



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

ANÁLISIS NO LINEAL DE UN MARCO DE HORMIGÓN ARMADO

DAVID ALEJANDRO RODRÍGUEZ LACAYO

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

Profesor Supervisor:
DIEGO LÓPEZ GARCÍA

Santiago de Chile, septiembre, 2011.

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS.....	iv
INDICE DE GRÁFICOS	vi
INDICE DE TABLAS	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT.....	x
I DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA	1
I.1 MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO	1
I.2 METODOLOGÍA DE ESTUDIO	13
II DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y DEL MODELO ANALÍTICO	16
II.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	16
II.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO ANALÍTICO	19
II.2.1 MATERIALES	19
II.2.2 ELEMENTOS ESTRUCTURALES	25
II.2.3 RELACIONES MOMENTO-CURVATURA.....	28
II.2.4 MASA, RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO	32
II.2.5 RÓTULAS A FLEXIÓN EN LAS VIGAS	37
II.2.6 RÓTULAS A FLEXO-COMPRESIÓN EN COLUMNAS	40
II.2.7 CARGAS DE GRAVEDAD Y CARGAS SÍSMICAS	43
II.2.8 COMBINACIONES DE CARGA.....	46
III DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS	49

III.1	DESPLAZAMIENTOS DE PISO	49
III.2	DESPLAZAMIENTOS DE TECHO	51
III.3	DRIFTS DE PISO	54
III.4	ACELERACIONES ABSOLUTAS DE PISO.....	56
III.5	RÓTULAS PLÁSTICAS	58
III.5.1	VIGAS	60
III.5.2	COLUMNAS	64
III.6	OTROS RESULTADOS	67
IV	CONCLUSIONES	71
VI.2	Anexo B: Verificación de curva de interacción (programa matlab).....	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura a analizar	2
Figura 2: Vigas.....	3
Figura 3: Columnas.....	4
Figura 4: Columnas.....	4
Figura 5: Columnas.....	4
Figura 6: Columnas.....	5
Figura 7: Registro tiempo-historia, Llolleo	14
Figura 8: Vigas.....	17
Figura 9: Columnas.....	17
Figura 10: Columnas.....	18
Figura 11: Columnas.....	18
Figura 12: Columnas.....	18
Figura 13: Definición del hormigón H30.....	19
Figura 14: Curva tensión-deformación del modelo de Mander no confinado para el hormigón..	21
Figura 15: Definición de acero A63-42H	22
Figura 16: Curva tensión-deformación para el acero.....	24
Figura 17: Definición de viga V-1	25
Figura 18: Definición de columna interior del primer piso	26
Figura 19: Gráfico momento – curvatura, viga V-1	29
Figura 20: Gráfico momento – curvatura, columna interior P-1	31
Figura 21: curva esfuerzo-deformación unitaria, histéresis Kinematic	37
Figura 22: curva esfuerzo-deformación unitaria, histéresis Takeda	38
Figura 23: Definición de rótula a flexión en la viga V-1	39
Figura 24: Definición de rótula a flexo-compresión, columna interior P-1.....	40
Figura 25: Definición de superficie de interacción.....	41
Figura 26: Definición de rótula a flexo-compresión, columna interior P-1.....	42
Figura 27: Carga muerta	43
Figura 28: Carga viva.....	44

Figura 29: Registro de aceleraciones, Llolleo.....	45
Figura 30: Caso de carga: Estático no-lineal	46
Figura 31: Caso de carga: Tiempo historia no-lineal, integración directa.....	47
Figura 32: Se define un amortiguamiento del 5% para la estructura.....	48
Figura 33: Rótulas plásticas.....	58
Figura 34: Resultados de Rótula.....	63
Figura 35: Historia de la flexo-compresión	64
Figura 36: Resultados de rótula (flexión)	66
Figura 37: Resultados de rótula, histéresis Kinematic.....	67
Figura 38: Resultados de rótula, histéresis Takeda.....	68
Figura 39: Verificación de resultados de rótula, histéresis Takeda	69
Figura 40: Verificación de resultados, histéresis Kinematic	70

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Comparación entre el desplazamiento de piso obtenido en SAP2000 v11.0 y LARZD (Rosada y Altamirano).....	5
Gráfico 2: Comparación entre los drifts de piso obtenidos en SAP2000 v11.0 y LARZD (Rosada y Altamirano).....	6
Gráfico 3: Historia del desplazamiento de techo LARZD (Rosada y Altamirano).....	7
Gráfico 4: Historia del desplazamiento de techo SAP2000 v11.0 (Rosada y Altamirano).....	8
Gráfico 5: Historia del momento en la viga V-2 del nivel 6, LARZD (Rosada y Altamirano).....	8
Gráfico 6: Historia del momento en la viga V-2 del nivel 6, SAP2000 v11.0 (Rosada y Altamirano).....	9
Gráfico 7: Historia del momento en la columna interior del nivel 1, LARD (Rosada y Altamirano).....	10
Gráfico 8: Historia del momento en la columna interior del nivel 1, SAP2000 v11.0 (Rosada y Altamirano).....	11
Gráfico 9: Espectro de respuesta según NCh 433.....	36
Gráfico 10: Desplazamiento máximos absolutos de piso	49
Gráfico 11: Comparación del desplazamiento de piso	50
Gráfico 12: Historia del desplazamiento de techo	51
Gráfico 13: Historia del desplazamiento de techo SAP2000 v14.2.4.....	51
Gráfico 14: Historia del desplazamiento de techo, LARZD (Rosada y Altamirano)	52
Gráfico 15: Historia del desplazamiento de techo, SAP2000 v11.0 (Rosada y Altamirano)	52
Gráfico 16: Drifts de piso	54
Gráfico 17: Comparación del Drifts de piso	55
Gráfico 18: Aceleración absoluta máxima por piso.....	56
Gráfico 19: historia del momento en el tiempo, viga (elemento 53)	60
Gráfico 20: Historia del momento, viga V-2 piso 6.....	61
Gráfico 21: Historia del momento, LARZD (Rosada y Altamirano)	61
Gráfico 22: Historia del momento, SAP2000 v11.0 (Rosada y Altamirano)	62
Gráfico 23: Flexo-Compresión en columna exterior P1	65

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación entre el desplazamiento de piso obtenido en SAP2000 v11.0 y LARZD (Rosada y Altamirano).....	6
Tabla 2: Comparación entre los drifts de piso obtenidos en SAP2000 v11.0 y LARZD (Rosada y Altamirano).....	7
Tabla 3: Datos de momento-curvatura para la viga V-2 (Rosada y Altamirano)	10
Tabla 4: Datos de momento-curvatura para la columna interior P-1 (Rosada y Altamirano)	11
Tabla 5: Vigas	27
Tabla 6: Columnas	27
Tabla 7: Comparación Momento nominal, vigas.....	28
Tabla 8: Comparación Momento nominal, columnas.....	30
Tabla 9: Peso de columnas.....	32
Tabla 10: Peso de vigas.....	32
Tabla 11: Peso sísmico de la estructura	33
Tabla 12: Reducción de rigidez aplicada a las vigas	34
Tabla 13: Reducción de rigidez aplicada a las columnas	34
Tabla 15: Desplazamientos máximos absolutos por piso	50
Tabla 16: Drifts de piso.....	54
Tabla 17: Aceleración Absoluta Máxima por piso	56

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas a las que les debo parte de este triunfo, de lograr alcanzar mi culminación académica de este magíster, que he anhelado desde el momento en que comencé.

Definitivamente, Dios es el primero, mi gran guía, proveedor y mi fin último; este logro es resultado de su gran misericordia y amor, sin su Espíritu Santo no hubiera sido posible.

A mis padres y hermanos porque siempre me dieron la motivación e inspiración para querer siempre ser mejor, y buscar metas como la que estoy alcanzando ahora.

A mi familia, que a pesar de tenerlos lejos me apoyaron en todo momento.

A las comunidades del camino neocatecumenal, tanto la de Honduras como la de Chile, que fueron parte importante en el desarrollo de este nuevo logro, acompañándome con sus oraciones.

A mi profesor guía, Diego López García, por compartir toda su experiencia y conocimiento para que este trabajo fuera posible, además de su dedicación, esmero, paciencia y tiempo.

A todos los profesores del magíster de los cuales aprendí mucho y me aportaron no sólo conocimiento académico sino que también personal.

A todos mis amigos y compañeros de trabajo, que colaboraron conmigo con sus consejos y recomendaciones para que nunca perdiera de vista el objetivo de culminar el magister.

RESUMEN

El objeto principal del presente estudio es realizar una comparación entre los resultados que se obtienen de un análisis no lineal, a un marco interior de un edificio de ocho pisos, usando SAP2000 v14.2.4, y los que obtuvieron Mario Rosada y Sergio Altamirano utilizando SAP2000 v11.0 y LARZD.

El modelo SAP se define haciendo uso de las mismas secciones utilizadas por Rosada y Altamirano en su trabajo, adoptando diferentes criterios para la modelación y definición de los elementos, siendo el más importante el uso del Section Designer para la obtención de los valores de momento nominal y curvatura para cada sección; valores que se utilizaron para la definición de las rótulas plásticas a flexión (vigas) y a flexo-compresión (columnas).

El análisis no lineal se basa en una función tiempo – historia, para lo cual se usa el registro de aceleraciones de Llolleo, lo que permite introducir a la estructura las cargas sísmicas correspondientes.

Los resultados que se obtuvieron cumplieron con las expectativas, ya que las deformaciones de piso, drifts y desplazamiento de techo fueron muy parecidos a los que presentan Rosada y Altamirano en su trabajo usando LARZD.

Las rótulas plásticas que se definieron para todas las secciones se comportaron de la manera esperada, dado que los valores obtenidos están dentro de los rangos definidos tanto para flexión como para flexo-compresión, lo que permite argumentar que la modelación que se presenta en este estudio es educada.

ABSTRACT

The aim of this study was to compare the results of a non-linear analysis of a 2D structure from an eight level building, using SAP2000 v14.2.4 with the results that Mario Rosada and Sergio Altamirano obtained using SAP2000 v11.0 and LARZD.

The SAP model is defined using the same sections used by Rosada and Altamirano in their work, adopting different criteria to the modelation and definition of the elements. The most important criteria was the use of the Section Designer to obtain the values that correspond to the nominal moment and curvature. This values were used to define the flexion (beams) and flexo-compression (columns) plastic hinges.

The non-linear analysis is based on a time – history function, using the Llolleo's acceleration record , which allows the seismic loads to be induced in the structure.

The results were positive sincethe floor deformation, drifts, and floor displacements were very similar to the Rosada and Altamirano's presented in their work using LARZD.

The plastic hinges defined for all the sections behaved as expected because the obtained values were within the defined range for as well as for flexo-compression. This allows us to state that the presented modelation is appropriate.

I DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA

I.1 MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

El propósito del presente estudio es comparar los resultados de un análisis tiempo historia no-lineal de un marco 2D compuesto por columnas y vigas de hormigón armado (el cual se describirá en detalle más adelante) con los resultados obtenidos por Mario Rosada y Sergio Altamirano en el curso IEG 4040 Seminario de Ingeniería Estructural y Geotécnica IV (año 2008) de un análisis tiempo historia no-lineal del mismo marco.

Se describe a continuación el marco que es objeto de estudio, el cual se presenta en la figura 1, para lo cual se toma como referencia el trabajo realizado por Mario Rosada y Sergio Altamirano, el cual tenía como finalidad la comparación entre los resultados de un análisis no-lineal del marco que se estudiará en el presente trabajo usando el programa SAP2000 v11.0 y el programa LARZD.

El marco fue diseñado de acuerdo a las siguientes especificaciones:

Materiales

- Hormigón: H30-90%
- Acero: A63-42H

Carga permanente en losa

- Niveles 1-7: 150 kgf/m²
- Nivel 8: 50 kgf/m²

Sobre-carga en losa

- Niveles 1-7: 250 kgf/m²
- Nivel 8: 100 kgf/m²

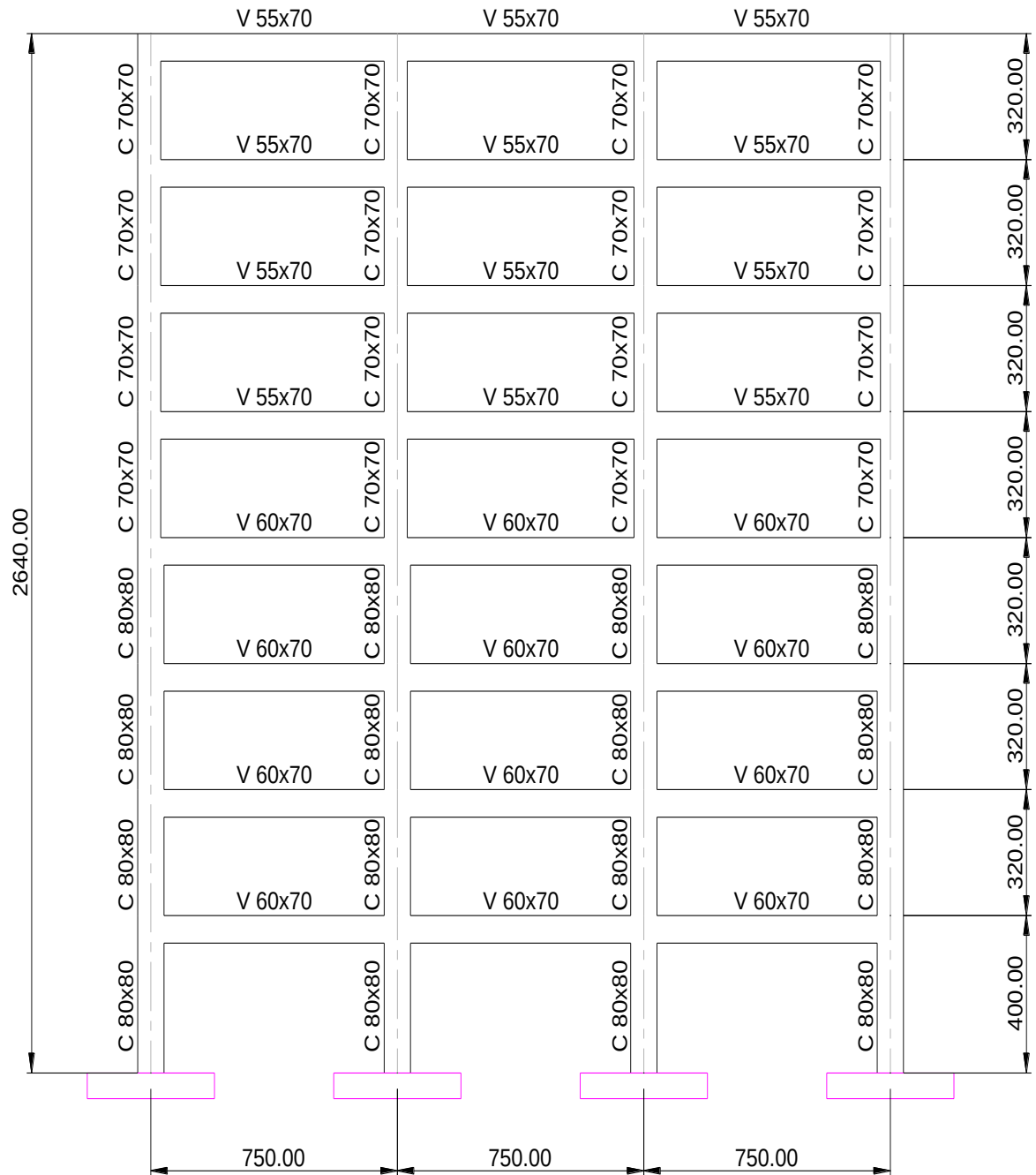


Figura 1: Estructura a analizar

Parámetros de la zona

- Zona sísmica: 3 (Llolleo)
- Tipo de suelo: III

Combinaciones de carga

- $1.4 D + 1.7 L$
- $1.4 D + 1.4 L \pm 1.4 S$
- $0.9 D \pm 1.4 S$

donde:

D = carga muerta (cargas permanentes)

L = carga viva (sobrecargas de uso)

S = Acción sísmica en el sentido del plano

Haciendo uso del análisis modal espectral que se especifica en la NCh-433 y las demás normas vigentes el diseño resultó en las secciones que se describen en las figuras que se presentan a continuación:

