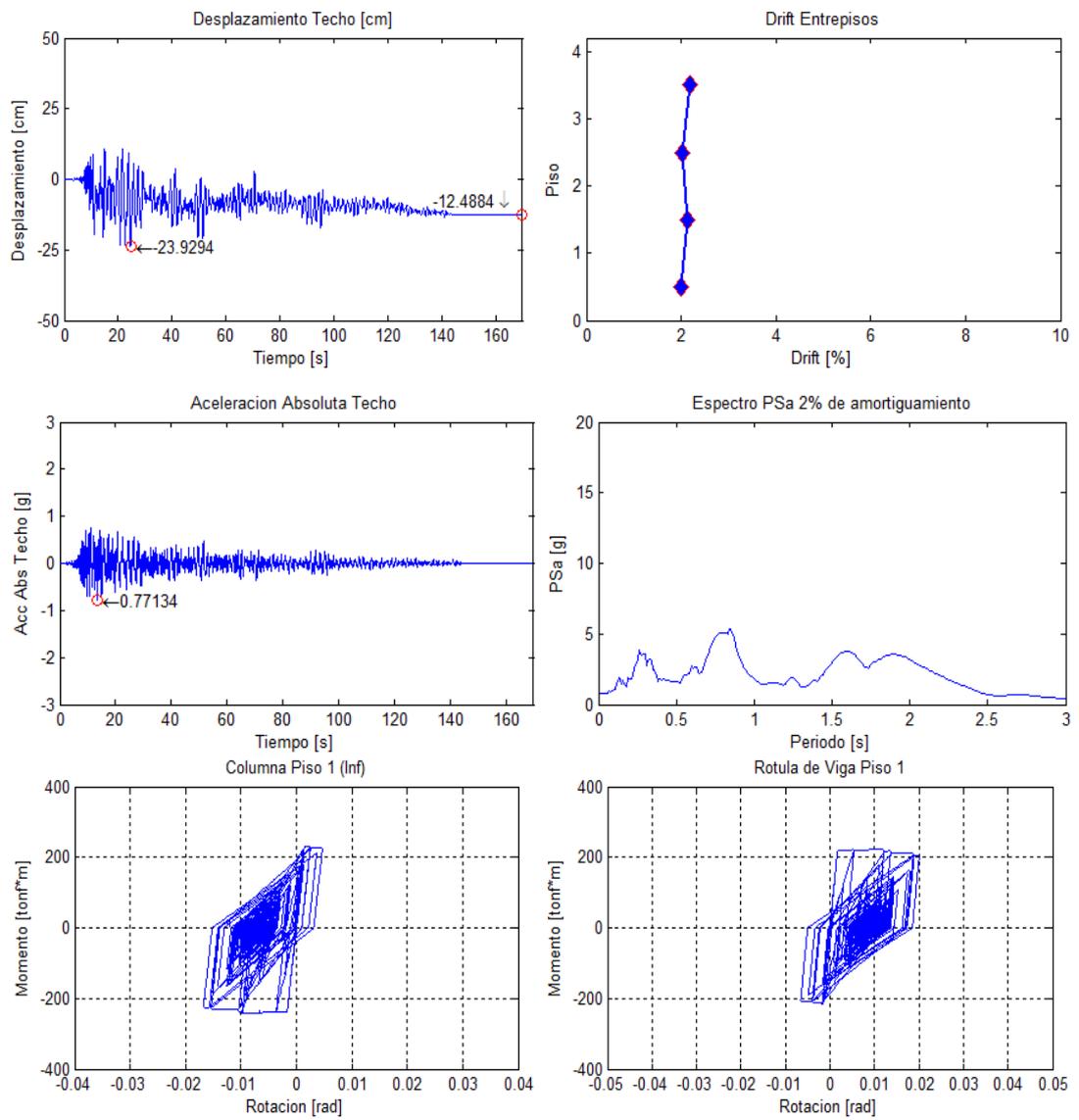


Figura 7-9: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula

ModIMKPO

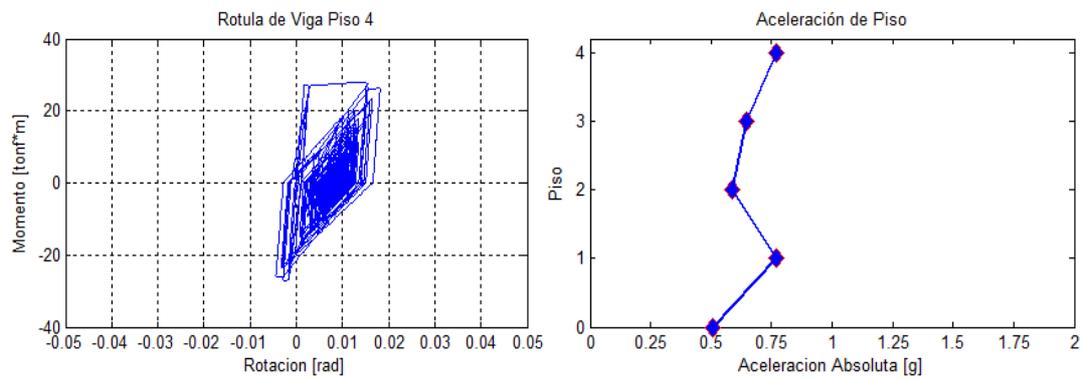


Figura 7-10: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula

ModIMKPO

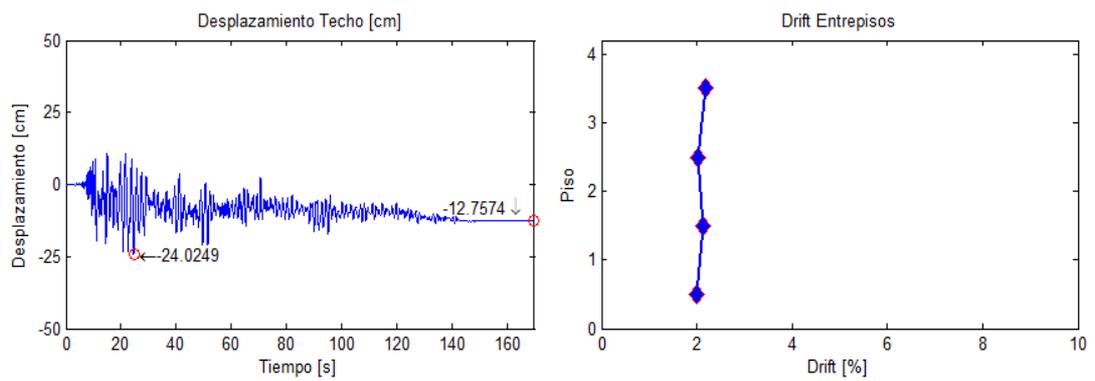


Figura 7-11: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula

ModIMKPO

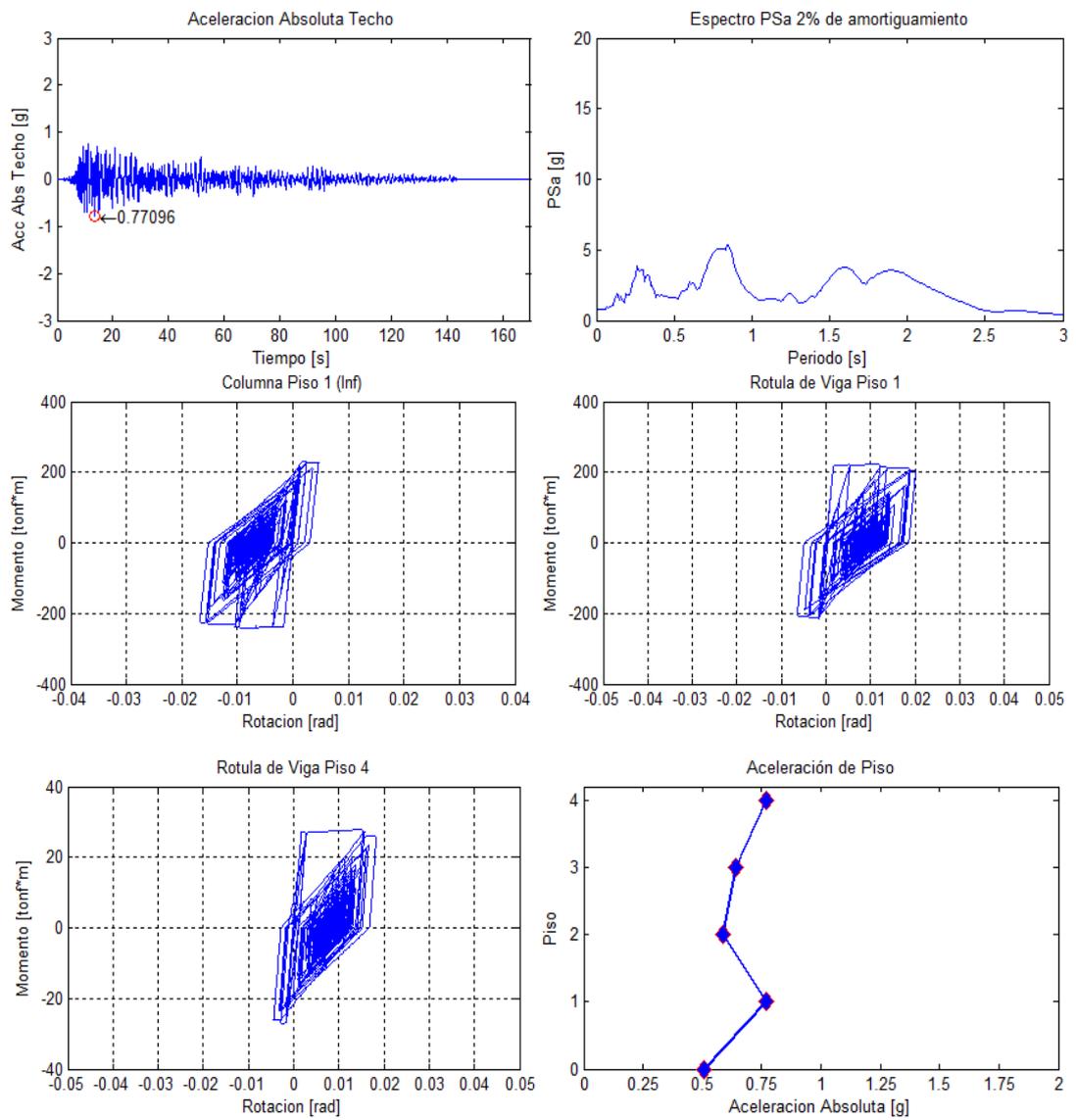