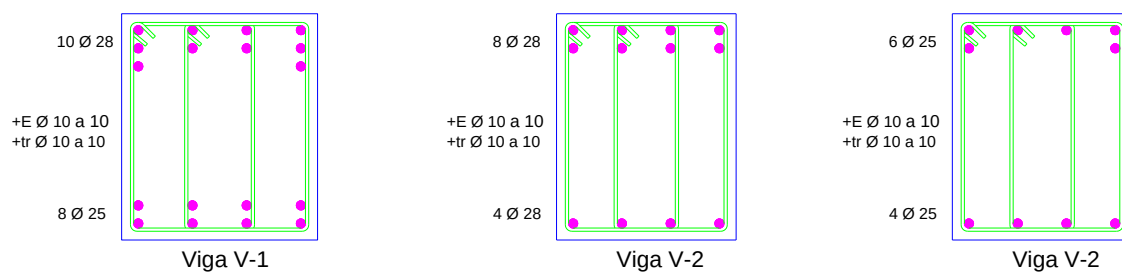


Figura 2: Vigas

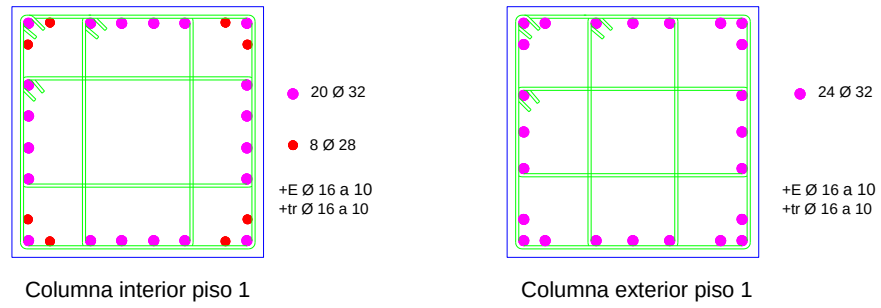


Figura 3: Columnas

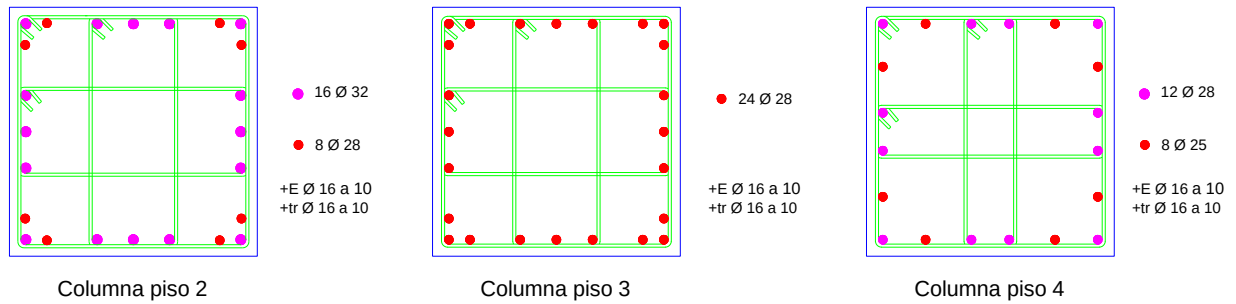


Figura 4: Columnas

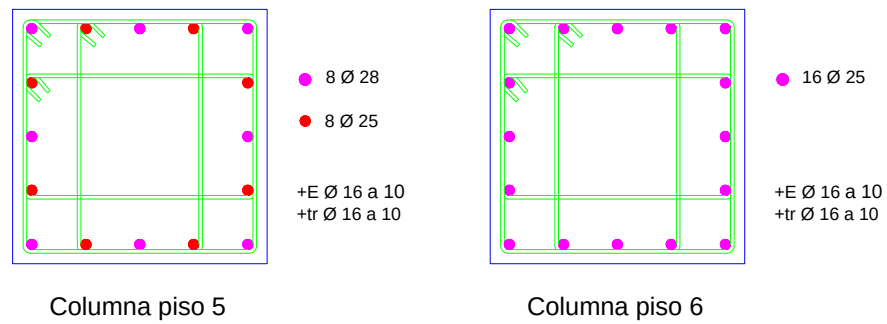


Figura 5: Columnas

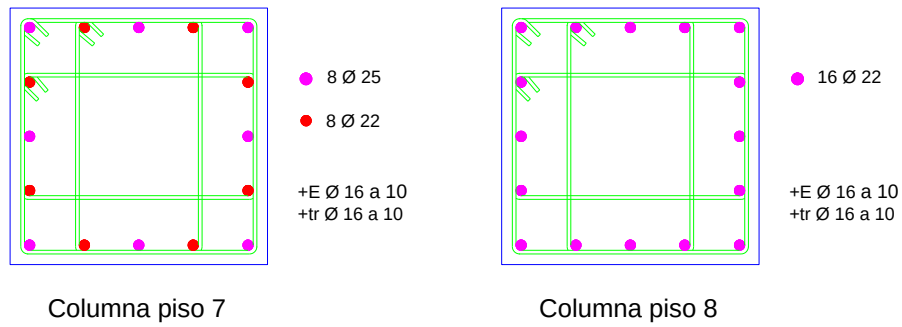


Figura 6: Columnas

Se presentan entonces los resultados de los análisis realizados por Rosada y Altamirano usando los programas LARZD y SAP2000 v11.0.

Desplazamientos de piso:

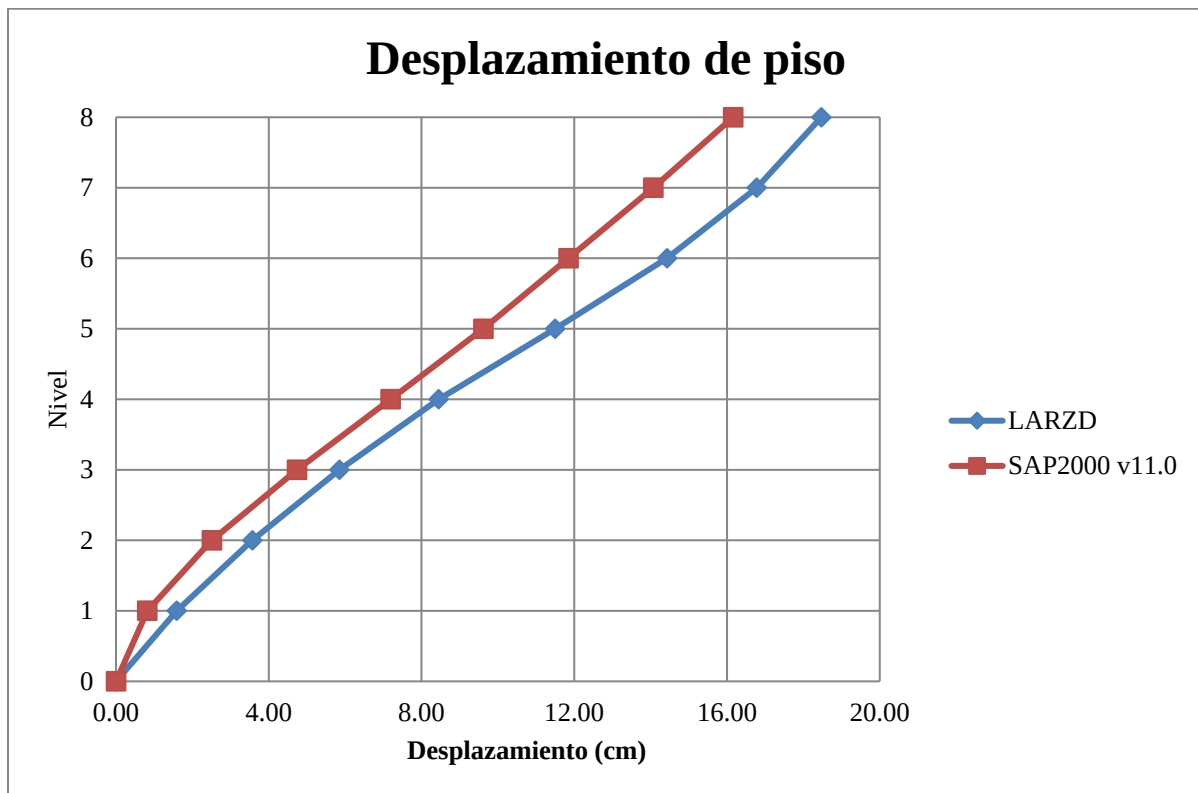


Gráfico 1: Comparación entre el desplazamiento de piso obtenido en SAP2000 v11.0 y LARZD

(Rosada y Altamirano)

Tabla 1: Comparación entre el desplazamiento de piso obtenido en SAP2000 v11.0 y LARZD

(Rosada y Altamirano)

Nivel	Desplazamiento de piso		
	LARZD (cm)	SAP v11.0 (cm)	<u>SAP</u> LARZD
1	1.59	0.82	0.52
2	3.57	2.51	0.70
3	5.85	4.74	0.81
4	8.45	7.19	0.85
5	11.50	9.62	0.84
6	14.43	11.85	0.82
7	16.78	14.07	0.84
8	18.47	16.16	0.87

Drifts de piso máximos:

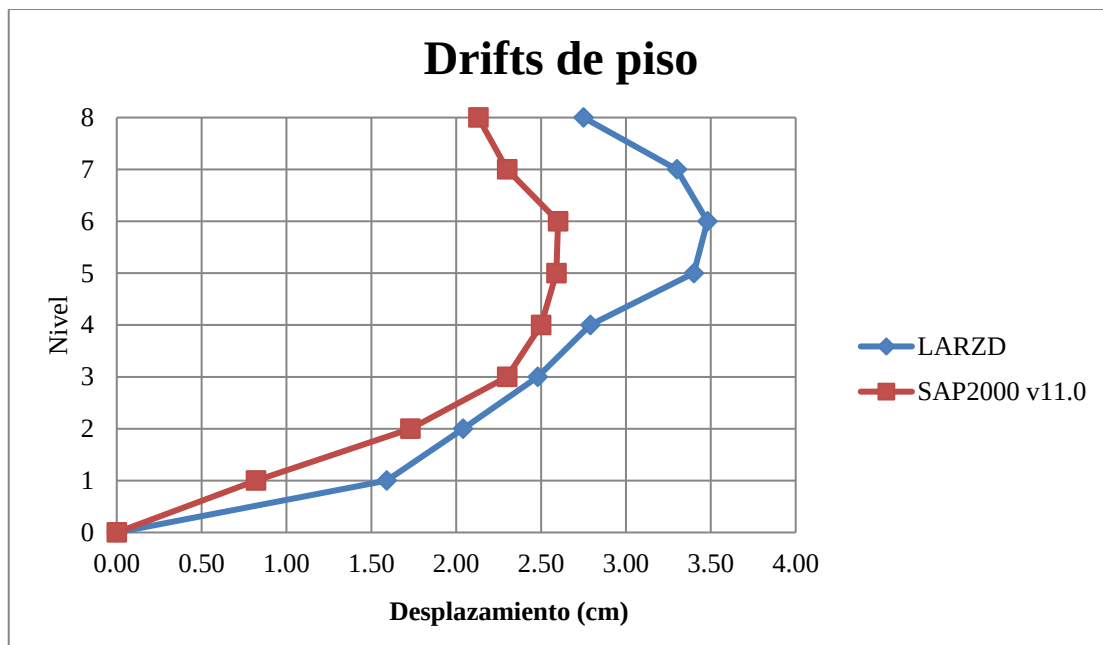


Gráfico 2: Comparación entre los drifts de piso obtenidos en SAP2000 v11.0 y LARZD (Rosada y Altamirano)

Tabla 2: Comparación entre los drifts de piso obtenidos en SAP2000 v11.0 y LARZD (Rosada y Altamirano)

Drifts de piso			
Nivel	LARZD (cm)	SAP v11.0 (cm)	<u>SAP</u> LARZD
1	1.59	0.82	0.52
2	2.04	1.73	0.85
3	2.48	2.30	0.93
4	2.79	2.50	0.90
5	3.40	2.59	0.76
6	3.48	2.60	0.75
7	3.30	2.30	0.70
8	2.75	2.13	0.77

Historia del desplazamiento de techo:

Historia de desplazamientos de techo - LARZD

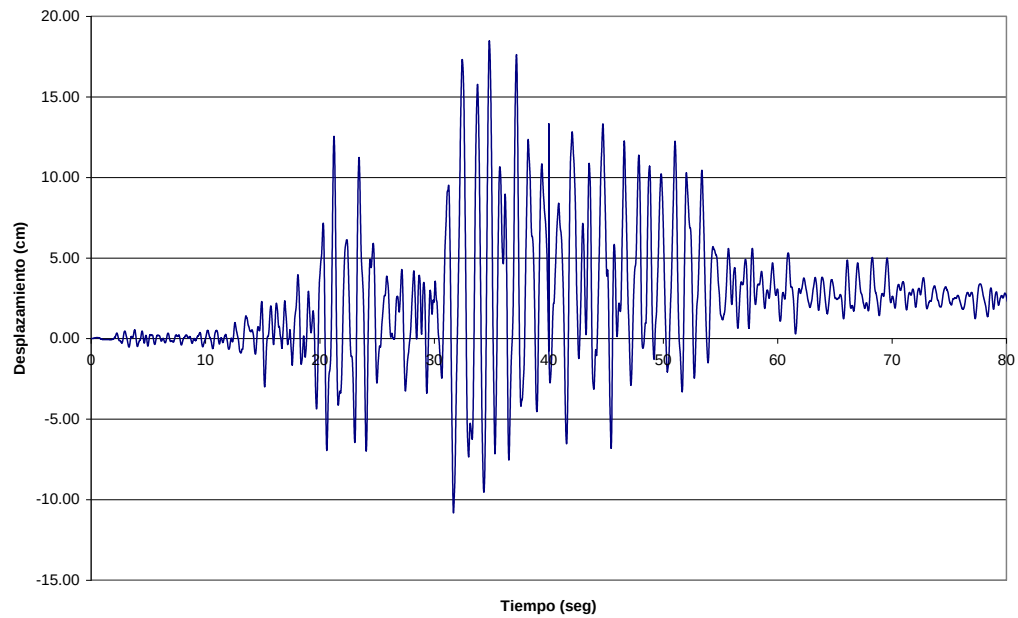


Gráfico 3: Historia del desplazamiento de techo LARZD (Rosada y Altamirano)

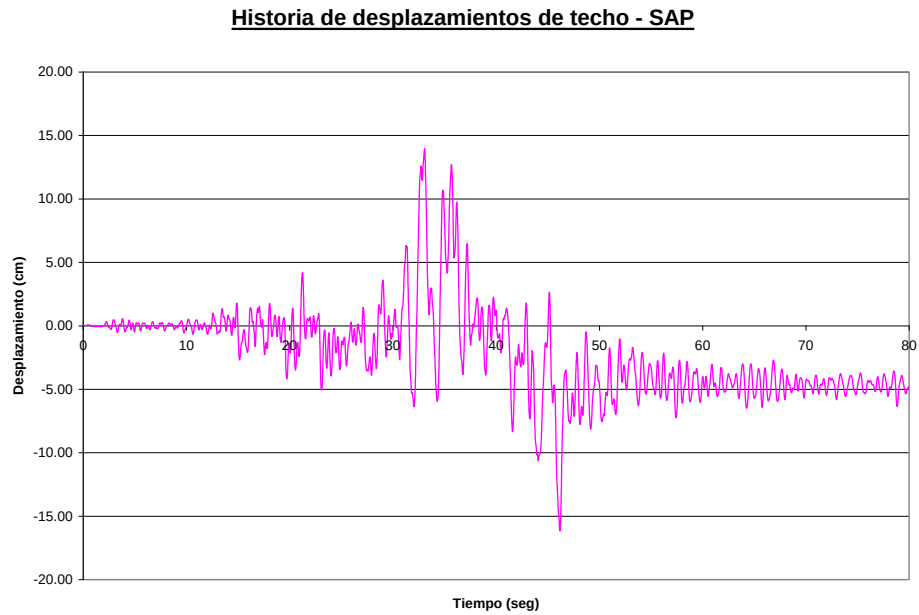


Gráfico 4: Historia del desplazamiento de techo SAP2000 v11.0 (Rosada y Altamirano)

Historia del momento flexor en la viga V-2 del nivel 6:

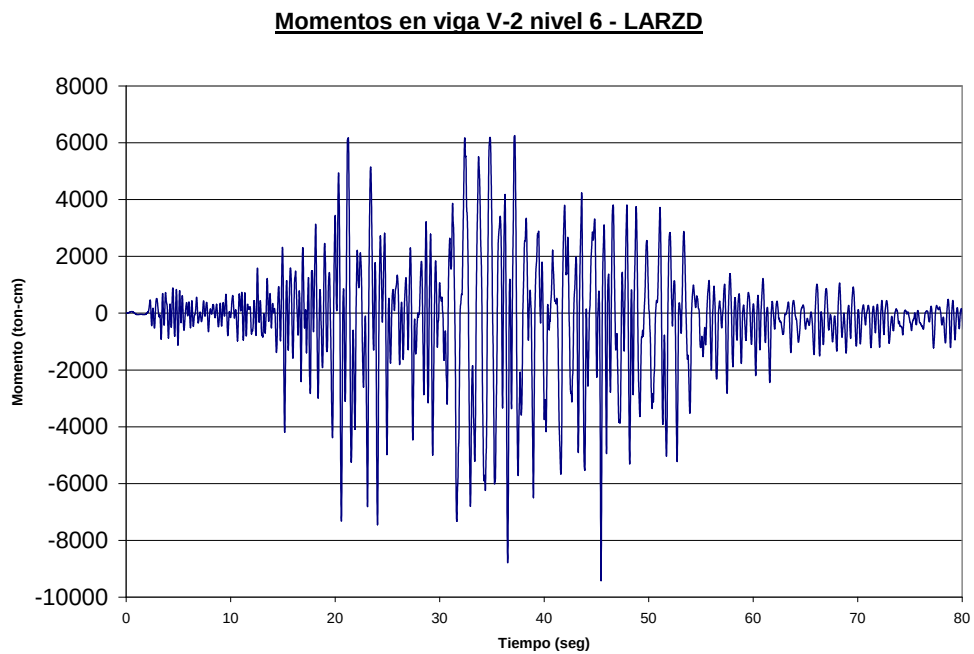


Gráfico 5: Historia del momento en la viga V-2 del nivel 6, LARZD (Rosada y Altamirano)

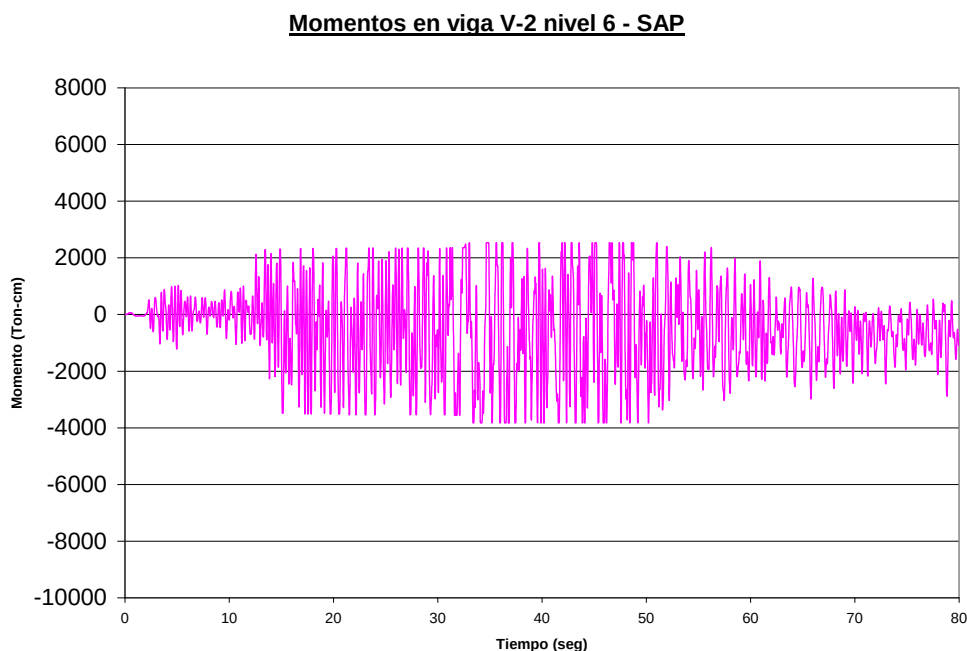


Gráfico 6: Historia del momento en la viga V-2 del nivel 6, SAP2000 v11.0 (Rosada y Altamirano)

La tabla 3 contiene los datos correspondientes a los momentos y curvaturas de rotura, fluencia y últimos para la viga V-2. En el gráfico 5 se puede apreciar que en LARZD la viga alcanza momentos máximos cercanos a 6000 y -9500 tonf-cm. Dado que los momentos de fluencia son iguales a 6084 y -10113 tonf-cm, podría haberse alcanzado plastificación en el lado positivo, mas no así en el negativo.

En SAP (figura 6) se observa claramente plastificación a poco más de 2000 y cerca de -4000 tonf-cm, valores mucho menores a los de fluencia del elemento. Tal y como se observa en el gráfico 6, la plastificación en SAP se observa cerca de los 13 segundos, lo que podría interpretarse como la principal causa de la diferencia en los resultados obtenidos, respaldando la hipótesis de plastificación prematura en SAP.

Tabla 3: Datos de momento-curvatura para la viga V-2 (Rosada y Altamirano)

Viga V-2	Positivo		Negativo	
	M (tonf-cm)	ϕ $\times 10^{-5}$	M (tonf-cm)	ϕ $\times 10^{-5}$
Primera rotura (cr)	1406	0.01	1406	0.01
Fluencia (y)	6084	4.32	10113	4.84
Resistencia última (U)	9414	186.89	15080	126.26

Historia del momento en las columnas:

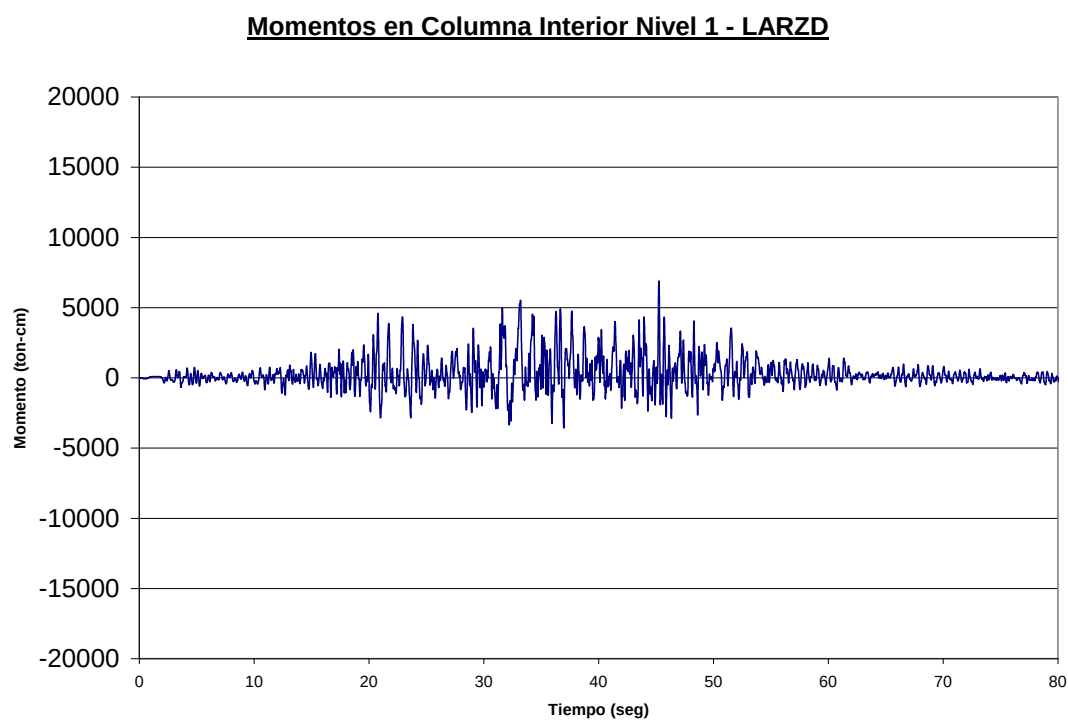


Gráfico 7: Historia del momento en la columna interior del nivel 1, LARD (Rosada y Altamirano)

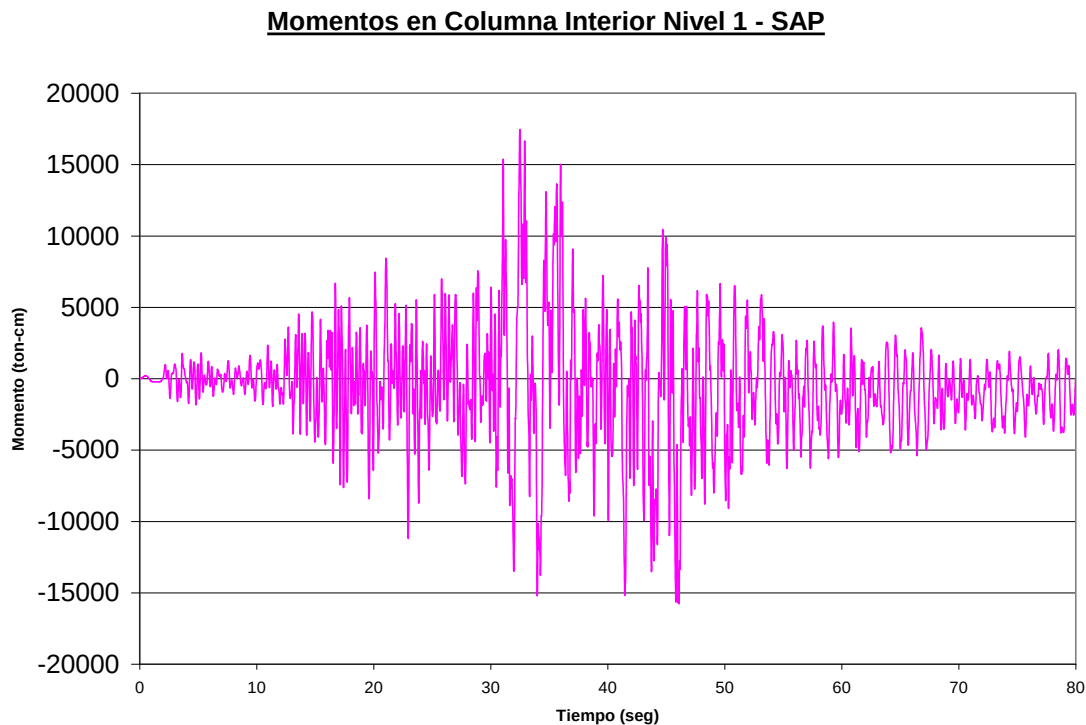


Gráfico 8: Historia del momento en la columna interior del nivel 1, SAP2000 v11.0 (Rosada y Altamirano)

El análisis en SAP indica momentos en una columna del primer piso (gráfico 8) mayores a los indicados por LARZD, probablemente debidos a que la plastificación prematura de las vigas incrementó la demanda en las columnas. Sin embargo, los valores máximos obtenidos tanto en LARZ (6500 tonf-cm) como en SAP (17000 tonf-cm) son menores al valor de fluencia de la columna (27500 tonf-cm, tabla 4). Por lo tanto, en ninguno de los casos se llegó a la plastificación.

Tabla 4: Datos de momento-curvatura para la columna interior P-1 (Rosada y Altamirano)

Columna interior P-1	M (tonf-cm)	ϕ $\times 10^{-5}$
Primera rotura (cr)	1406	0.01
Fluencia (y)	6084	4.32
Resistencia última (U)	9414	186.89

Se observa que los resultados obtenidos por Rosada y Altamirano con los dos programas mencionados son muy diferentes entre sí, discrepancia que a pesar de ser muy importante no fue investigada en profundidad. Surge así la mayor motivación para el presente estudio: realizar un análisis no-lineal del marco considerado por Rosada y Altamirano teniendo en cuenta una de las recomendaciones planteadas en su trabajo para el correcto modelamiento de la estructura en SAP2000, i.e., utilizar el módulo “Section Designer” con que cuenta SAP2000 con el objeto de alcanzar resultados más cercanos a lo que podría ser el comportamiento real de la estructura.

I.2 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

A continuación se presenta una breve descripción de la metodología empleada para el análisis no-lineal propuesto en el presente estudio:

- Definición de la estructura:

Se define la geometría de la estructura en la cual se trabajará, la cual será un marco de tres vanos y ocho pisos compuesto por vigas y columnas de hormigón armado. La distancia entre cada vano es de 7.50 m, y la altura de entre piso es de 3.20 m, exceptuando el primer piso que es de 4.00 m.

Las losas del edificio tienen un espesor de 15 cm y se consideran a una separación de 7.50 m. entre apoyos.

- Definición de materiales:

Se definen los materiales a utilizar:

Hormigón H30, el cual tiene una resistencia a la compresión de 250 kgf/cm^2 .

Acero de refuerzo A63-42H, para el que se tiene una tensión de fluencia de 4200 kgf/cm^2 , y una tensión de rotura de 6300 kgf/cm^2 .

- Definición de elementos:

Se definen los frames (vigas y columnas) correspondientes a cada piso según el diseño que se efectuó por parte de Rosada y Altamirano para este marco, cabe mencionar que el diseño fue realizado como proyecto en el curso IEG 3210 Taller de Diseño de Hormigón Armado (2007).

- Definición de carga:

Se toma en cuenta la carga viva y muerta que actúa en la estructura mediante una descarga estática manual (en una dirección) de las losas sobre las vigas, dando como resultado una carga lineal distribuida sobre cada viga en cada piso.

- Definición de las propiedades no-lineales:

Se definen las rótulas plásticas para cada uno de los elementos estructurales a utilizar. Para esto se utiliza una de las aplicaciones que presenta el Section Designer de SAP2000 mediante la cual se pueden obtener directamente del programa los valores de momento-curvatura (idealizado según el modelo de Caltrans) para cada una de las secciones propuestas. Usando estos valores se definen las rótulas a flexión para las vigas y de flexo-compresión para las columnas.

Se harán tres modelos diferentes; en cada uno se implementarán rótulas a flexión usando tres de las histéresis disponibles en SAP2000: isotropic, kinematic y Takeda; lo anterior con el afán de comprar los resultados obtenidos para cada uno.

- Definición del acelerograma:

Se define el registro tiempo-historia de Llolleo que se considerará para el presente estudio, cuya duración es 122.31 segundos (figura 7).

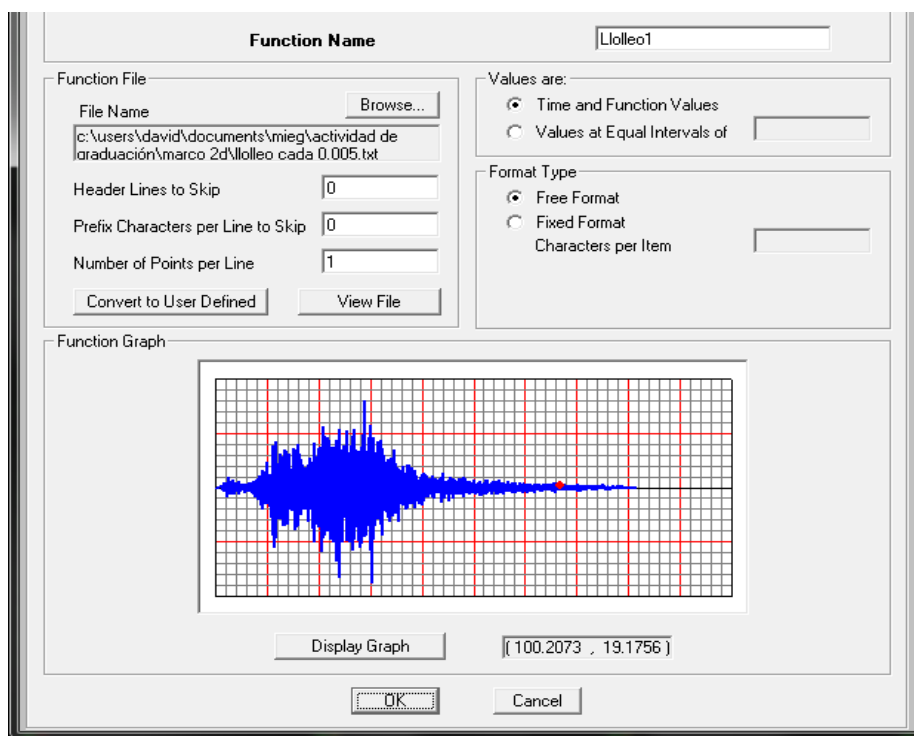


Figura 7: Registro tiempo-historia, Llolleo

- Definición de casos de carga:

Se definen los casos de carga no-lineales. Se define un caso de carga estático no-lineal para la acción de la carga muerta y viva sobre el marco, en el que se especifica el 25% de la carga viva para el peso sísmico de la estructura.

- Análisis de resultados:

Se hace un análisis comparativo del desplazamiento de techo, deformaciones de entrepiso y aceleración absoluta para cada una de las histéresis propuestas; y éstos a su vez son comparados con los resultados obtenidos por Rosada y Altamirano.

II DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y DEL MODELO ANALÍTICO

II.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La estructura a analizar se define de acuerdo a lo propuesto por Rosada y Altamirano, para el cual se tiene lo siguiente:

Materiales

- Hormigón: H30-90%
- Acero: A63-42H

Carga permanente en losa

- Niveles 1-7: 150 kgf/m²
- Nivel 8: 50 kgf/m²

Sobre-carga en losa

- Niveles 1-7: 250 kgf/m²
- Nivel 8: 100 kgf/m²

Parámetros de la zona

- Zona sísmica: 3 (Llolleo)
- Tipo de suelo: III

Combinaciones de carga

- 1.4 D + 1.7 L
- 1.4 D + 1.4 L ± 1.4 S
- 0.9 D ± 1.4 S

donde:

D = carga muerta (cargas permanentes)

L = carga viva (sobrecargas de uso)

S = Acción sísmica en el sentido del plano

En las figuras que se muestran a continuación se presentan las secciones que se obtuvieron como resultado del diseño que Rosada y Altamirano realizaron. Para el análisis del presente estudio se toman las secciones propuestas por ellos.

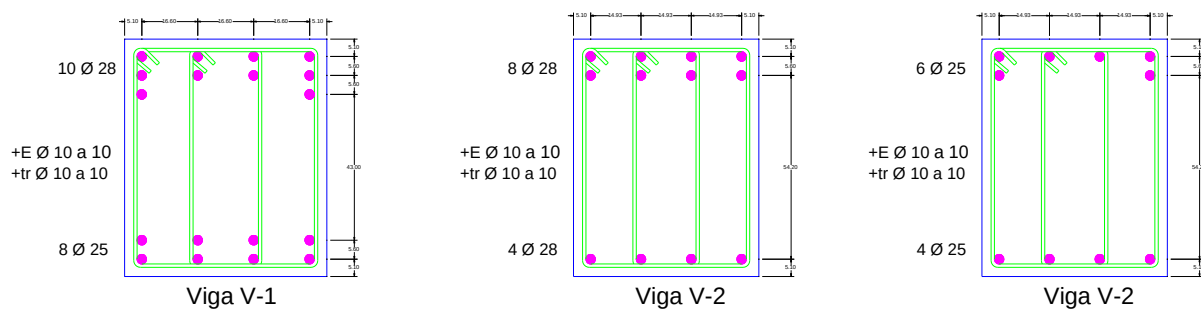


Figura 8: Vigas

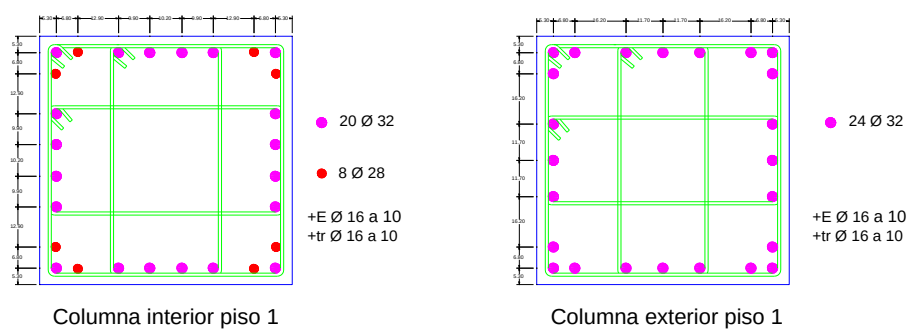


Figura 9: Columnas

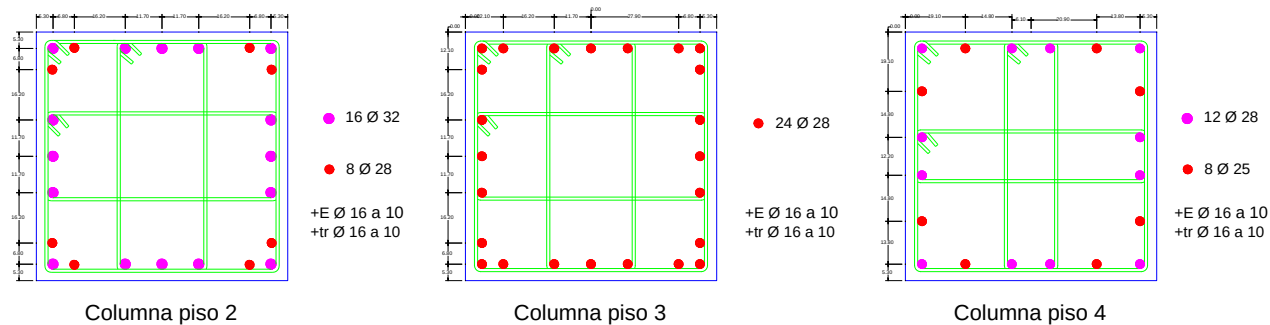


Figura 10: Columnas

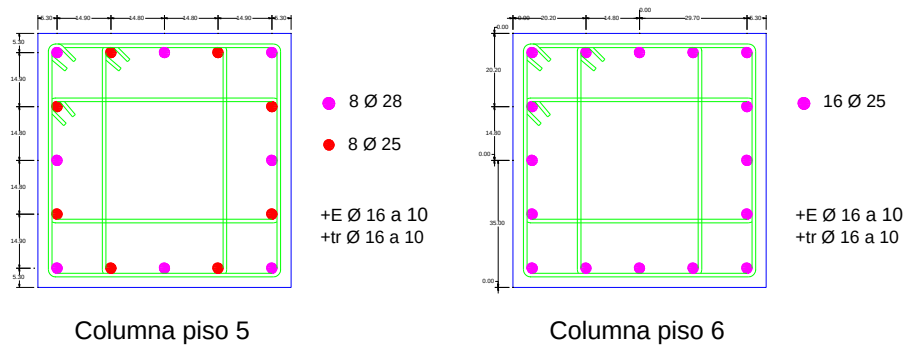


Figura 11: Columnas

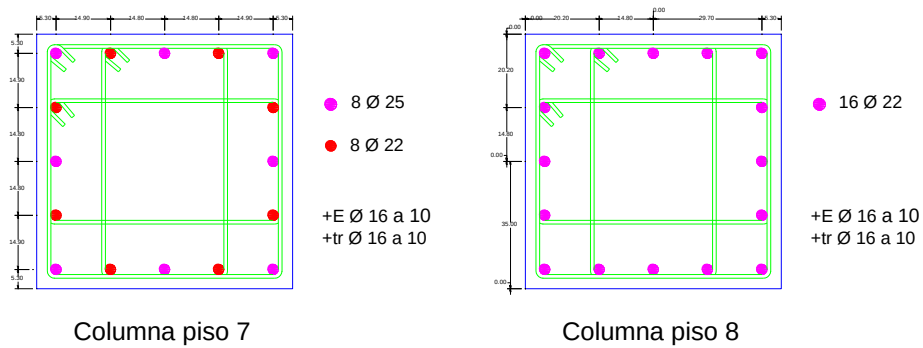


Figura 12: Columnas

II.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO ANALÍTICO

Para el presente estudio se presenta una descripción de los pasos que se siguieron para la modelación del marco antes descrito mediante el uso del programa SAP2000 v14.2.4. Se hará un especial énfasis en la definición y asignación de las propiedades no-lineales de cada uno de los elementos que forman el marco, así como de los casos de carga que se derivan de la aplicación del registro tiempo-historia de Llolleo.