Figura 7-12: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula

ModIMKPO

A.2 Respuestas detalladas registro de Maipú

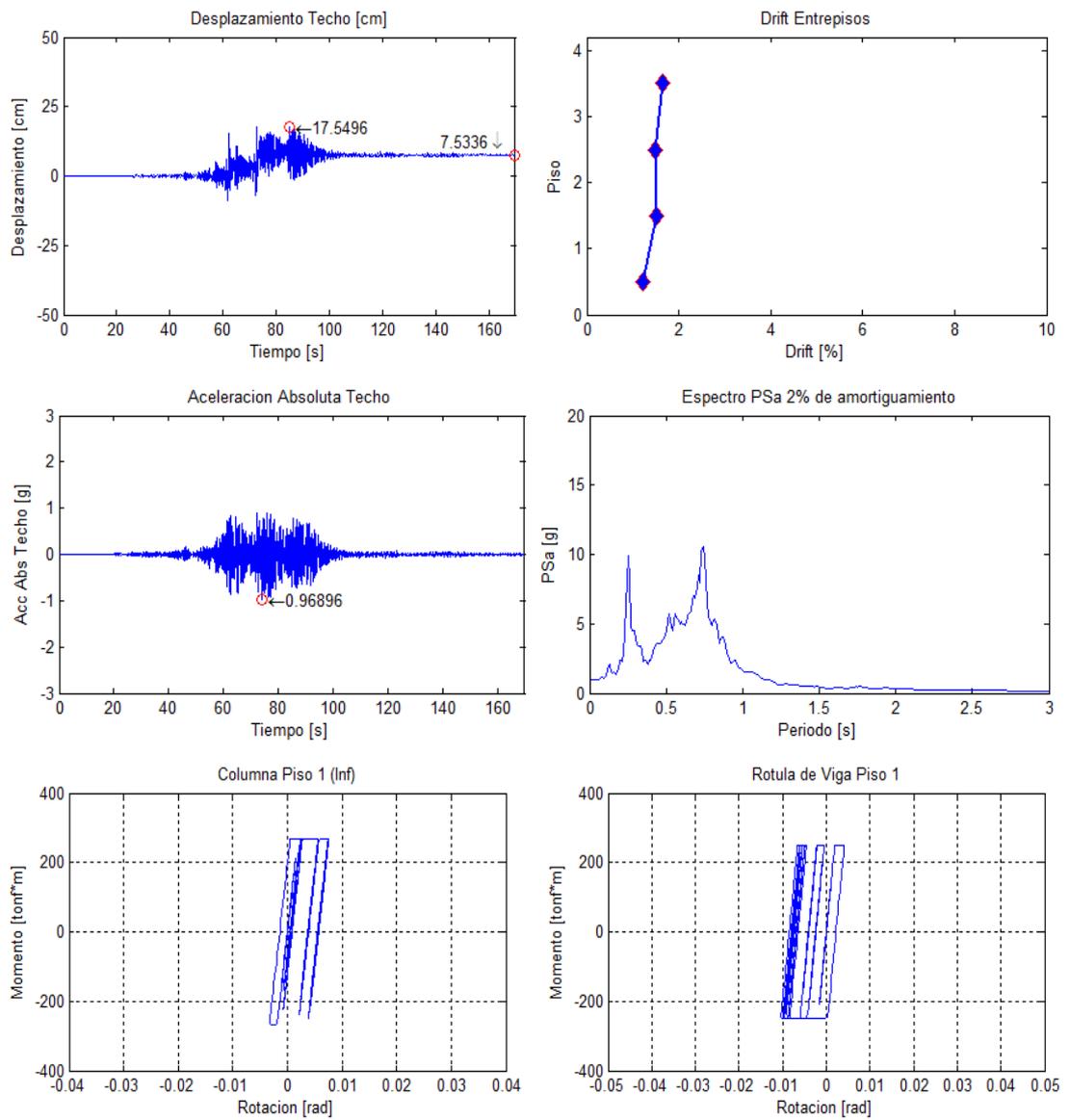


Figura 7-13: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula EPP

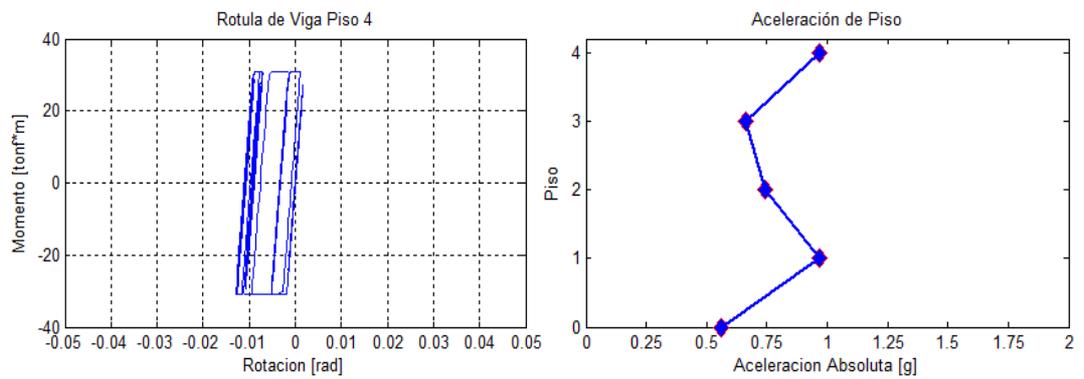


Figura 7-14: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula EPP

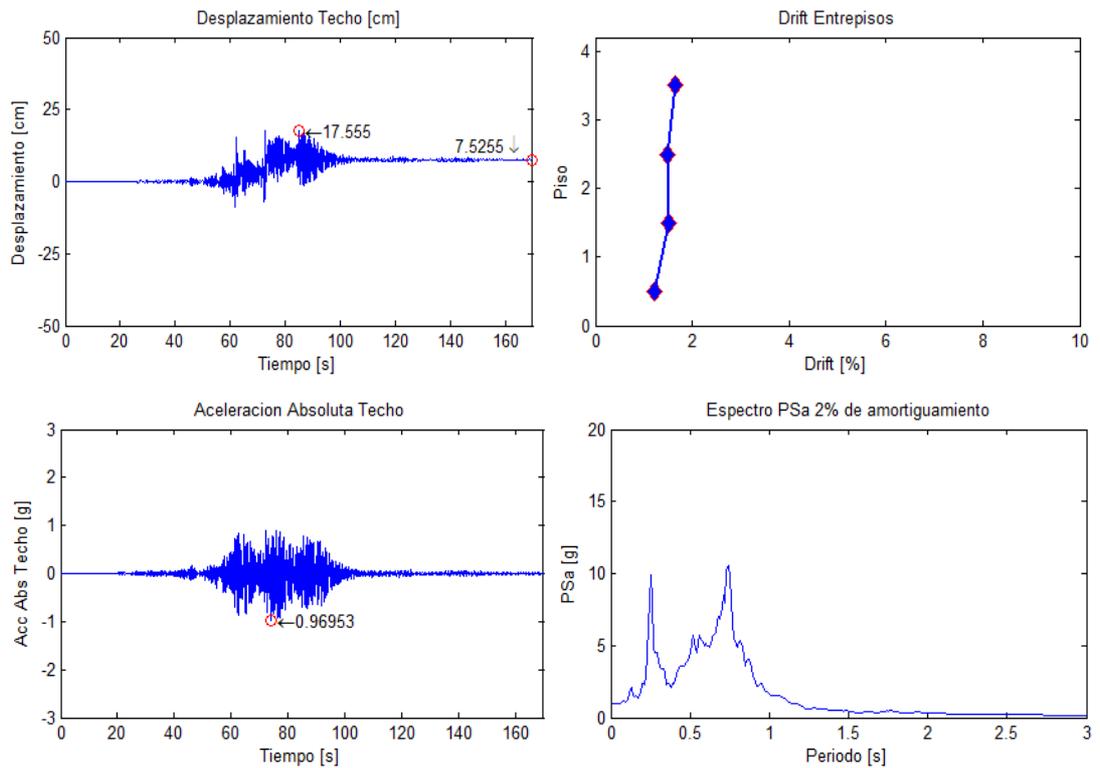


Figura 7-15: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula EPP