Para todos los parámetros que se presentan en la modelación se usan unidades de kgf y m.

II.2.1 MATERIALES

Hormigón H30:

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box for material 'H30'. The dialog is organized into several sections:

- General Data:**
 - Material Name and Display Color: H30 (with a blue color swatch)
 - Material Type: Concrete (dropdown menu)
 - Material Notes: Modify/Show Notes...
- Weight and Mass:**
 - Weight per Unit Volume: 2500.
 - Mass per Unit Volume: 254.929
- Units:**
 - Units: Kgf, m, C (dropdown menu)
- Isotropic Property Data:**
 - Modulus of Elasticity, E: 2.388E+09
 - Poisson's Ratio, U: 0.2
 - Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.170E-05
 - Shear Modulus, G: 9.950E+08
- Other Properties for Concrete Materials:**
 - Specified Concrete Compressive Strength, f'c: 2500000.
 - ☐ Lightweight Concrete
 - Shear Strength Reduction Factor: (empty field)

Figura 13: Definición del hormigón H30

Es de hacer notar que para las propiedades elásticas e inelásticas del hormigón el Section Designer de SAP da la opción de considerar el modelo de Mander confinado o no confinado; para efectos del presente estudio se toma el modelo de Mander no confinado para el hormigón (Mander et al., 1984).

Se describe a continuación el modelo para el hormigón no confinado que es el que se definirá en todas las secciones del presente estudio.

La porción curva se define para $\varepsilon \leq 2\varepsilon'_c$:

$$f = \frac{f'_c x r}{r-1+x^r} \quad (2.1)$$

Para la porción lineal de la curva $2\varepsilon'_c < \varepsilon \leq \varepsilon_u$:

$$f = \left(\frac{2f'_c r}{r-1+2^r} \right) \left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon}{\varepsilon_u - 2\varepsilon'_c} \right) \quad (2.2)$$

donde:

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon'_c} \quad (2.3)$$

$$r = \frac{E}{R - \left(\frac{f'_c}{\varepsilon'_c} \right)} \quad (2.4)$$

ε = Deformación unitaria del hormigón

f = Tensión en el hormigón

E = Módulo de elasticidad del hormigón

f'_c = Resistencia a la compresión del hormigón

ε'_c = Deformación unitaria correspondiente al valor de f'_c

ε_u = Deformación unitaria última del hormigón

Con lo cual se muestra a continuación la curva tensión-deformación que considera SAP para el hormigón:

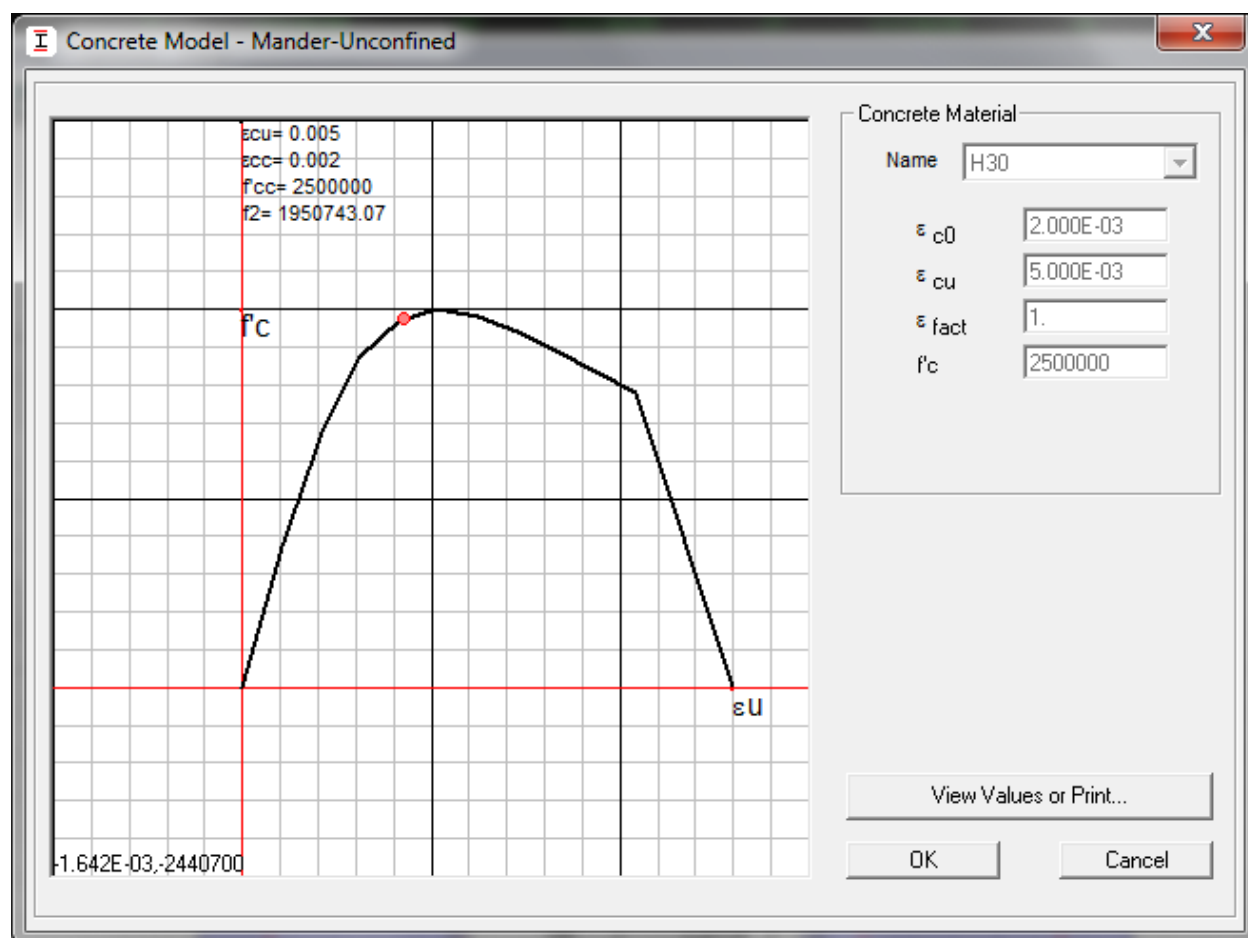


Figura 14: Curva tensión-deformación del modelo de Mander no confinado para el hormigón

Acero A63-42H:

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: A630-420H [Color: Blue]

Material Type: Rebar

Material Notes: [Modify/Show Notes...]

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 7849.0476

Mass per Unit Volume: 800.3801

Units

Kgf, m, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 2.100E+10

Poisson's Ratio, U: 0.3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1.170E-05

Shear Modulus, G: 8.077E+09

Other Properties for Rebar Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 42000000

Minimum Tensile Stress, Fu: 63000000

Expected Yield Stress, Fye: 42000000

Expected Tensile Stress, Fue: 63000000

☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Figura 15: Definición de acero A63-42H

Las propiedades elásticas e inelásticas para el acero que se define se toman según la curva tensión-deformación de Park, la cual es la que presenta SAP por defecto. La curva que define Park presenta tres regiones:

Región elástica, para $\varepsilon \leq \varepsilon_y$:

$$f = Es \quad (2.5)$$

Región de plastificación ideal, para $\varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_{sh}$

$$f = f_y \quad (2.6)$$

Región de endurecimiento por deformación (basado en el modelo de Park), cuando $\varepsilon_{sh} < \varepsilon \leq \varepsilon_u$

$$f = f_y \left(\frac{m(\varepsilon - \varepsilon_{sh}) + 2}{60(\varepsilon - \varepsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right) \quad (2.7)$$

donde:

$$r = \varepsilon_u - \varepsilon_{sh} \quad (2.8)$$

$$m = \frac{\frac{f_u}{f_y}(30r + 1)^2 - 60r - 1}{15r^2} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E} \quad (2.10)$$

ε = Deformación unitaria del acero

f = Tensión en el acero

E = Módulo de elasticidad del acero

f_y = Tensión de fluencia

f_u = Capacidad última del acero

ε_{sh} = Deformación unitaria al inicio del endurecimiento

ε_u = Deformación unitaria correspondiente a la capacidad última del acero

ε_y = Deformación unitaria correspondiente a la fluencia del acero

Se presenta a continuación la curva tensión-deformación que considera SAP para el acero, según los valores de fluencia y falla previamente definidos:

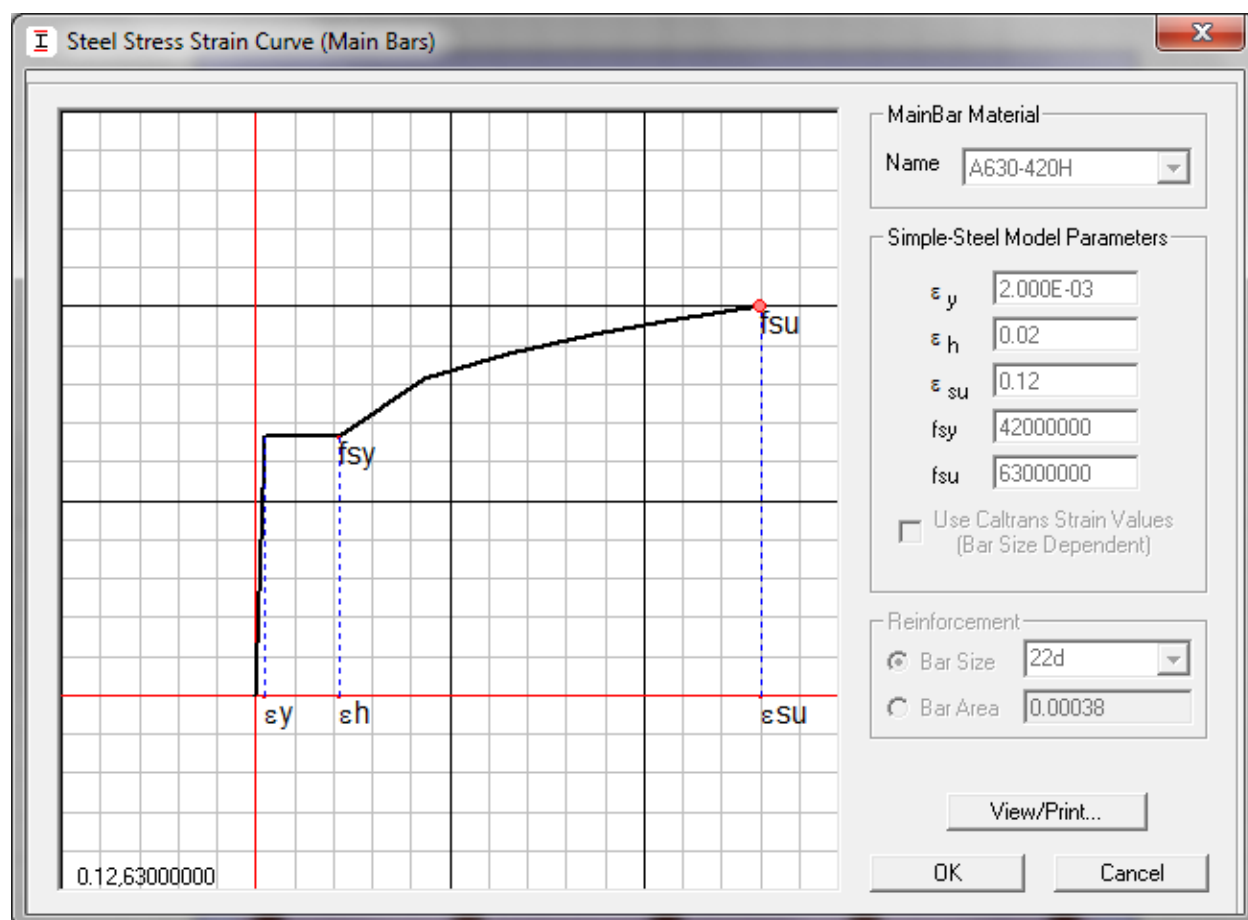


Figura 16: Curva tensión-deformación para el acero

II.2.2 ELEMENTOS ESTRUCTURALES

A continuación se presenta la definición de los elementos (frames) vigas y columnas, mediante el uso del Section Designer de SAP. Se define un frame para cada tipo de viga y para cada tipo de columna.

Definición de vigas:

Para efectos de mostrar la definición de los elementos viga se toma como ejemplo la viga V-1, siendo que para el resto de los elementos viga el procedimiento es el mismo, cambiando la sección de hormigón y la distribución del refuerzo.

Viga V-1:

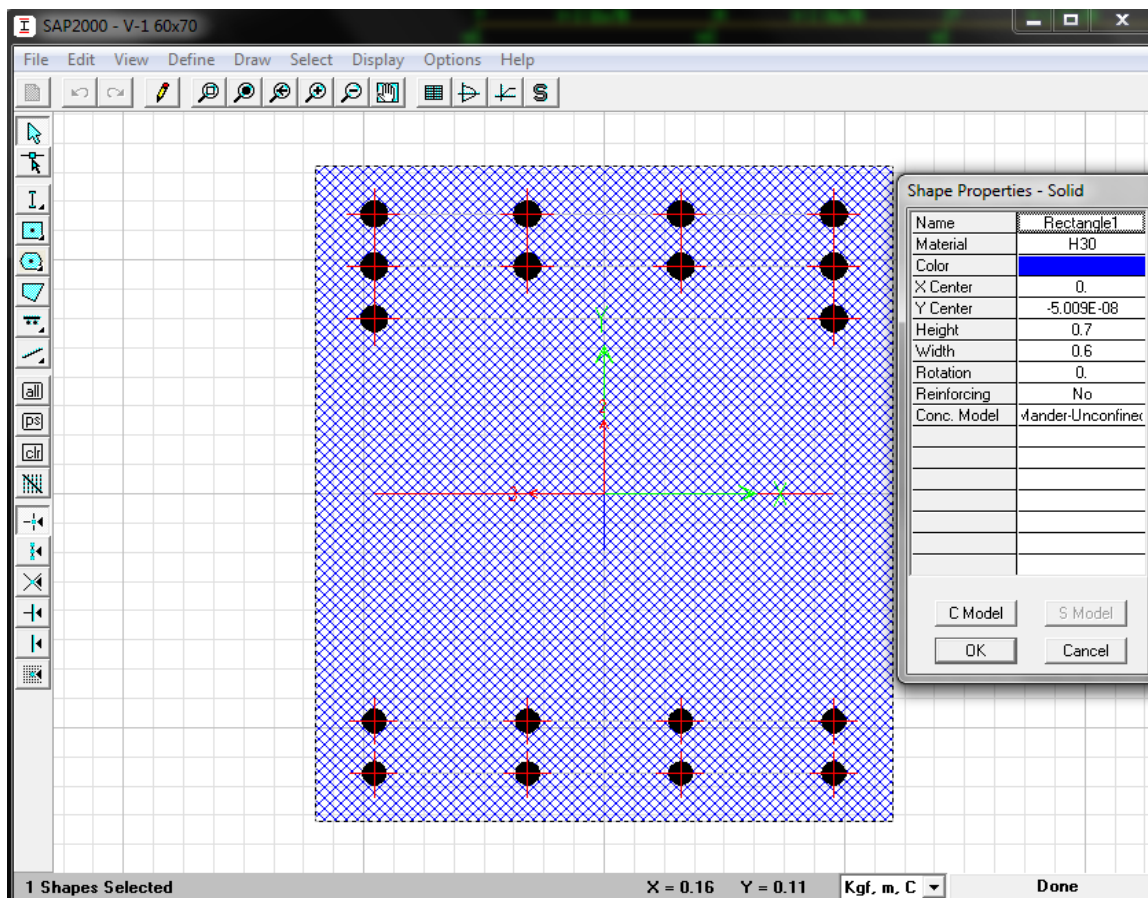


Figura 17: Definición de viga V-1

Definición de columnas:

Para efectos de mostrar la definición de los elementos columna se toma como ejemplo la columna interior del primer piso (C-80x80 P-1, interior), siendo que para el resto de los elementos columna el procedimiento es el mismo, cambiando la sección de hormigón y la distribución del refuerzo.

Columna interior del primer piso:

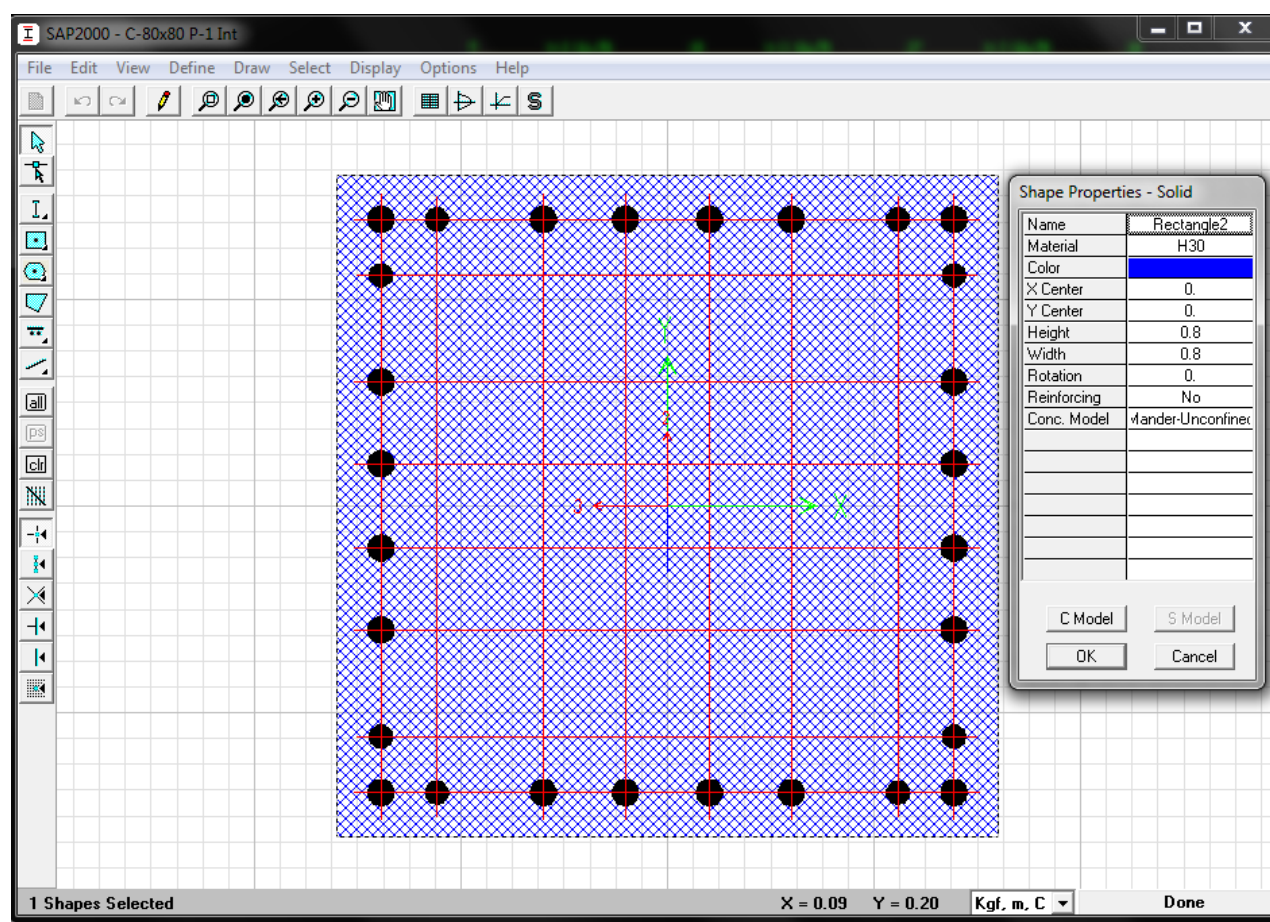


Figura 18: Definición de columna interior del primer piso

En las tablas 5 y 6 se presentan las descripciones de los elementos vigas y columnas definidas.

Tabla 5: Vigas

Vigas	b _w (cm)	h (cm)	F (superior)	As (superior, cm ²)	F (inferior)	As (inferior, cm ²)
V-1	60	70	10 ϕ 28	61.58	8 ϕ 25	39.27
V-2	55	70	8 ϕ 28	49.26	4 ϕ 28	24.63
V-3	55	70	6 ϕ 25	29.45	4 ϕ 25	19.63

Tabla 6: Columnas

Columnas	b _w (cm)	h (cm)	Armadura 1	As1 (cm ²)	Armadura 2	As2 (cm ²)	Ast (cm ²)
Interior P-1	80	80	20 ϕ 32	160.85	8 ϕ 28	49.26	210.11
Exterior P-1	80	80	12 ϕ 32	96.51	12 ϕ 32	96.51	193.02
P-2	80	80	16 ϕ 32	128.68	8 ϕ 28	49.26	177.94
P-3	80	80	12 ϕ 28	73.89	12 ϕ 28	73.89	147.78
P-4	80	80	12 ϕ 28	73.89	8 ϕ 25	39.27	113.16
P-5	70	70	8 ϕ 28	49.26	8 ϕ 25	39.27	88.53
P-6	70	70	8 ϕ 25	39.27	8 ϕ 25	39.27	78.54
P-7	70	70	8 ϕ 25	39.27	8 ϕ 22	30.41	69.68
P-8	70	70	8 ϕ 22	30.41	8 ϕ 22	30.41	60.82

II.2.3 RELACIONES MOMENTO-CURVATURA

Para el cálculo de los valores correspondientes a momento y curvatura para cada una de las secciones se hace uso de la aplicación Section Designer de SAP, mediante la cual se puede obtener el gráfico momento-curvatura para la cualquier sección previamente definida.

SAP calcula el gráfico momento-curvatura usando los valores de tensión y deformación previamente definidos en los materiales a utilizar. Para el presente estudio se utiliza el modelo idealizado de Caltrans (definido por defecto en SAP) para encontrar los valores correspondientes al momento nominal (M_n) y curvatura de fluencia (ϕ_y), necesarios para la definición de las rótulas a flexión y flexo-compresión en los elementos que conforman la estructura.

Todos los valores de momento y curvatura obtenidos en SAP se verificaron mediante una programación en Matlab, la que se muestra en el anexo V.1. La tabla 7 presenta una comparación entre los resultados correspondientes al momento nominal de las secciones.

Tabla 7: Comparación Momento nominal, vigas

		Programa Matlab	Section Designer	Diferencia
Viga	P (tonf)	Mn (tonf-m)	Mn (tonf-m)	%
V1 60x70	0.00	113.11	97.91	13.44
V2 55x70	0.00	111.55	97.27	12.80
V3 55x70	0.00	44.03	43.78	0.57

Se verificaron los momentos obtenidos, observándose una diferencia máxima del 13.44% en la viga V1, en donde a mayor momento nominal de la sección mayor es la diferencia entre los resultados de SAP y la programación en Matlab. Se asume que la diferencia es debida al sistema de convergencia empleado. Se presenta a continuación el gráfico momento (+) - curvatura que se obtiene de SAP para la viga V-1.

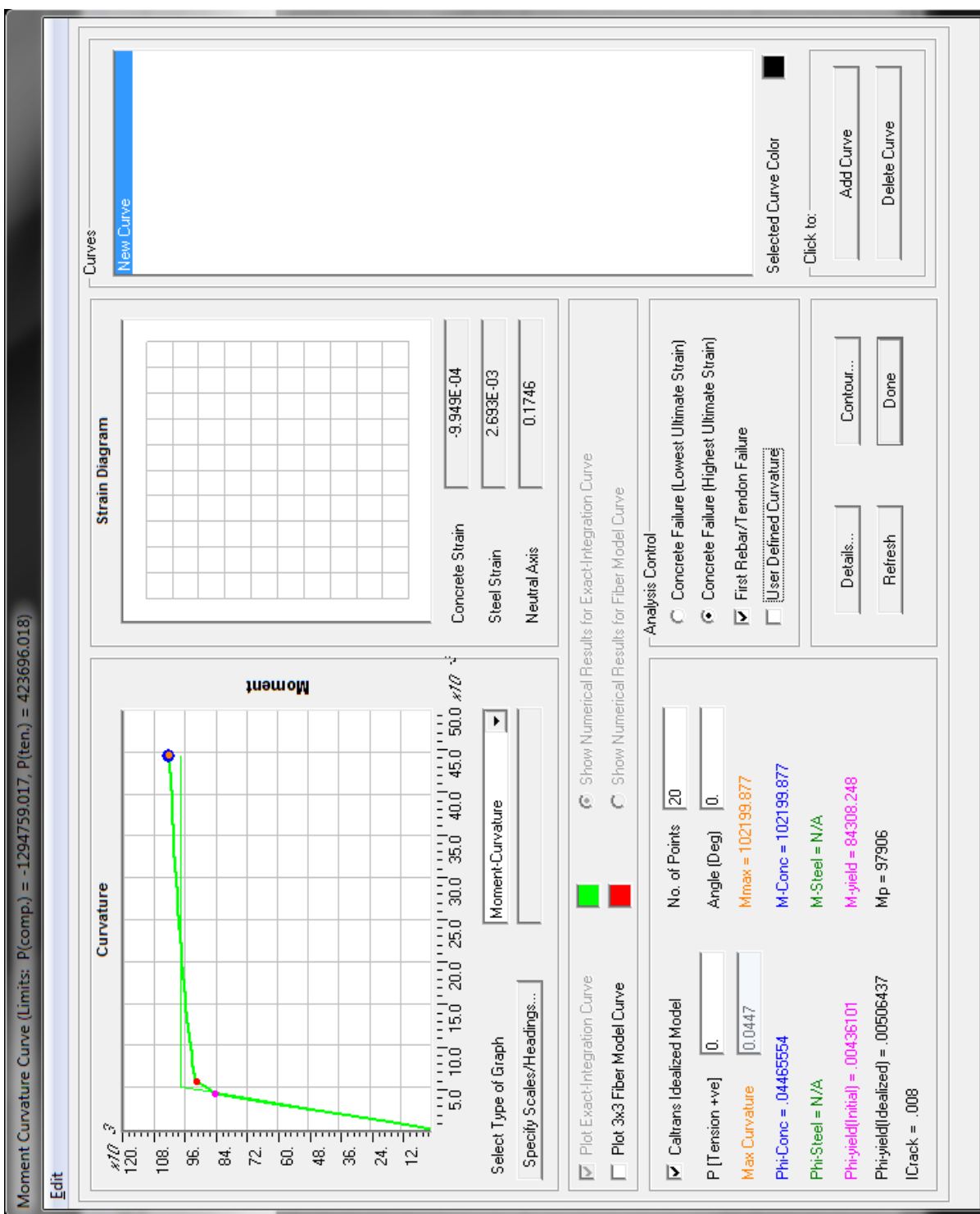


Figura 19: Gráfico momento – curvatura, viga V-1

La tabla 8 presenta la misma comparación para las secciones de columnas, en las que se aprecia una diferencia máxima del 13.95%.

Tabla 8: Comparación Momento nominal, columnas

			Programa Matlab	Section Designer	Diferencia
PISO 1	Columna	P (tonf)	Mn (tonf-m)	Mn (tonf-m)	%
Interior	C1 80x80	352.86	341.74	338.79	0.86
Exterior	C1 80x80	197.53	326.98	318.18	2.69
PISO 2					
Interior	C1 80x80	304.76	297.09	294.40	0.91
Exterior	C1 80x80	170.33	282.81	271.46	4.01
PISO 3					
Interior	C1 80x80	258.89	292.51	261.72	10.53
Exterior	C1 80x80	144.58	279.44	240.47	13.95
PISO 4					
Interior	C1 80x80	213.21	217.08	210.00	3.26
Exterior	C1 80x80	118.64	201.35	189.94	5.67
PISO 5					
Interior	C2 70x70	167.64	146.11	142.36	2.57
Exterior	C2 70x70	92.85	137.26	128.69	6.24
PISO 6					
Interior	C2 70x70	123.81	130.13	123.54	5.06
Exterior	C2 70x70	60.45	121.82	110.53	9.27
PISO 7					
Interior	C2 70x70	80.08	114.62	105.70	7.78
Exterior	C2 70x70	43.94	109.06	98.07	10.08
PISO 8					
Interior	C2 70x70	36.52	97.39	85.86	11.84
Exterior	C2 70x70	19.26	92.78	81.28	12.39

La figura 20 muestra el gráfico momento – curvatura para la columna interior P-1, para una carga axial igual a cero. Como se verá más adelante para la modelación de las rótulas a flexo-compresión SAP únicamente requiere el valor de la curvatura de fluencia, con lo anterior se estima que SAP es capaz de calcular la curva de interacción para cada sección en cada instante de tiempo (para cada nivel de carga axial que se demanda).

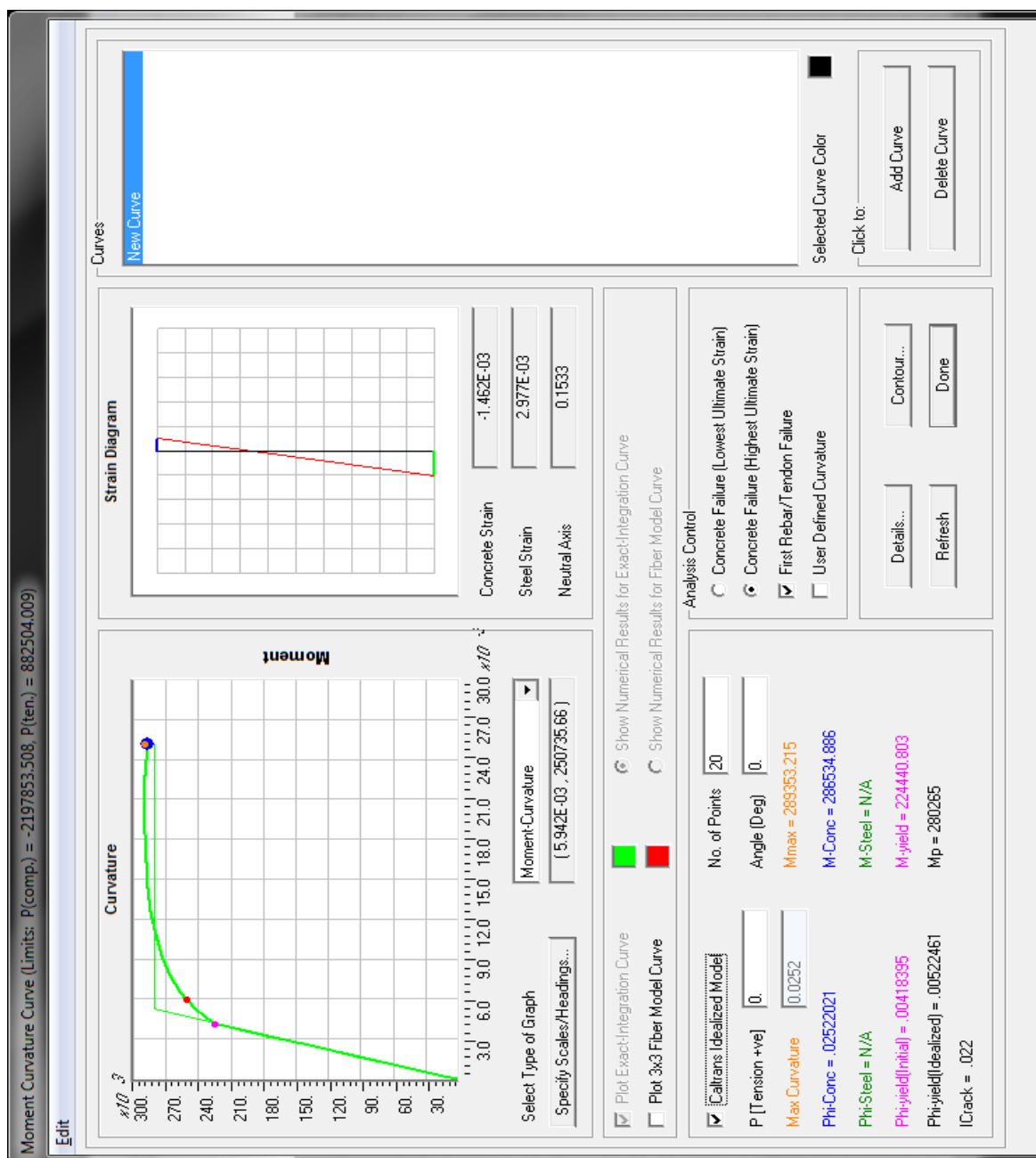


Figura 20: Gráfico momento – curvatura, columna interior P-1

II.2.4 MASA, RIGIDEZ Y AMORTIGUAMIENTO

En esta sección se describen las propiedades de masa, rigidez y amortiguamiento asignadas a cada uno de los elementos del marco que se estudia.

Propiedades de masa:

Se presentan a continuación las tablas que describen los pesos de cada uno de los elementos de la estructura, se incluyen además tablas que describen la masa asociada a las losas y las cargas que actúan sobre el marco y que dan como resultado el peso sísmico empleado, el cual se calcula como sigue:

Tabla 9: Peso de columnas

PISO	COLUMNAS						
	a (m)	b (m)	A (m ²)	Long (m)	Cant	Vol (m ³)	Peso (ton)
1	0.80	0.80	0.64	4.00	4.00	10.24	25.60
2	0.80	0.80	0.64	3.20	4.00	8.19	20.48
3	0.80	0.80	0.64	3.20	4.00	8.19	20.48
4	0.80	0.80	0.64	3.20	4.00	8.19	20.48
5	0.70	0.70	0.49	3.20	4.00	6.27	15.68
6	0.70	0.70	0.49	3.20	4.00	6.27	15.68
7	0.70	0.70	0.49	3.20	4.00	6.27	15.68
8	0.70	0.70	0.49	3.20	4.00	6.27	15.68

Tabla 10: Peso de vigas

PISO	VIGAS						
	b (m)	h (m)	A (m ²)	Long (m)	Cant	Vol (m ³)	Peso (tonf)
2	0.60	0.70	0.42	7.50	3.00	9.45	23.63
3	0.60	0.70	0.42	7.50	3.00	9.45	23.63
4	0.60	0.70	0.42	7.50	3.00	9.45	23.63
5	0.60	0.70	0.42	7.50	3.00	9.45	23.63
6	0.55	0.70	0.39	7.50	3.00	8.78	21.95
7	0.55	0.70	0.39	7.50	3.00	8.78	21.95
8	0.55	0.70	0.39	7.50	3.00	8.78	21.95
9	0.55	0.70	0.39	7.50	3.00	8.78	21.95

Tabla 11: Peso sísmico de la estructura

PISO	LOSA Peso (tonf)	DEAD Carga (tonf)	25% LIVE Carga (tonf)	Peso Sísmico por Piso
3	63.28	25.31	10.55	148.37
4	63.28	25.31	10.55	143.25
5	63.28	25.31	10.55	143.25
6	63.28	25.31	10.55	143.25
7	63.28	25.31	10.55	136.77
8	63.28	25.31	10.55	136.77
9	63.28	25.31	10.55	136.77
10	63.28	8.44	4.22	113.57
Peso sísmico Total				1102.00

Propiedades de rigidez:

Para el presente estudio se toma en consideración la reducción de rigidez sobre los elementos, esto con el objeto de representar de una manera más real el comportamiento inelástico de cada sección.