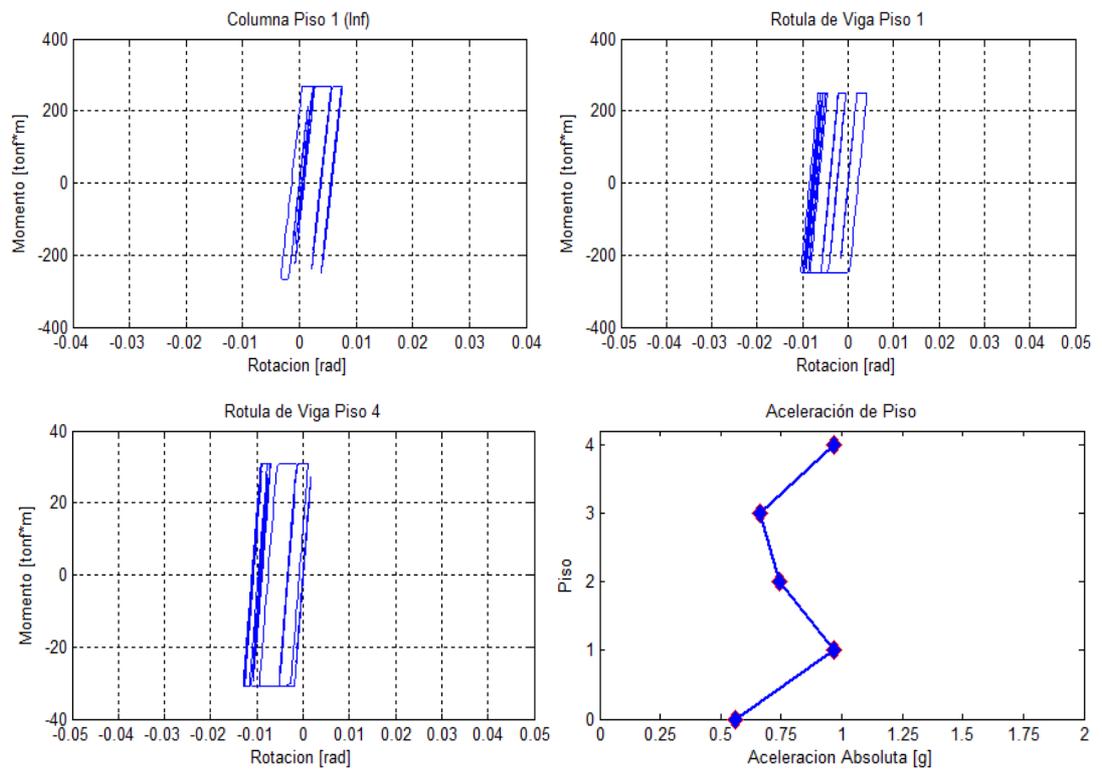


Figura 7-16: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula EPP

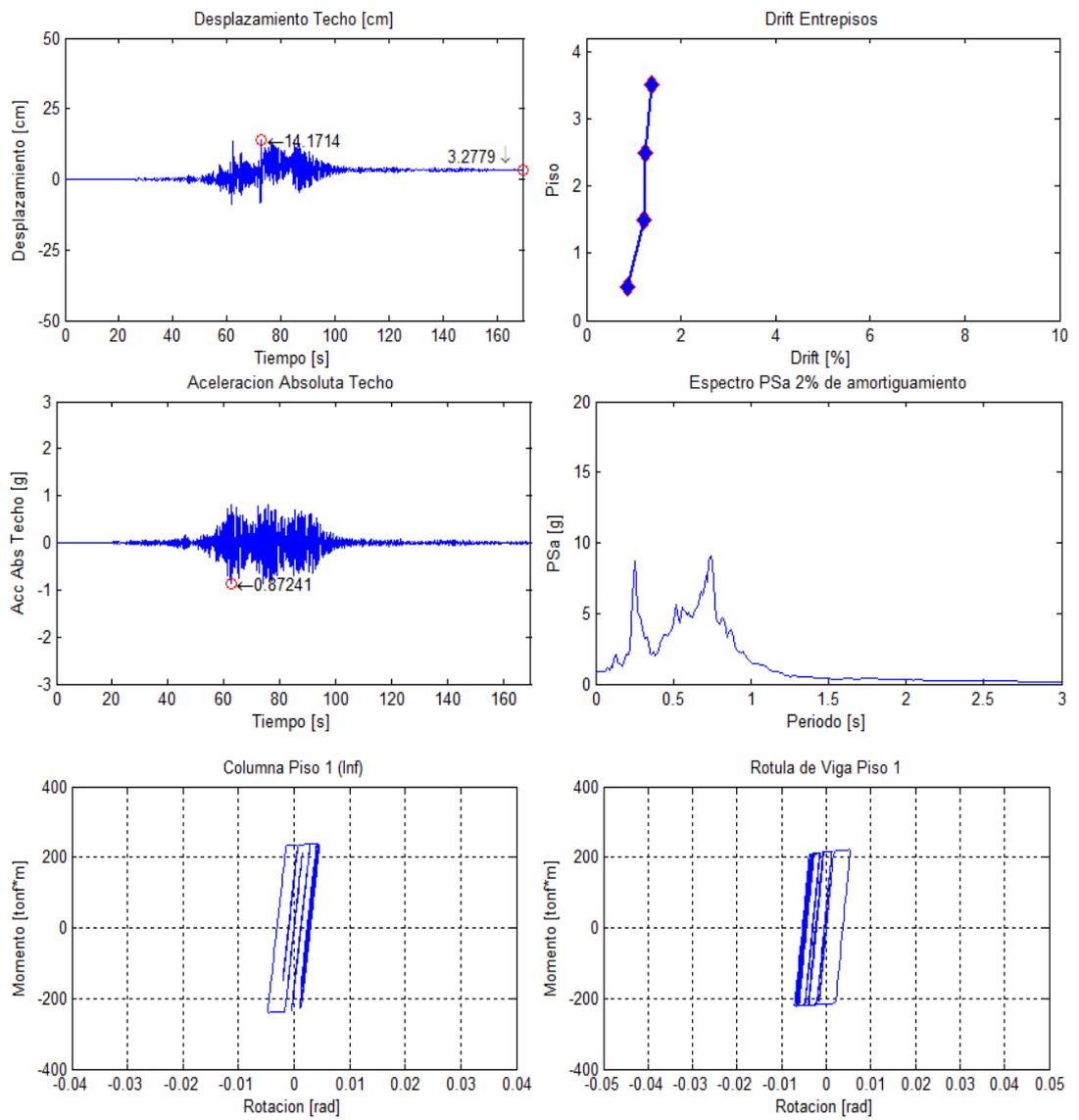


Figura 7-17: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula IKM

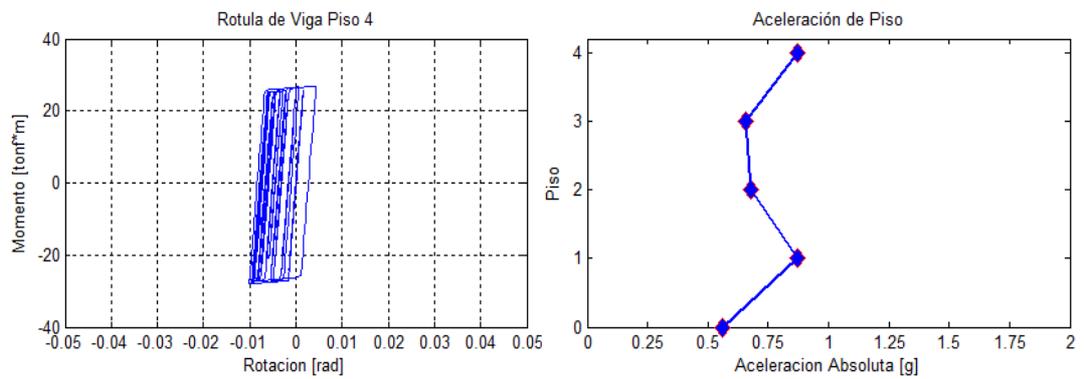


Figura 7-18: Respuestas con amortiguamiento proporcional a inicial. Rótula IKM

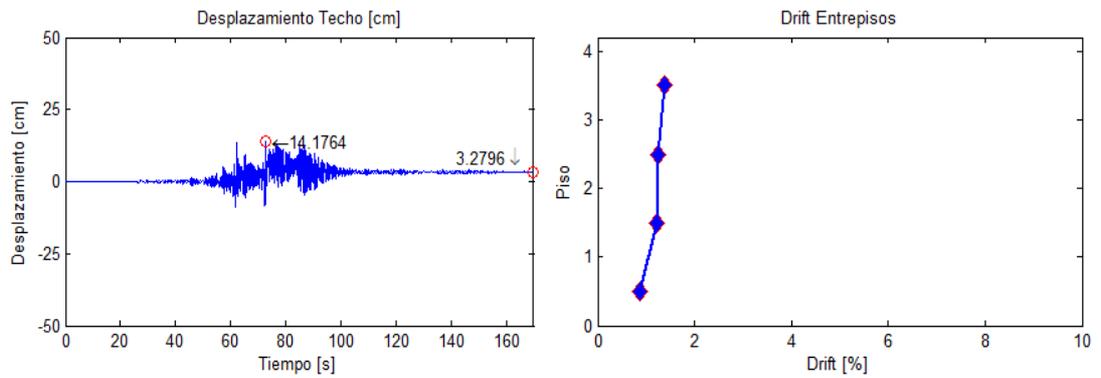