Se calcula entonces para cada sección la reducción de rigidez según el siguiente criterio:

- Con los valores previamente calculados correspondientes al momento nominal (positivo y negativo en vigas) y curvatura de fluencia de cada elemento, se calcula la rigidez efectiva de cada sección como la pendiente del gráfico $M-\phi$:

$$EI_{eff} = \frac{M_n}{\phi_y} \quad (2.11)$$

- Se calcula la rigidez de cada elemento:

$$EI = E_c \left(\frac{b \times h^3}{12} \right) \quad (2.12)$$

Dónde: E_c = Módulo de elasticidad del hormigón

- El factor para la reducción de rigidez se calcula como:

$$\alpha = \frac{EI_{eff}}{EI} \quad (2.13)$$

- Para las vigas α se toma como el promedio entre el valor calculado para el momento nominal positivo y el negativo.

Se presentan a continuación los factores de reducción de rigidez utilizados para la modelación en SAP.

Tabla 12: Reducción de rigidez aplicada a las vigas

Factor de reducción de rigidez			
Viga	$\alpha (+)$	$\alpha (-)$	α
V-1	0.47	0.60	0.54
V-2	0.37	0.55	0.46
V-3	0.23	0.38	0.31

Tabla 13: Reducción de rigidez aplicada a las columnas

Factor de reducción de rigidez		
Columna		α
PISO 1	Interior	0.6581
	Exterior	0.6123
PISO 2	Int y Ext	0.5707
PISO 3	Int y Ext	0.4939
PISO 4	Int y Ext	0.3881
PISO 5	Int y Ext	0.3886
PISO 6	Int y Ext	0.3538
PISO 7	Int y Ext	0.3223
PISO 8	Int y Ext	0.2830

Propiedades de amortiguamiento:

Se toma el amortiguamiento modal de 5%, el cual se muestra más adelante, en la definición de los casos de carga.

Como resultado del análisis sísmico según las normas vigentes se tienen los siguientes valores para corte basal máximo y mínimo permitidos por la norma:

$$Q_{om\acute{a}x} = 104.69 \text{ tonf}$$

$$Q_{omin} = 73.83 \text{ tonf}$$

Para el período con mayor masa traslacional:

$$T^* = 1.17 \text{ s}$$

Con lo cual se tiene entonces que el factor de reducción:

$$R^* = 1 + \frac{T^*}{0.10T_o + \frac{T^*}{R_o}} \quad (2.14)$$

$$R^* = 7.34$$

El espectro se calcula según lo indicado en la NCh 433:

$$S_a = \frac{IA_o \alpha}{R^*} \quad (2.15)$$

Dónde:

$$\alpha = \frac{1 + 4.5 \left(\frac{T_n}{T_o} \right)^p}{1 + \left(\frac{T_n}{T_o} \right)^3} \quad (2.16)$$

Evalutando los resultados obtenidos en las ecuaciones anteriores se calcula el espectro correspondiente:

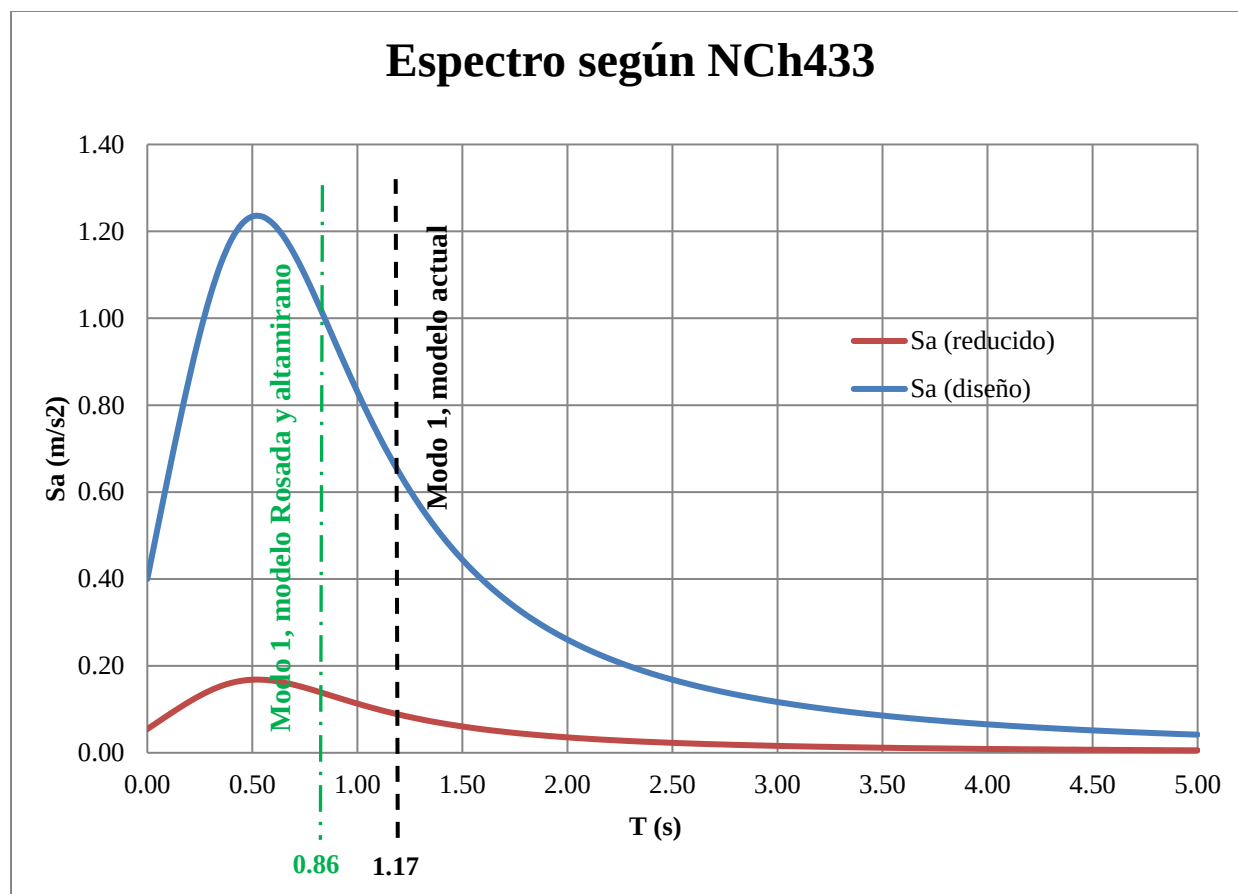


Gráfico 9: Espectro de respuesta según NCh 433

II.2.5 RÓTULAS A FLEXIÓN EN LAS VIGAS

Para el análisis no-lineal que se pretende estudiar se definirán rótulas plásticas a flexión en las vigas, para esto se usan de tres de las diferentes opciones para los tipos de histéresis que presenta SAP hasta la versión 14.2.4, con el propósito de comparar su comportamiento post-fluencia mediante un análisis Tiempo – Historia.

Se hará una breve descripción del comportamiento de cada una de las histéresis consideradas:

- Isotropic: considerada por defecto en todas las versiones de SAP anteriores a la 14.
- Kinematic: el comportamiento que se describe en este tipo de histéresis es el que se observa comúnmente en los metales, por lo que se considera éste tipo de histéresis para los elementos metálicos. Para este tipo de comportamiento se obtiene una significativa disipación de la energía en modelos con materiales dúctiles.

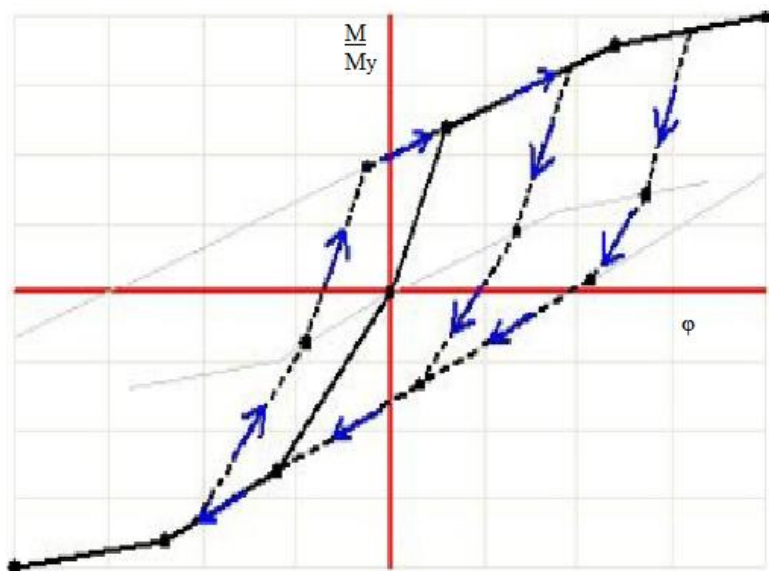


Figura 21: curva esfuerzo-deformación unitaria, histéresis Kinematic

- Takeda: este modelo considera degradación del material, y es muy apropiado para definir elementos de hormigón.

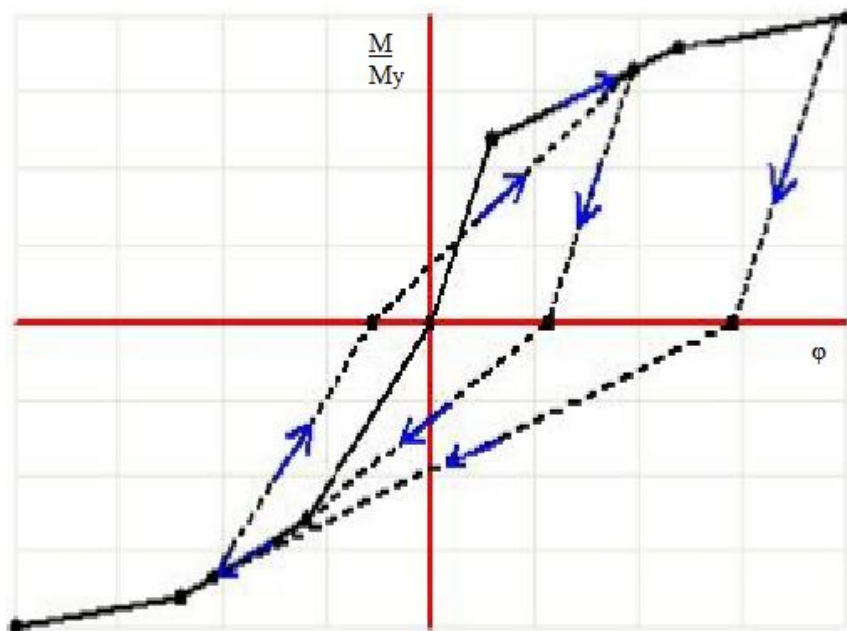


Figura 22: curva esfuerzo-deformación unitaria, histéresis Takeda

Para la definición de las rótulas a flexión en las vigas, se toman los valores de momento nominal y curvatura de fluencia previamente obtenidos en el Section Designer.

Como se mencionó anteriormente se definen las rótulas plásticas usando el modelo de Caltrans idealizado, con lo que se obtiene una curva bilineal en la definición de cada una de ellas.

En la figura 24 se presenta la definición de la rótula a flexión de la viga V-1, usando la histéresis isotropic. Las vigas V-2 y V-3 se definen de manera similar, cambiando únicamente los valores correspondientes al momento nominal y curvatura.

Para definir la longitud de rótula se considera la recomendación de Paulay y Priestley (1992), según la cual la longitud de rótula es igual a dos veces la altura de la viga ($2h$).

Debido a que las vigas presentan una armadura diferente para momento positivo y negativo se tienen valores distintos para momento nominal y curvatura de fluencia, por lo que se define una curva tensión deformación asimétrica para la rótula.

Cabe mencionar que para la definición de cada una de las histéresis que se proponen, SAP muestra una caja con el nombre de “hysteresis type” en la que se define el tipo a utilizar.

Frame Hinge Property Data for V-1 - Moment M3

Edit

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Curvature/SF
E-	-1.	-6.
D-	-1.	-5.
C-	-1.	-4.
B-	-1.	0.
A	0.	0.
B	1.	0.
C	1.	4.
D	1.	5.
E	1.	6.

☐ Symmetric

Type

☐ Moment - Rotation

☒ Moment - Curvature

Hinge Length

☒ Relative Length

Hysteresis Type And Parameters

Hysteresis Type

No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

Load Carrying Capacity Beyond Point E

☐ Drops To Zero

☒ Is Extrapolated

Scaling for Moment and Curvature

☐ Use Yield Moment

Moment SF

Positive	Negative
97906.	139713.

☐ Use Yield Curvature (Steel Objects Only)

Curvature

Positive	Negative
5.064E-03	5.648E-03

Acceptance Criteria (Plastic Curvature/SF)

	Positive	Negative
☒ Immediate Occupancy	1.	-1.
☐ Life Safety	2.	-2.
☐ Collapse Prevention	3.	-3.

☐ Show Acceptance Criteria on Plot

OK Cancel

Figura 23: Definición de rótula a flexión en la viga V-1

II.2.6 RÓTULAS A FLEXO-COMPRESIÓN EN COLUMNAS

Se definen rótulas a flexo-compresión en las columnas tal y como se muestra en las figuras 24, 25 y 26. Se toma como ejemplo la columna interior P-1.

Para la definición de la rótula se siguen los siguientes pasos:

- Se ingresan de los valores correspondientes a la longitud de rótula y curvatura de fluencia a utilizar.

Frame Hinge Property Data for Col P1 int - Interacting P-M3

Hinge Specification Type

- ☐ Moment - Rotation
- ☒ Moment - Curvature
 - Hinge Length: 0.4
 - ☐ Relative Length

Scale Factor for Curvature (SF)

- ☐ SF is Equal to Yield Curvature (Steel Objects Only)
- ☒ User SF: 5.230E-03

Load Carrying Capacity Beyond Point E

- ☐ Drops To Zero
- ☒ Is Extrapolated

Symmetry Condition

- ☒ Moment Curvature Dependence is Symmetric
- ☐ Moment Curvature Dependence is Not Symmetric

Requirements for Specified Symmetry Condition

- Specify curve at angle of 90°.

Axial Forces for Moment Curvature Curves

Number of Axial Forces: 1

Modify/Show Axial Force Values...

Curve Angles for Moment Curvature Curves

Number of Angles: 1

Modify/Show Angles...

Modify/Show Moment Curvature Curve Data...

Modify/Show P-M3 Interaction Surface Data...

OK Cancel

Figura 24: Definición de rótula a flexo-compresión, columna interior P-1

- Se define que el criterio a usar para que SAP calcule la superficie de interacción (P-M) de la sección serán las disposiciones del ACI 318-02; y que tome el modelo elastoplástico ideal para la relación carga axial vs desplazamiento.

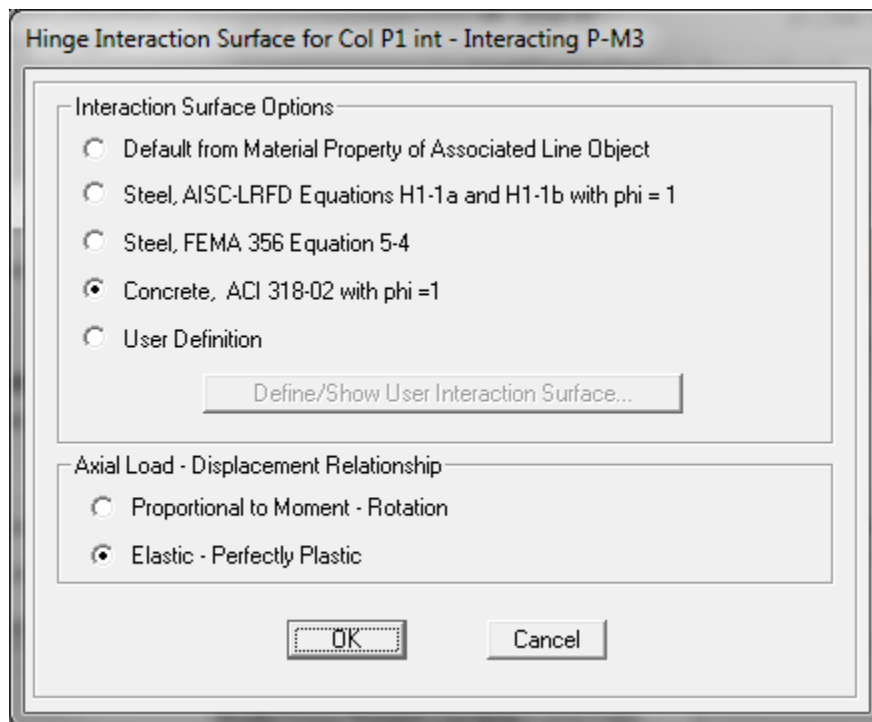


Figura 25: Definición de superficie de interacción

- Se definen los datos correspondientes al momento nominal y curvatura de fluencia para la sección. Para esto se asume que SAP calcula los valores que forman la interacción P-M de la columna, según lo especificado en el paso anterior, y obtiene valores de momento y carga axial por lo que se colocan unos en las casillas propias al momento.