Figura 7-19: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula

IKM

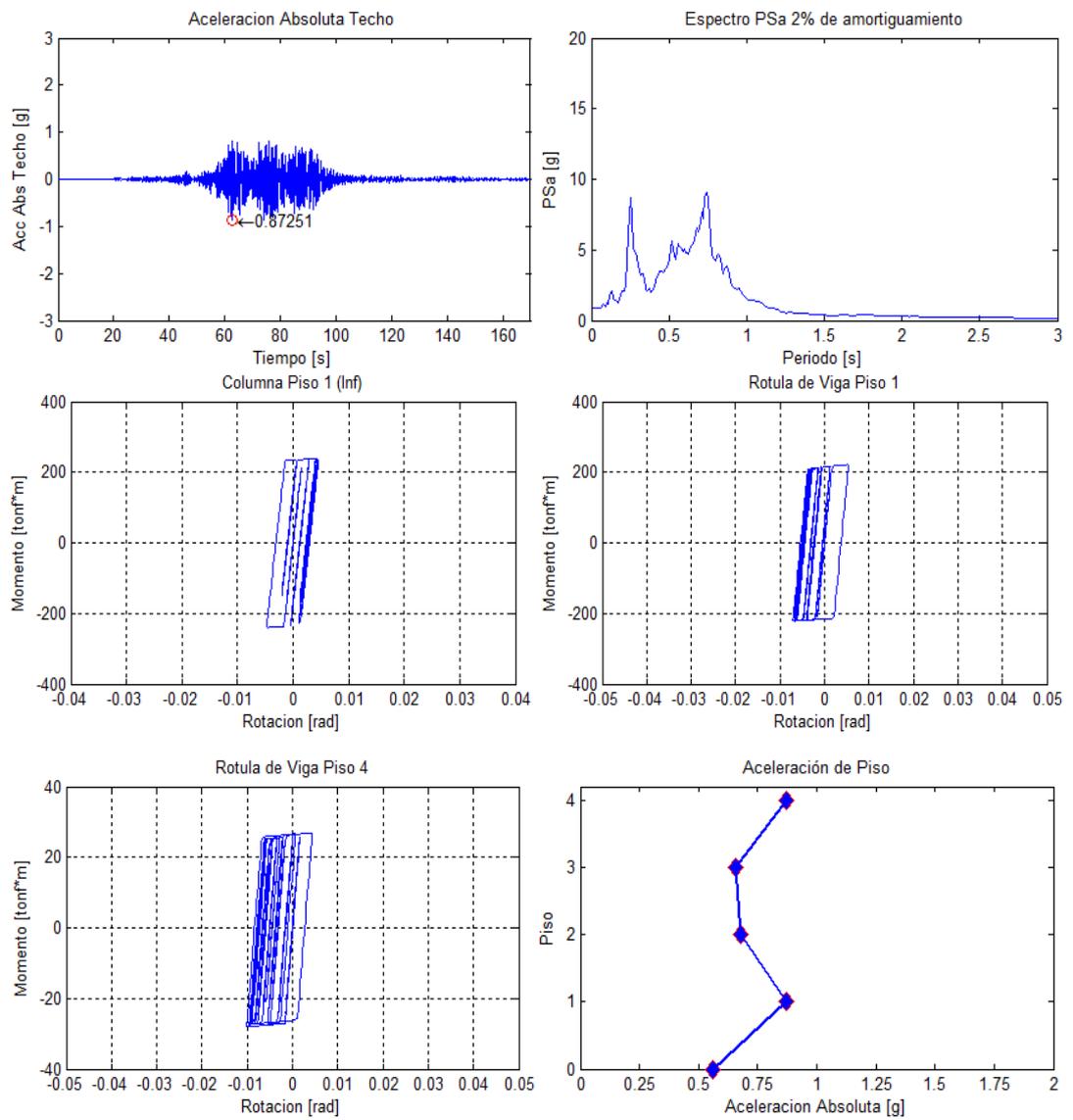


Figura 7-20: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula

IKM

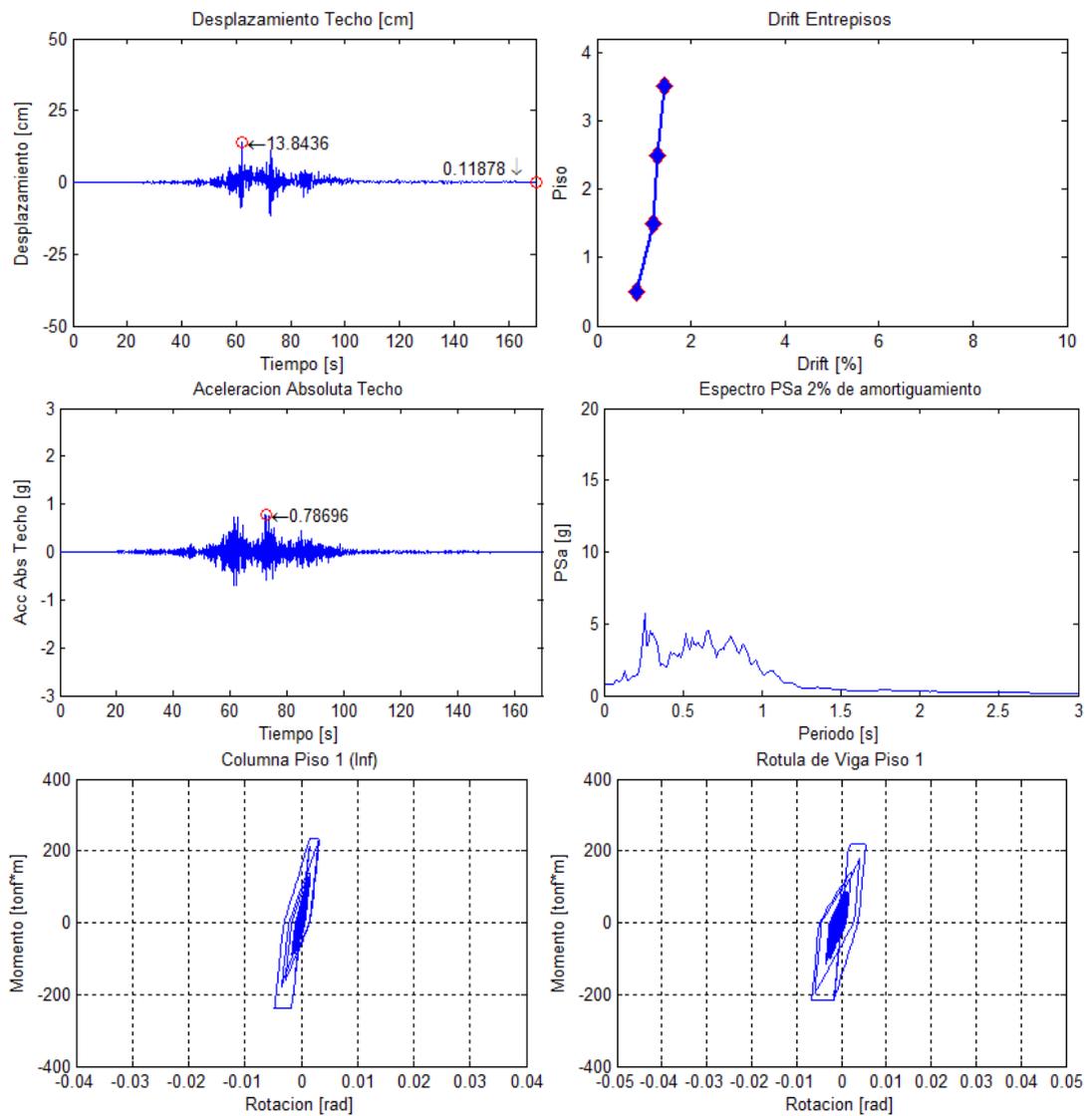


Figura 7-21: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula

ModIMKPO

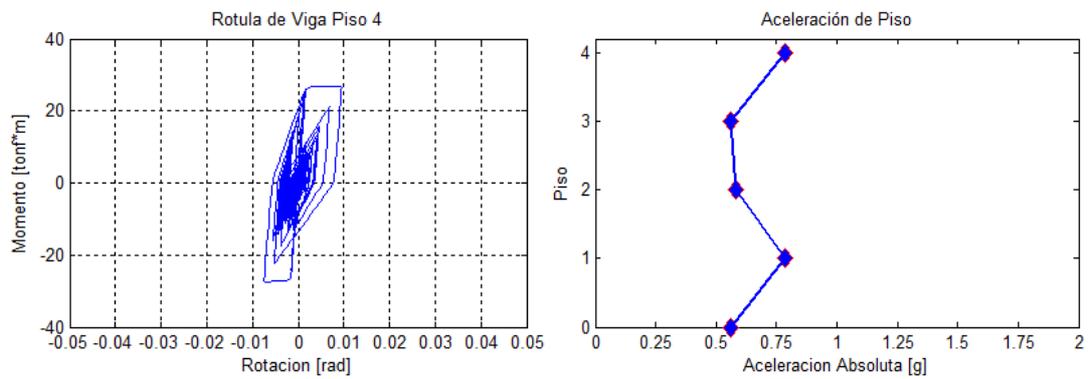


Figura 7-22: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula

ModIMKPO

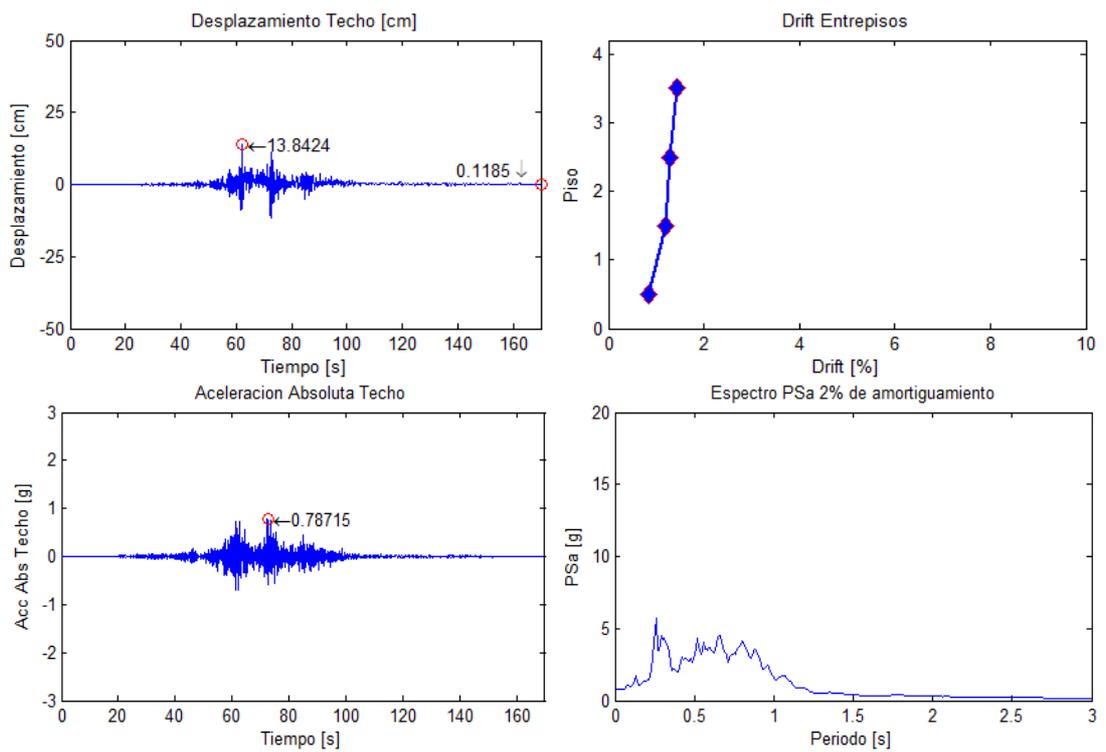


Figura 7-23: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula

ModIMKPO

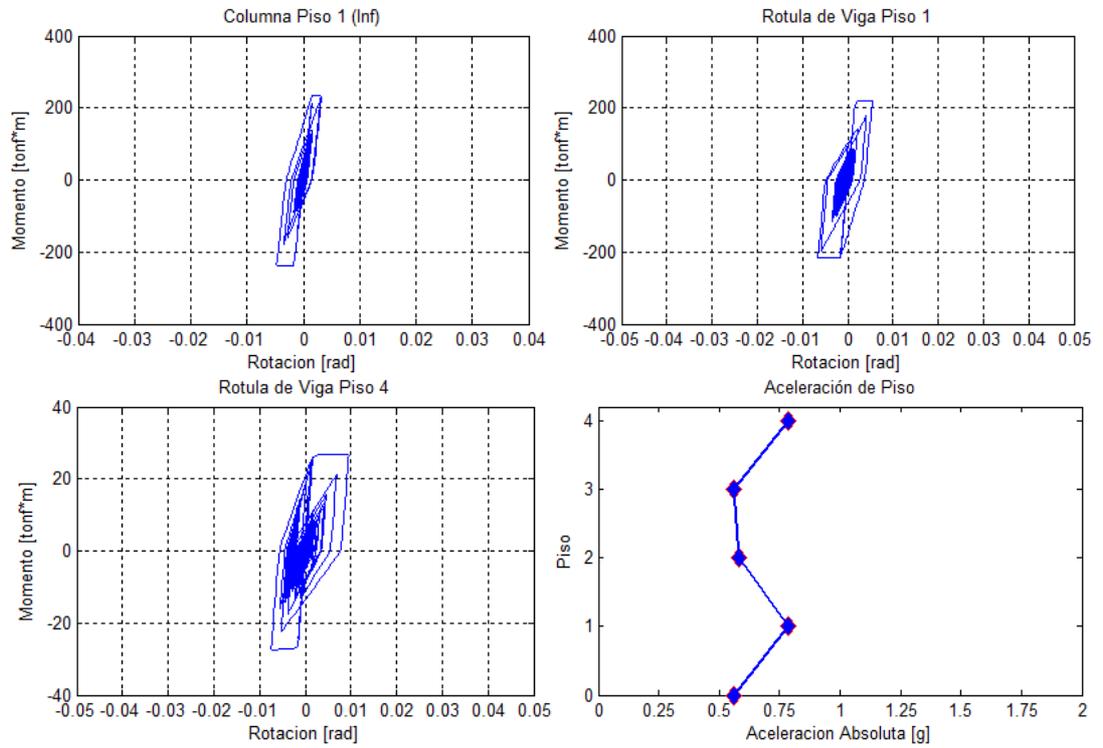


Figura 7-24: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula

ModIMKPO

A.3 Respuestas detalladas registro de Lolloe

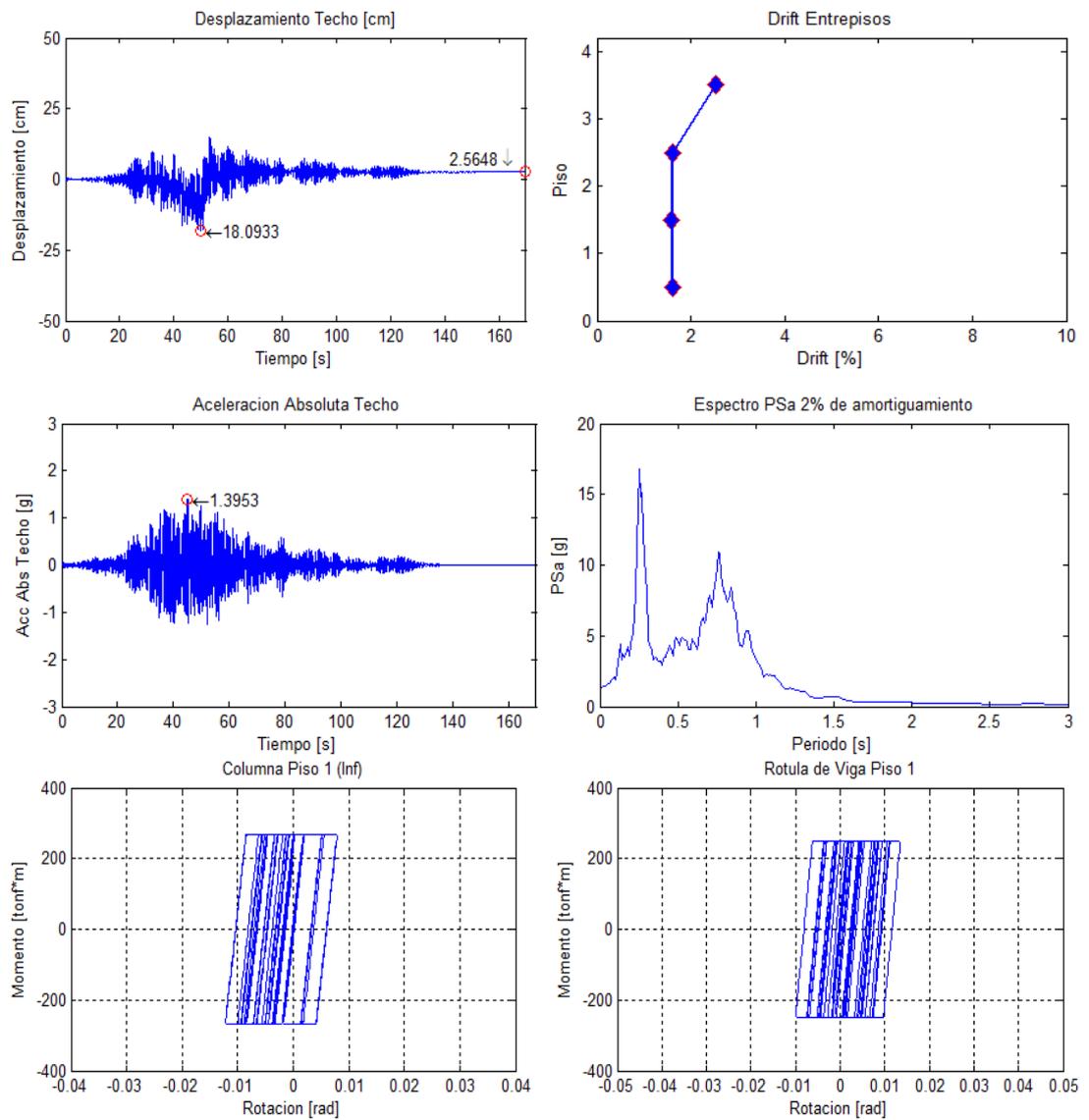


Figura 7-25: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula EPP

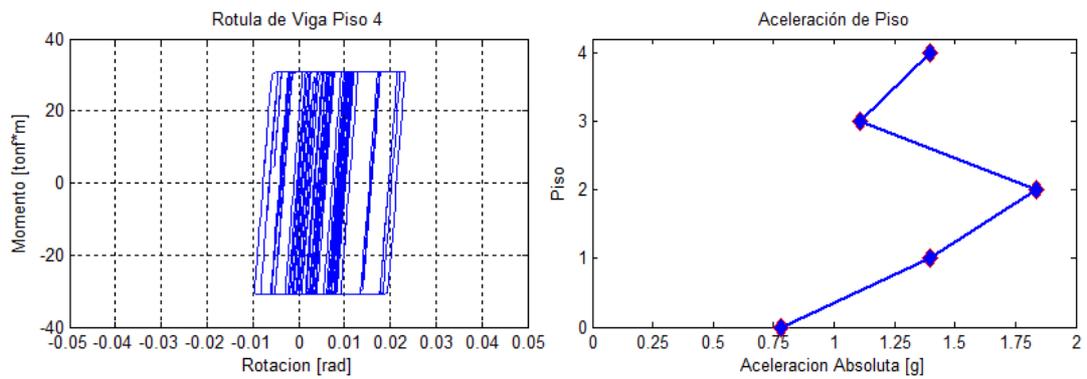