Moment Rotation Data for Col P1 int - Interacting P-M3

Edit

Select Curve
 Axial Force: 0. Angle: 90. Curve #1: [Navigation Buttons]
 Units: Kgf, m, C

Moment Curvature Data for Selected Curve

Point	Moment/Yield Mom	Curvature/SF
A	0.	0.
B	1.	0.
C	1.	4.
D	1.	5.
E	1.	6.

Note: Yield moment is defined by interaction curve

Copy Curve Data Paste Curve Data

Acceptance Criteria (Plastic Deformation / SF)

☐ Immediate Occupancy 1.
☐ Life Safety 2.
☐ Collapse Prevention 3.
☒ Show Acceptance Points on Current Curve

3D View

Plan: 0 Axial Force: 0
 Elevation: 0
 Aperture: 0
☐ Hide Backbone Lines
☐ Show Acceptance Criteria
☐ Show Thickened Lines
☒ Highlight Current Curve

Moment Curvature Information

Symmetry Condition: Symmetric
 Number of Axial Force Values: 1
 Number of Angles: 1
 Total Number of Curves: 1

Angle Is Moment About

0 degrees = About Positive M2 Axis
 90 degrees = About Positive M3 Axis
 180 degrees = About Negative M2 Axis
 270 degrees = About Negative M3 Axis

OK Cancel

Figura 26: Definición de rótula a flexo-compresión, columna interior P-1

II.2.7 CARGAS DE GRAVEDAD Y CARGAS SÍSMICAS

Las cargas de gravedad (vivas y muertas) que se aplican en las vigas son las que resultan de la aplicación de las presiones de área sobre las losas.

Las figuras 27 y 28 muestran las cargas muertas y vivas respectivamente que se definen en la estructura.

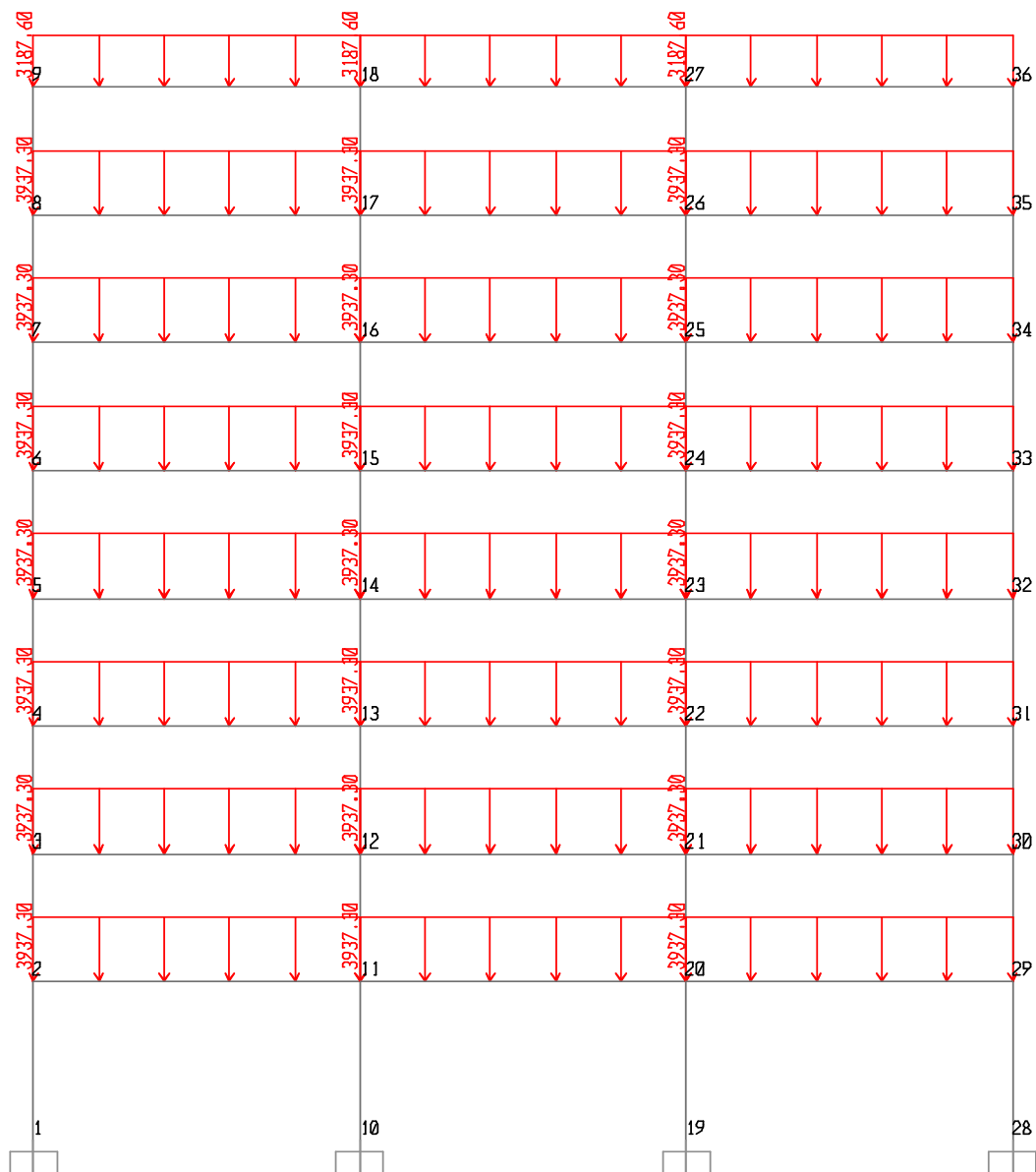


Figura 27: Carga muerta

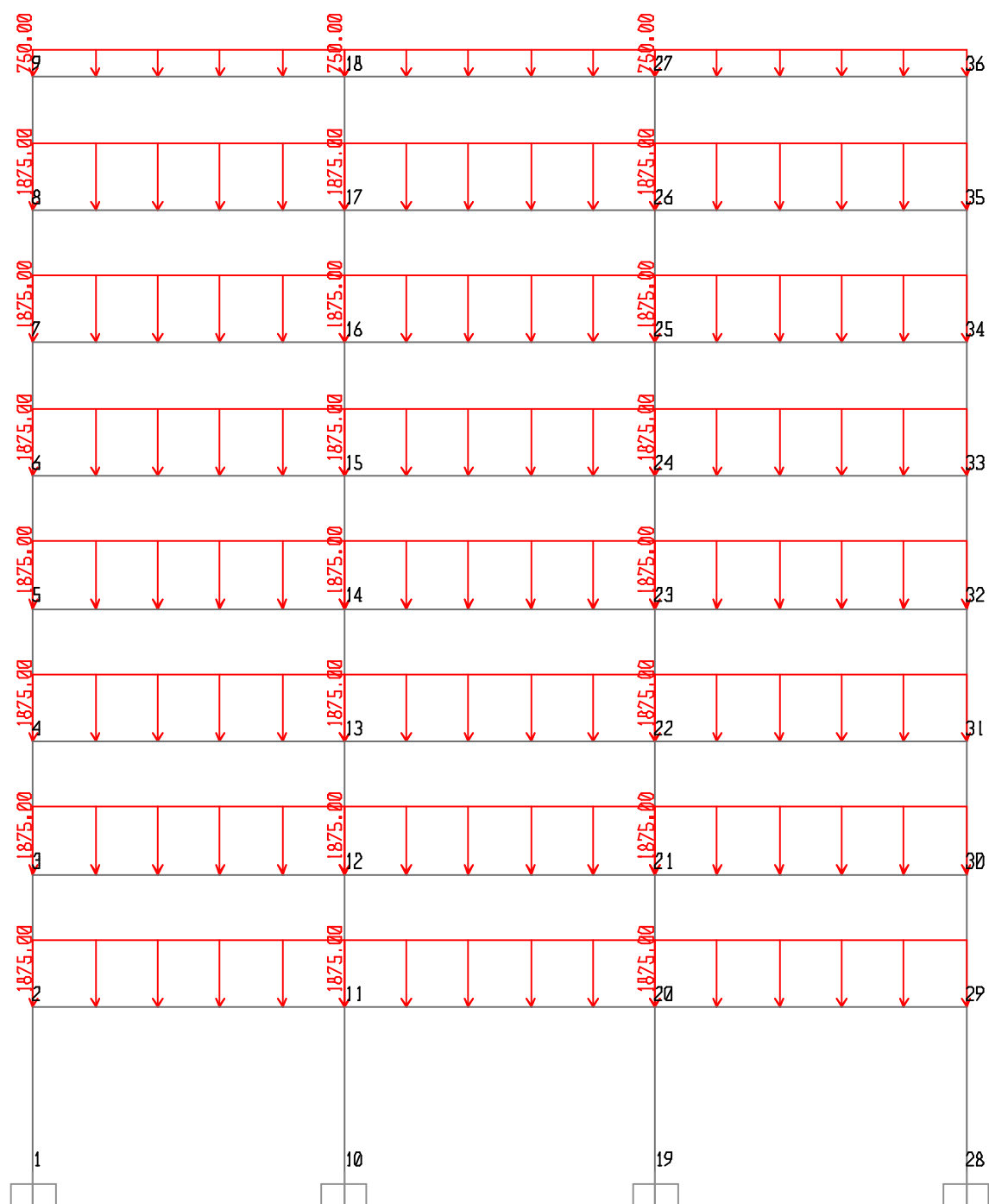


Figura 28: Carga viva

Cargas Sísmicas

Se define como registro de aceleraciones de Llolleo (figura 29) ya que este fue el que se uso por parte de Rosada y Altamirano en su análisis.

El registro tiene una duración de 122.31 segundos y presenta unidades de aceleración en cm/s^2 y de tiempo en segundos; y los intervalos de tiempo son cada 0.005 segundos.

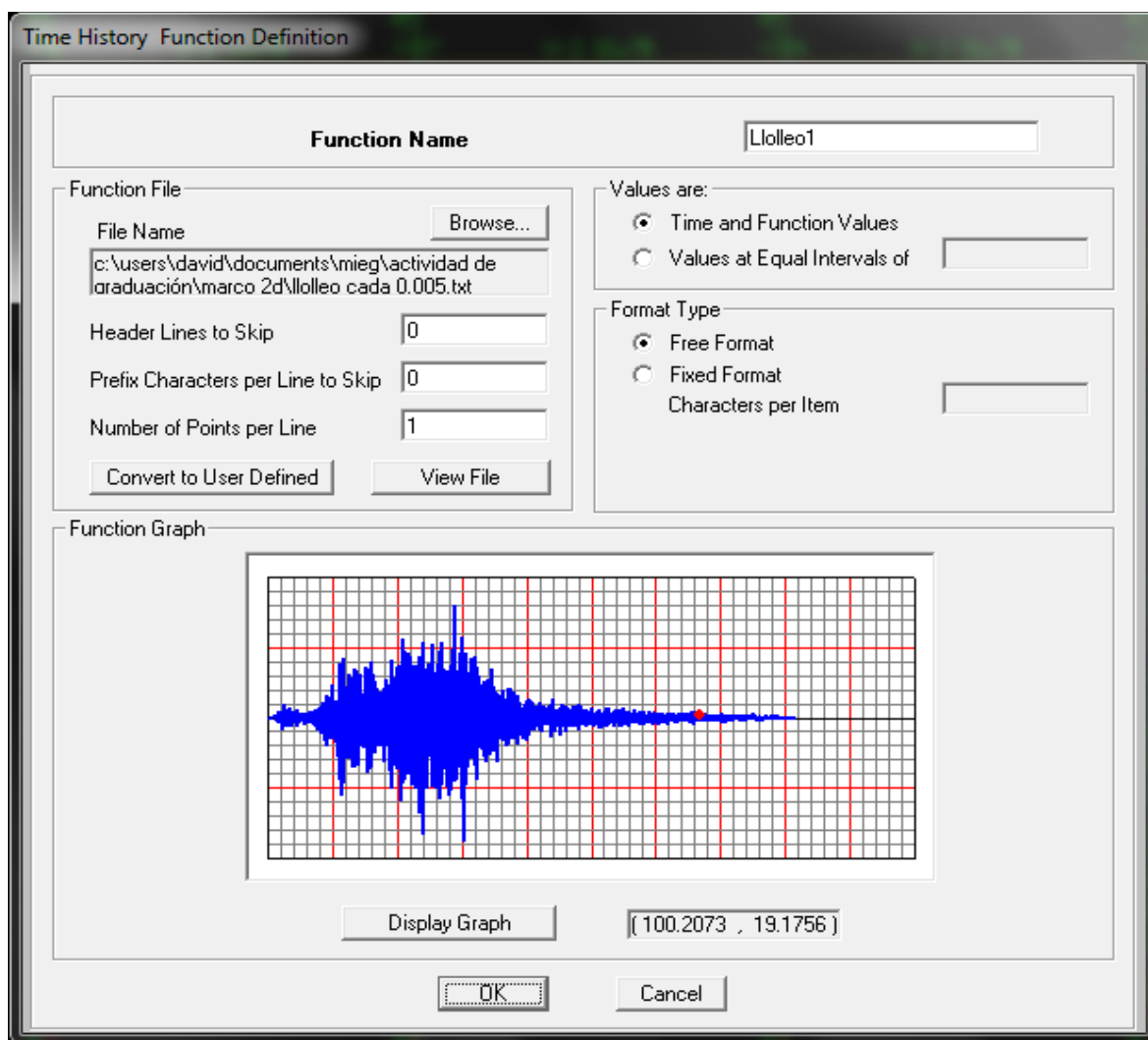


Figura 29: Registro de aceleraciones, Llolleo

II.2.8 COMBINACIONES DE CARGA

Para el análisis se definen dos combinaciones de carga no-lineales:

- Estático no-lineal:

Se define con el objeto de acercar a la realidad la manera en que las cargas se aplican a la estructura, para lo cual se considera que actúan en primer lugar las cargas estáticas y luego las cargas provocadas por la acción del sismo.

En la figura 30 se observa la definición del caso estático no-lineal.

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: ACASE2 [Set Def Name] Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Static [Design...]

Initial Conditions:

- ☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- ☐ Continue from State at End of Nonlinear Case []

 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case:
 All Modal Loads Applied Use Modes from Case [MODAL]

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	DEAD	1.
Load Pattern	DEAD	1.
Load Pattern	LIVE	0.25

[Add] [Modify] [Delete]

Analysis Type:

- ☐ Linear
- ☒ Nonlinear
- ☐ Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters:

- ☒ None
- ☐ P-Delta
- ☐ P-Delta plus Large Displacements

Other Parameters:

- Load Application: Full Load [Modify/Show...]
- Results Saved: Final State Only [Modify/Show...]
- Nonlinear Parameters: Default [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Figura 30: Caso de carga: Estático no-lineal

- Tiempo historia No-lineal con integración directa:

Se define el análisis no-lineal haciendo uso del registro de aceleraciones previamente definido (Llolleo), para el que se especifica que comience después de la aplicación de las cargas estáticas previamente definidas (ACASE1).

Las figura 31 y 32 muestran la definición del caso de carga, los parámetros de no-linealidad y los parámetros de amortiguamiento que se utilizaron.

Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History

Load Case Name:

Notes:

Load Case Type:

Initial Conditions:

- ☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- ☒ Continue from State at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case:

Use Modes from Case:

Analysis Type:

- ☐ Linear
- ☒ Nonlinear

Time History Type:

- ☐ Modal
- ☒ Direct Integration

Geometric Nonlinearity Parameters:

- ☒ None
- ☐ P-Delta
- ☐ P-Delta plus Large Displacements

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	Llolleo1	0.01
Accel	U1	Llolleo1	0.01

☐ Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:

Number of Output Time Steps:

Output Time Step Size:

Time History Motion Type:

- ☒ Transient
- ☐ Periodic

Other Parameters:

Damping:

Time Integration:

Nonlinear Parameters:

Figura 31: Caso de carga: Tiempo historia no-lineal, integración directa

Mass and Stiffness Proportional Damping

Damping Coefficients

☐ Direct Specification

☒ Specify Damping by Period

☐ Specify Damping by Frequency

	Mass Proportional Coefficient	Stiffness Proportional Coefficient
	0.4796	1.990E-03

	Period	Frequency	Damping
First	1.17		0.05
Second	0.14		0.05

Figura 32: Se define un amortiguamiento del 5% para la estructura

III DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

Los resultados que se presentan en esta sección corresponden al análisis no-lineal de la estructura usando para las vigas y columnas la histéresis isotrópica. Todos los resultados obtenidos están en unidades de kgf y m.

III.1 DESPLAZAMIENTOS DE PISO

El gráfico 10 presenta los desplazamientos máximos de piso obtenidos; dentro de los cuales se tiene que el desplazamiento máximo es de 0.22 m. en el piso 8.