Figura 7-26: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula EPP

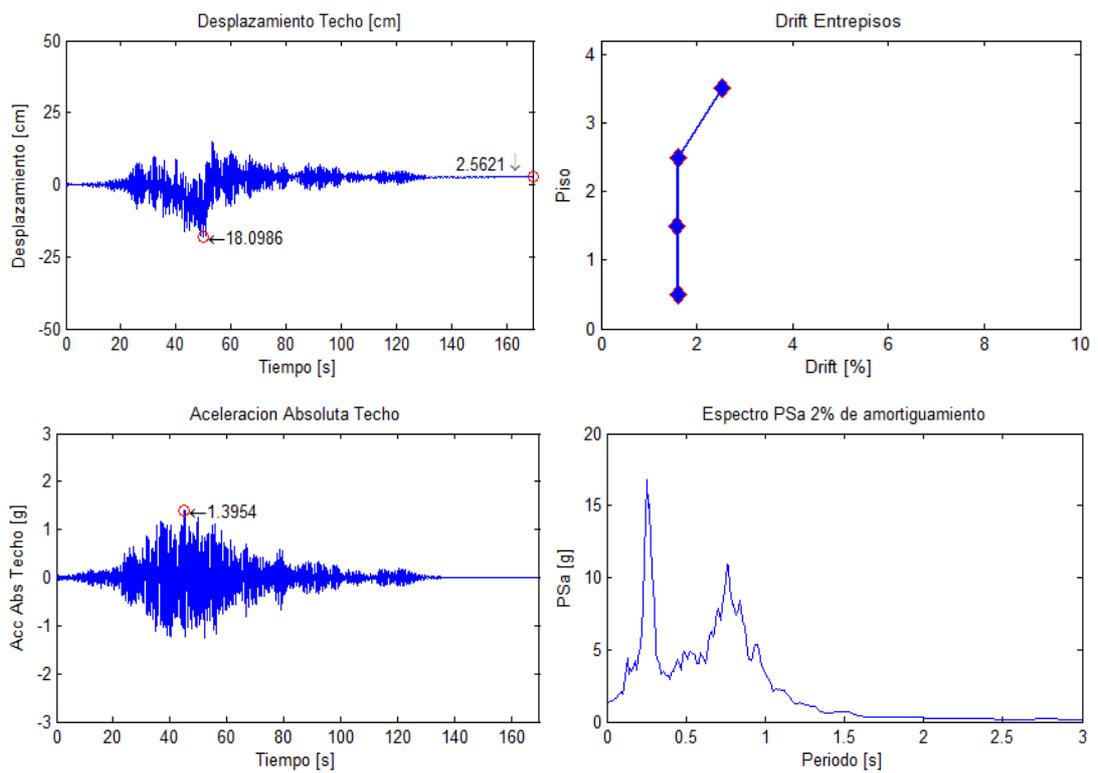


Figura 7-27: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula EPP

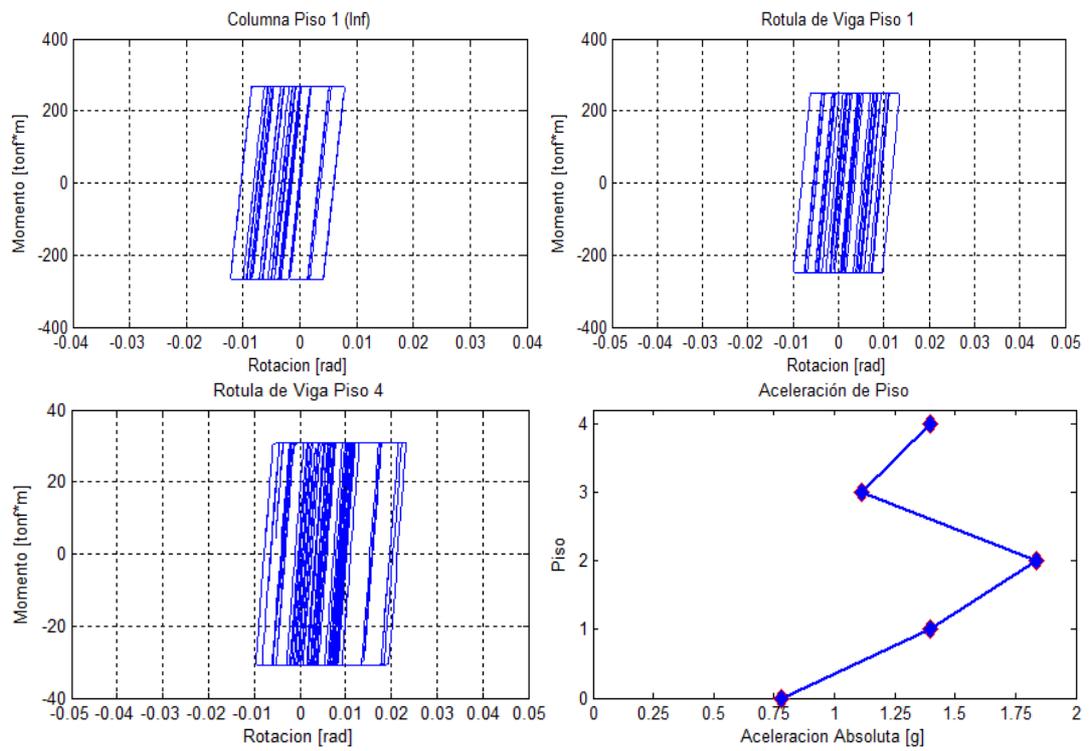


Figura 7-28: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula EPP

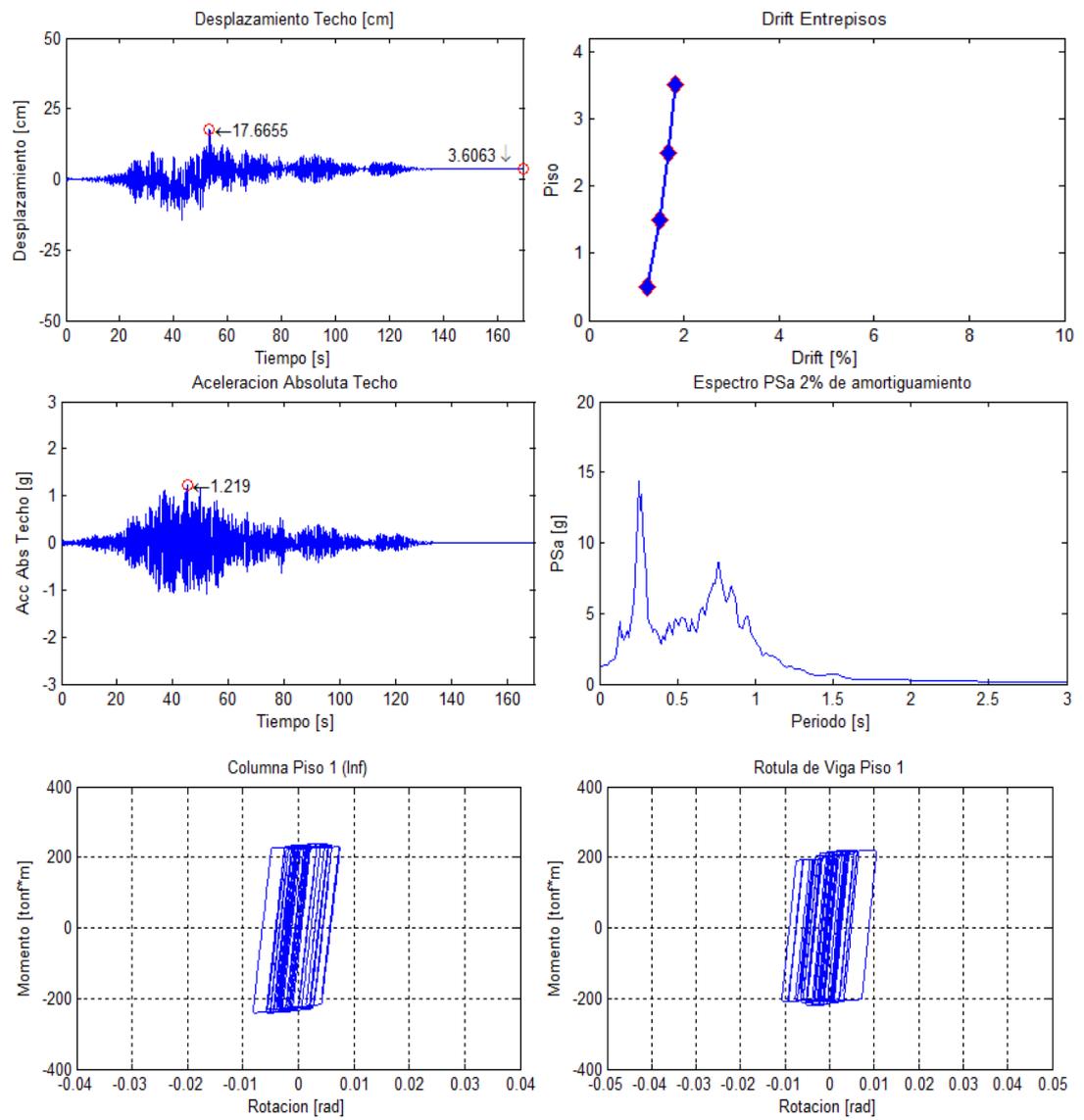


Figura 7-29: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula IKM

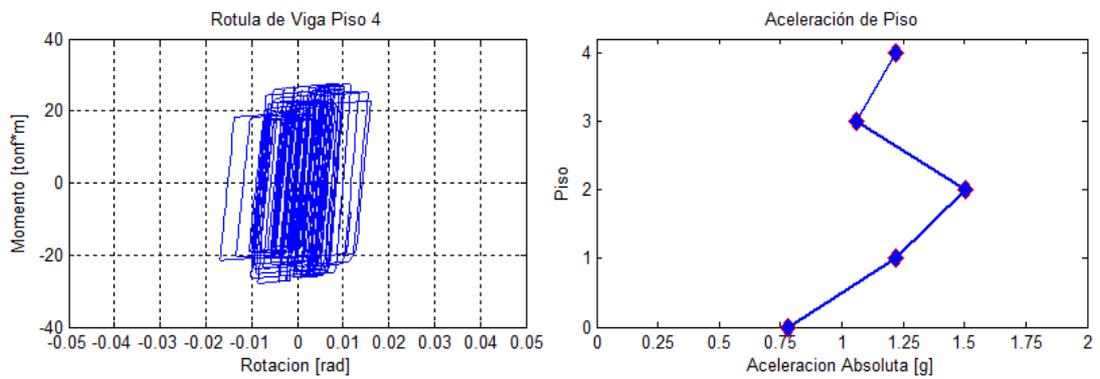


Figura 7-30: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula IKM

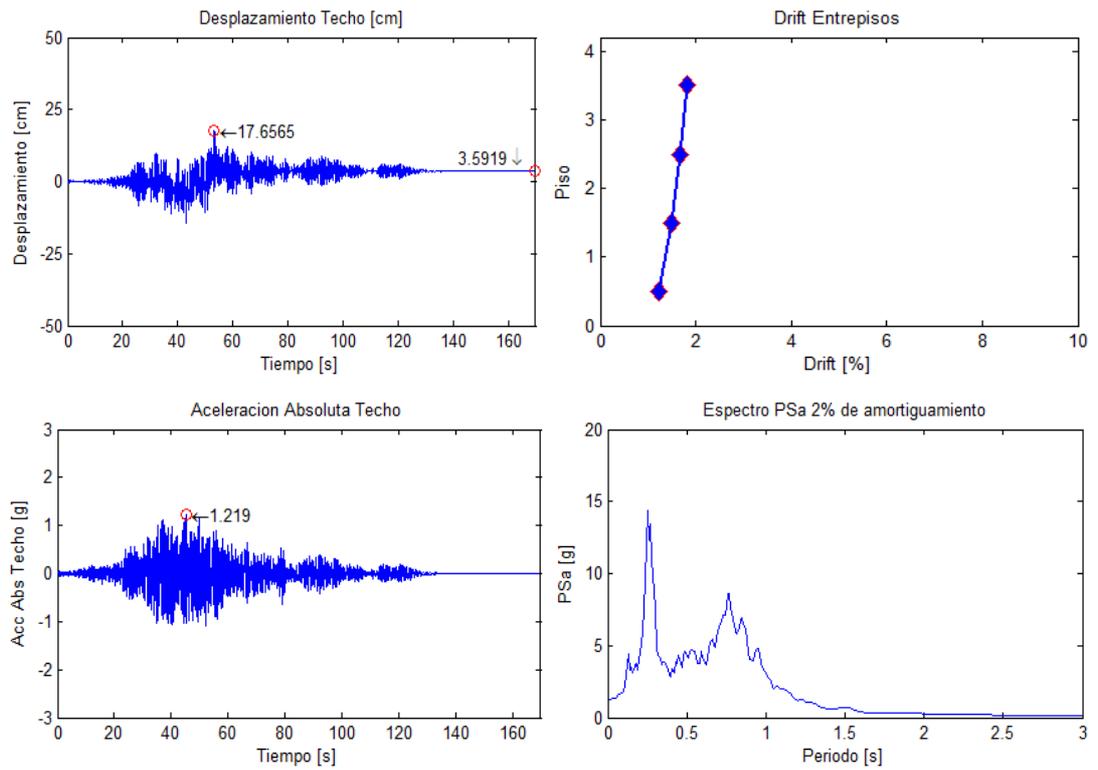


Figura 7-31: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula

IKM

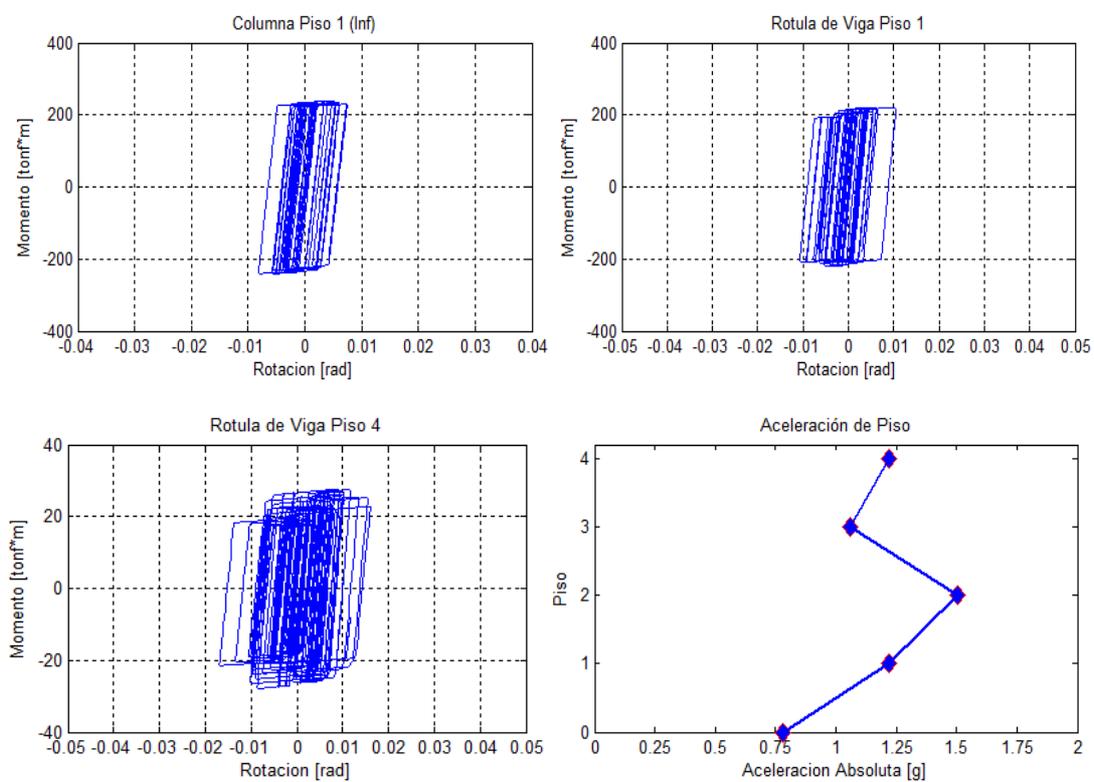


Figura 7-32: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula

IKM

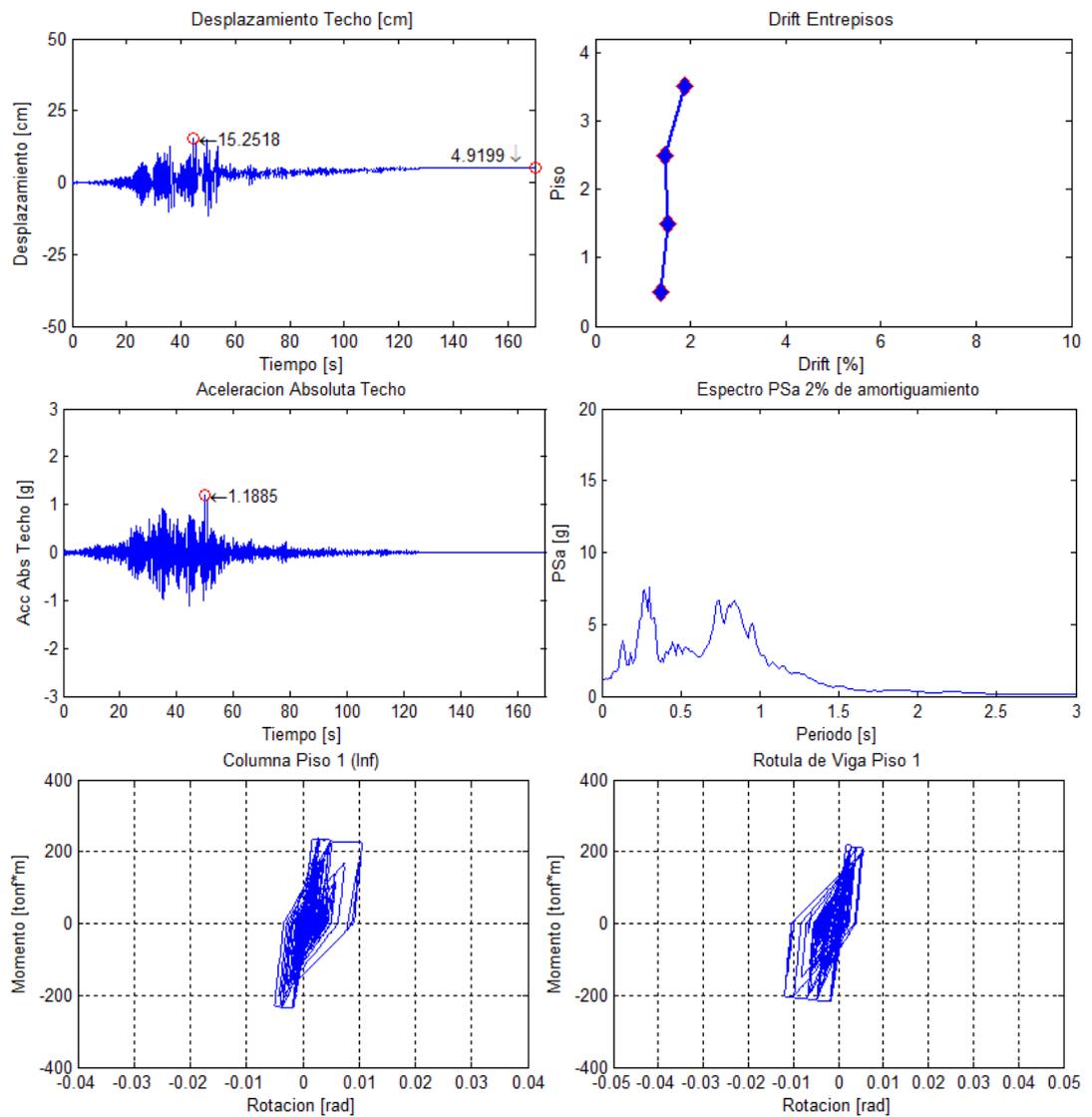


Figura 7-33: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula

ModIMKPO

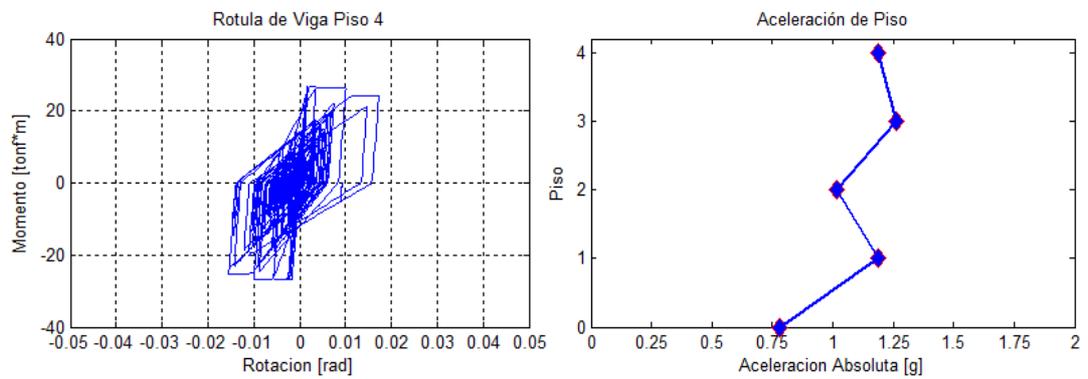


Figura 7-34: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez inicial. Rótula

ModIMKPO

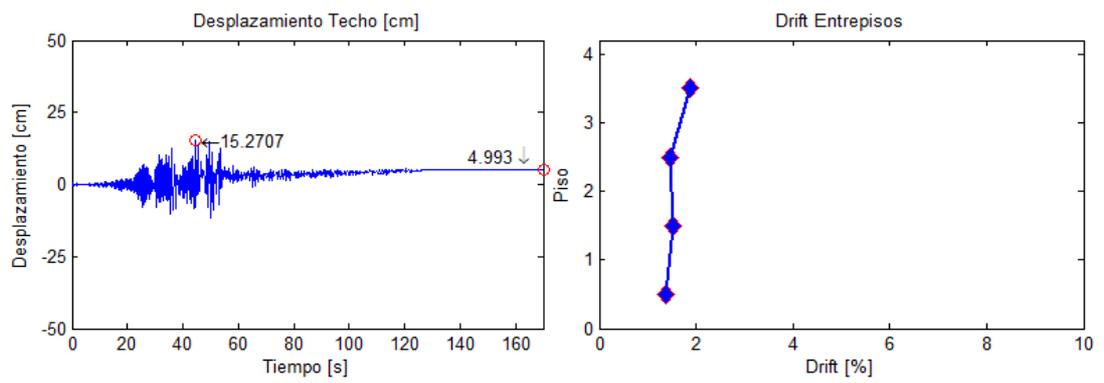


Figura 7-35: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula

ModIMKPO

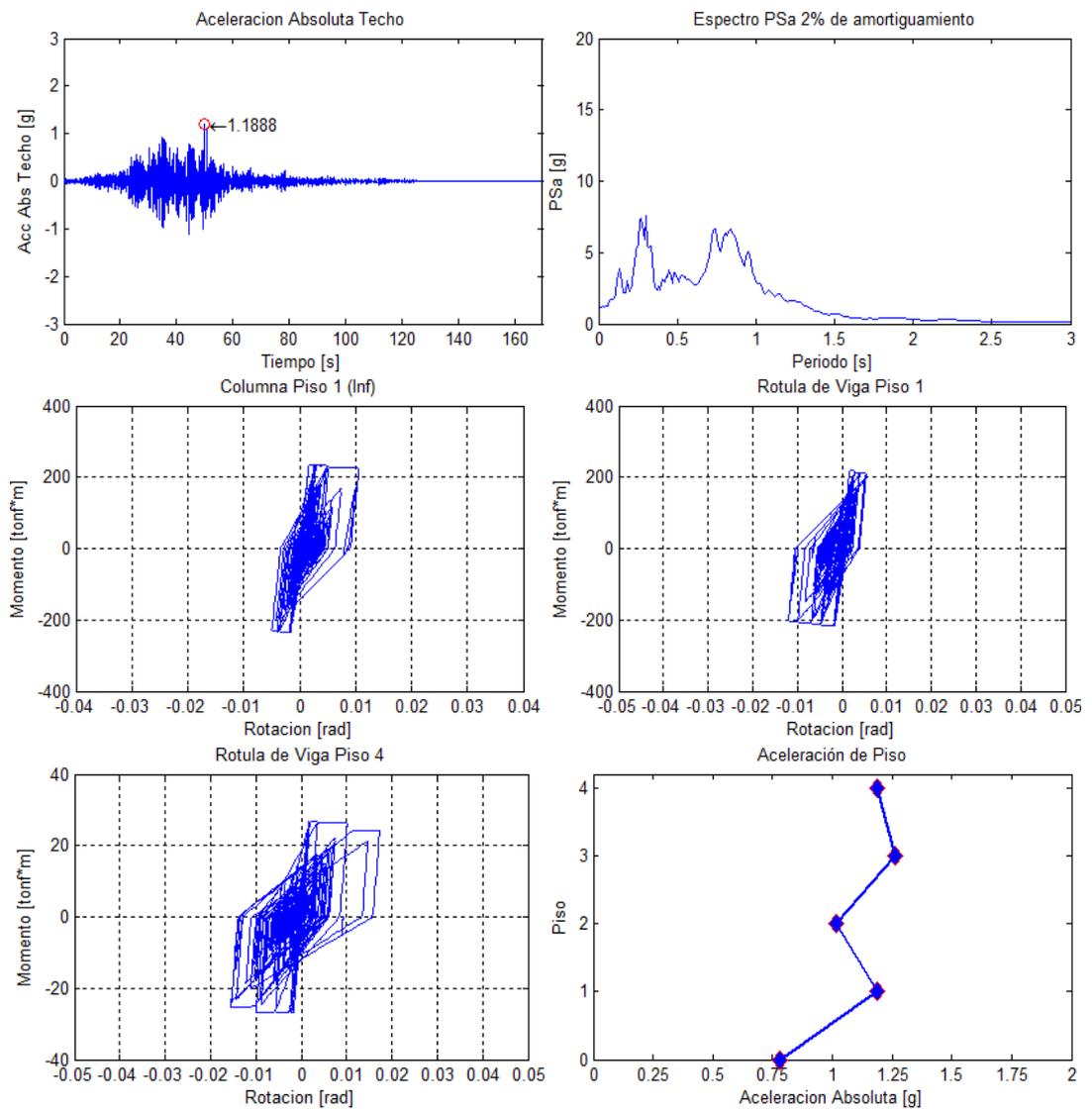


Figura 7-36: Respuestas con amortiguamiento proporcional a rigidez tangente. Rótula

ModIMKPO