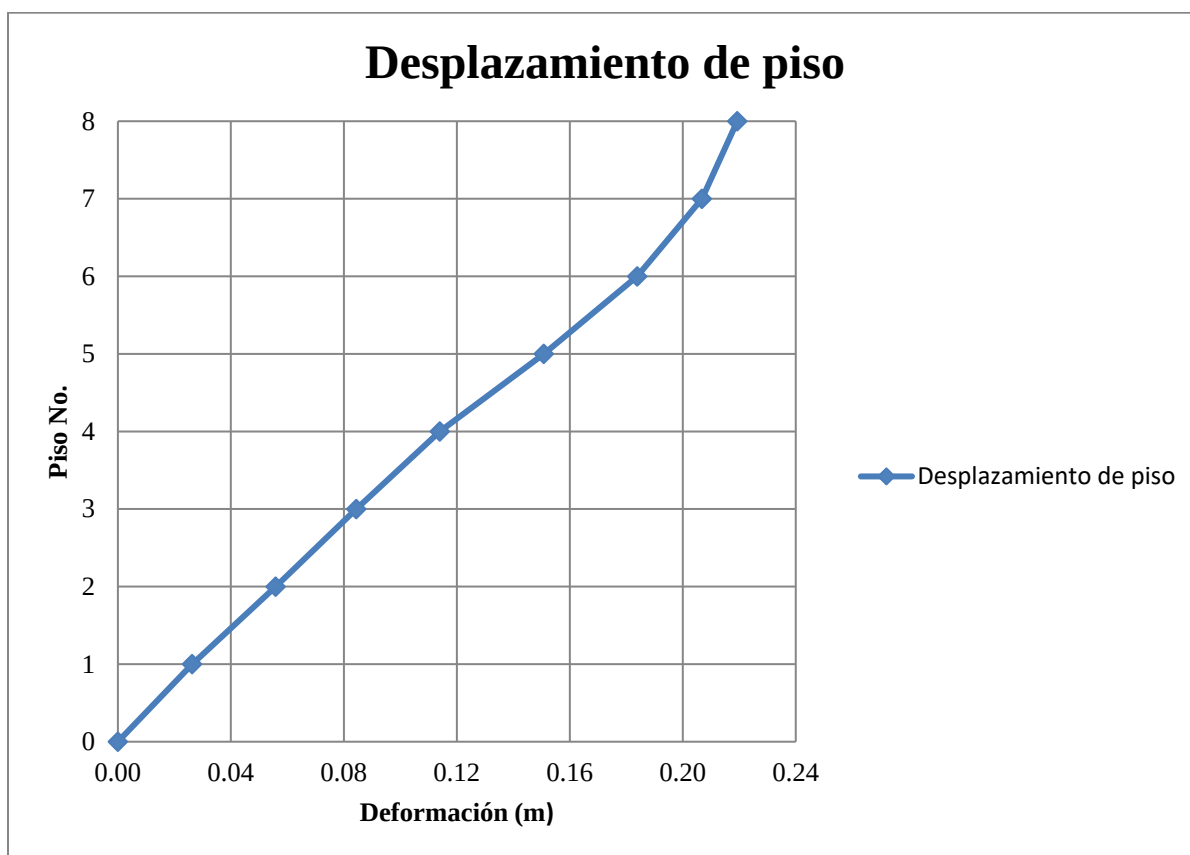


Gráfico 10: Desplazamiento máximos absolutos de piso

Tabla 14: Desplazamientos máximos absolutos por piso

Piso	Desplazamiento (m)
1	0.0263
2	0.0559
3	0.0844
4	0.1140
5	0.1508
6	0.1839
7	0.2068
8	0.2193

Se presenta a continuación (en el gráfico 11) la comparación entre los desplazamientos de piso obtenidos y los que se presentan en el trabajo de Rosada y Altamirano. En el que se nota que los resultados obtenidos en SAP v14.2.4 son mayores a los calculados por Rosada y Altamirano tanto en SAP v11.0 como para LARZD.

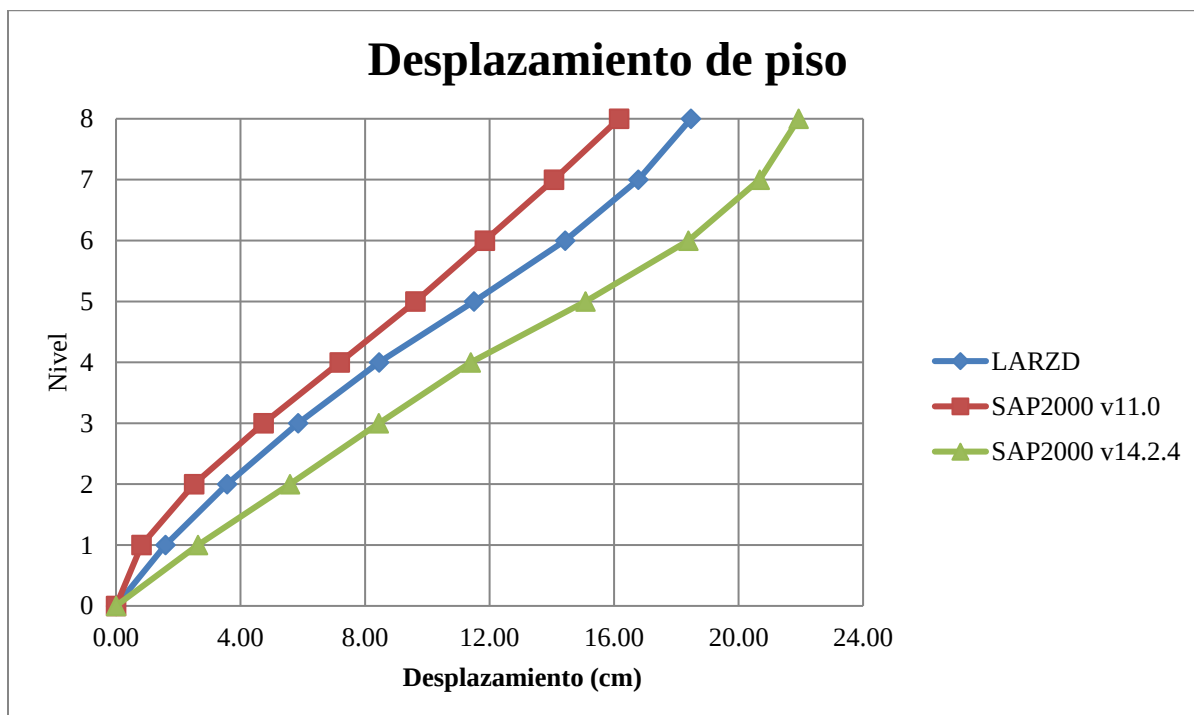


Gráfico 11: Comparación del desplazamiento de piso

III.2 DESPLAZAMIENTOS DE TECHO

Se muestra a continuación la gráfico 12 la historia del desplazamiento de techo

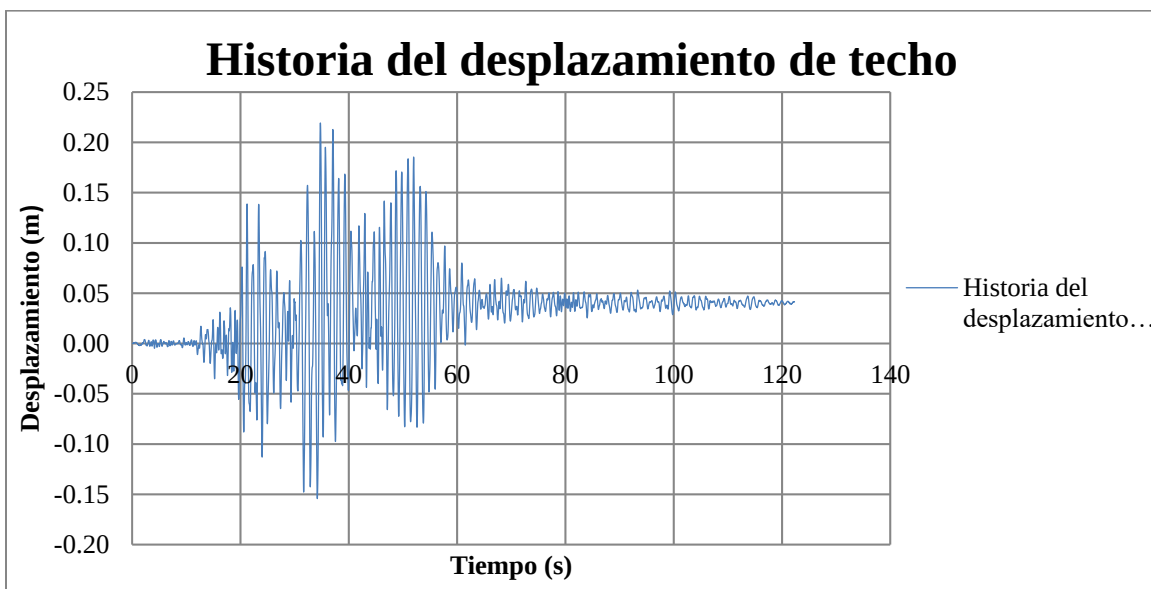


Gráfico 12: Historia del desplazamiento de techo

En el gráfico 13 se escalan los resultados obtenidos con el objeto de compararlos con los que se tienen de Rosada y Altamirano.

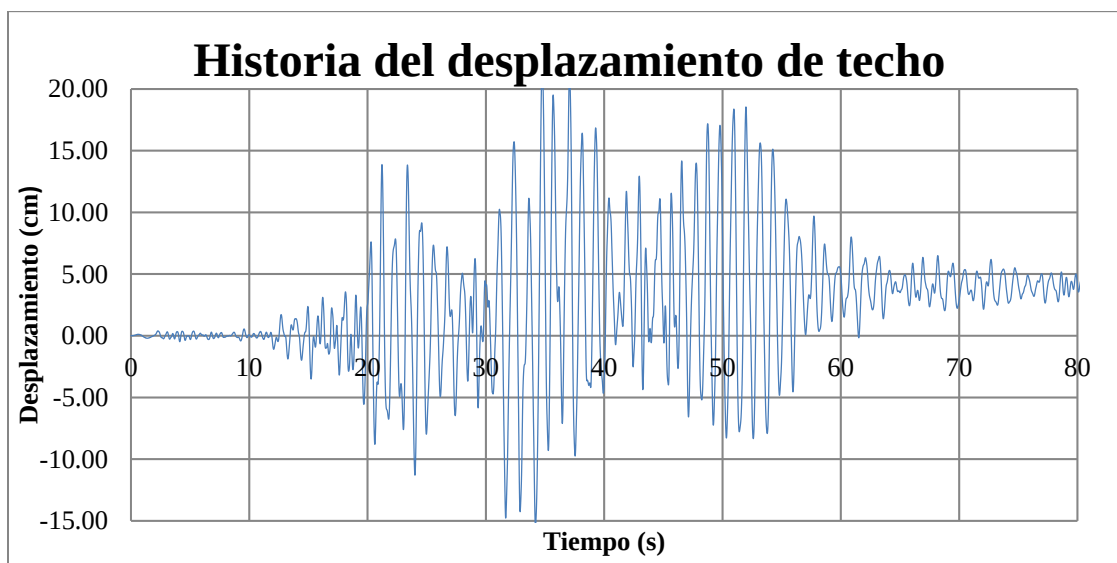


Gráfico 13: Historia del desplazamiento de techo SAP2000 v14.2.4

Historia de desplazamientos de techo - LARZD

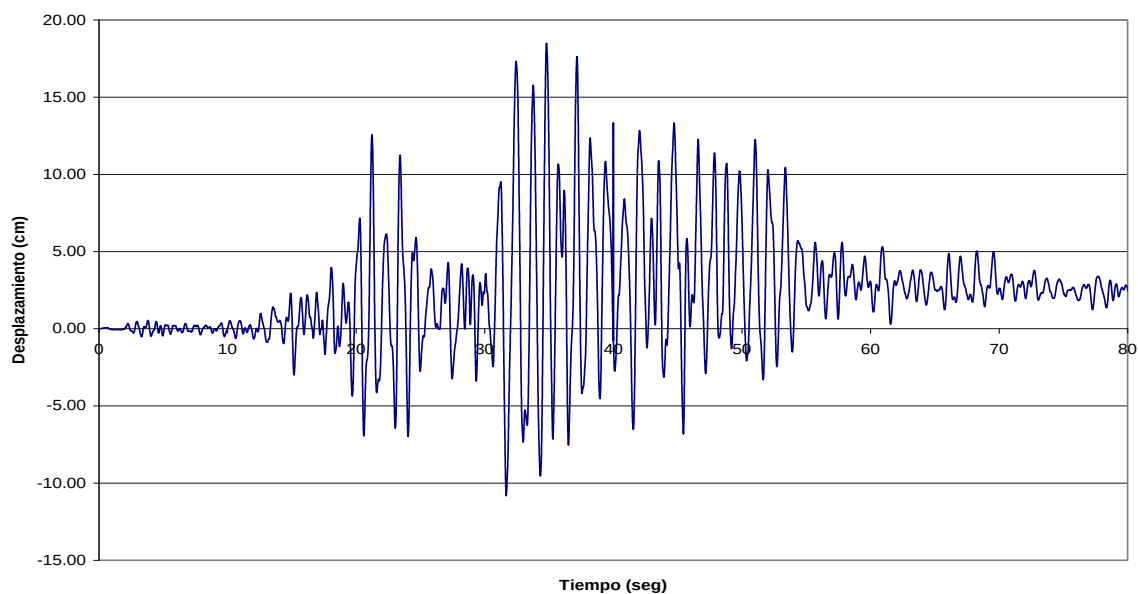


Gráfico 14: Historia del desplazamiento de techo, LARZD (Rosada y Altamirano)

Historia de desplazamientos de techo - SAP

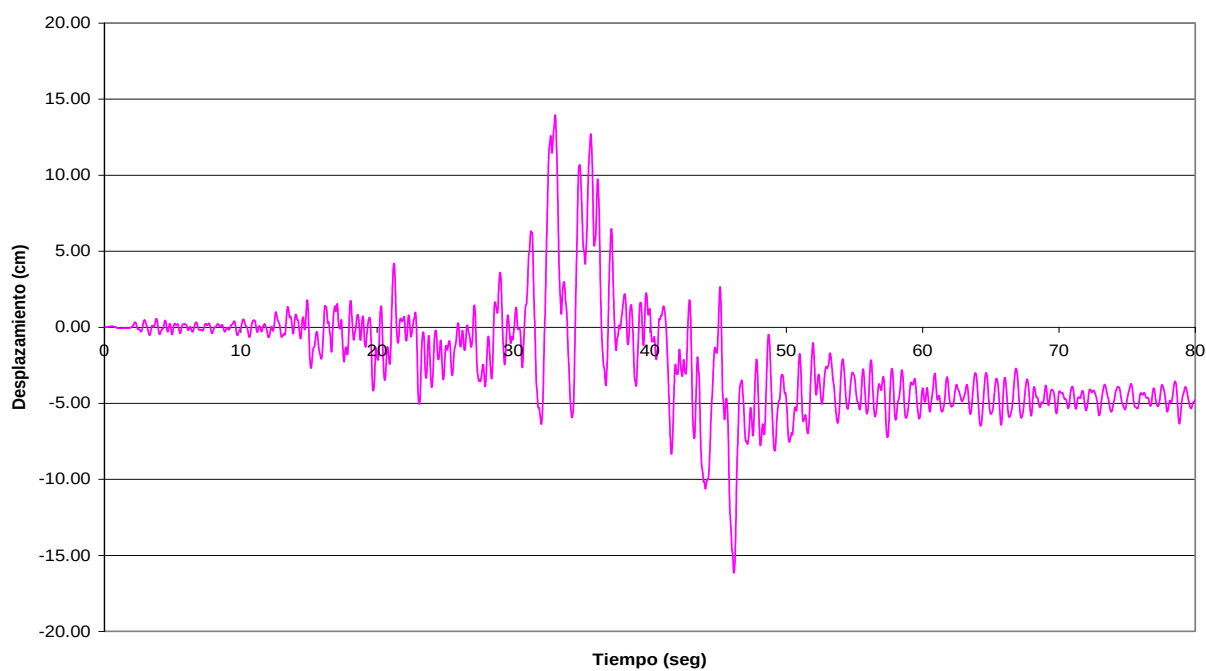


Gráfico 15: Historia del desplazamiento de techo, SAP2000 v11.0 (Rosada y Altamirano)

Se observa que la historia del desplazamiento de techo indicada por SAP v14.2.4 es algo similar a la obtenida por Rosada y Altamirano usando LARZD, no así con SAP v11.0, lo cual indica, tal como ellos proponen en su trabajo, una falla en la modelación.

III.3 DRIFTS DE PISO

En el gráfico 16 se muestran los resultados correspondientes a los drifts de piso obtenidos; el mayor valor es de 0.0368 m. y se da en el piso 7.

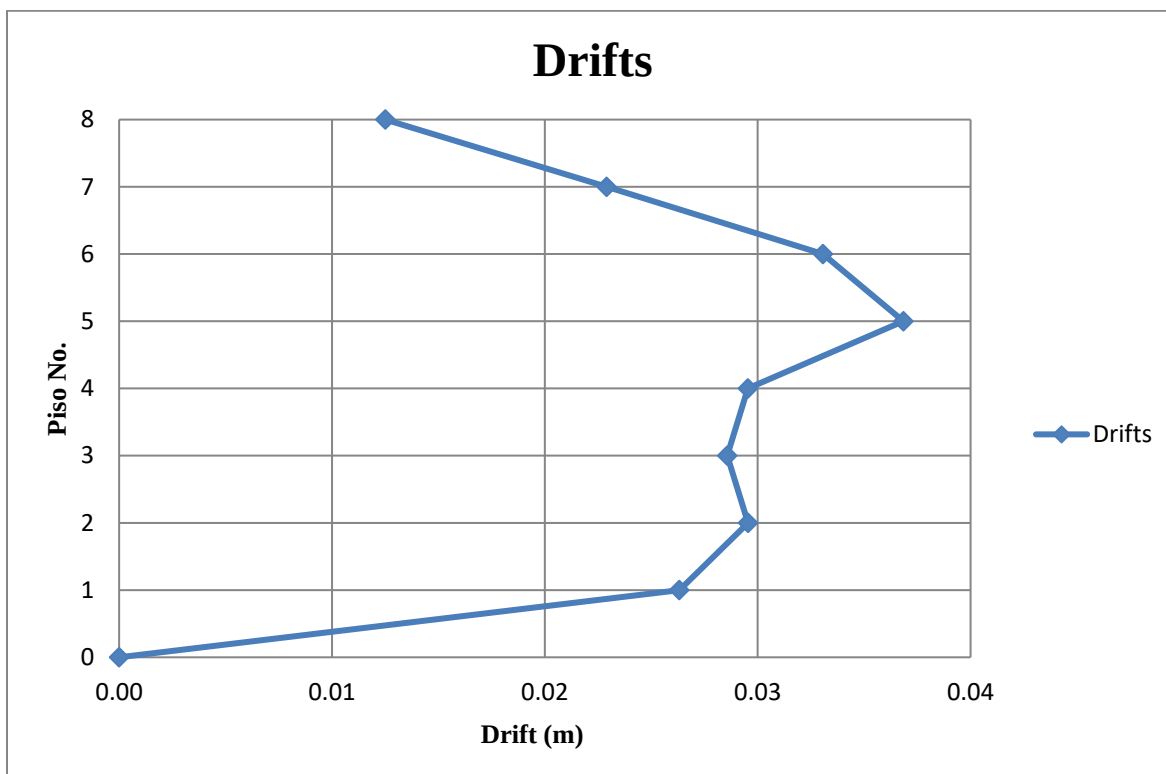


Gráfico 16: Drifts de piso

Tabla 15: Drifts de piso

Piso	Drift de piso (m)
1	0.0263
2	0.0295
3	0.0286
4	0.0295
5	0.0368
6	0.0331
7	0.0229
8	0.0125

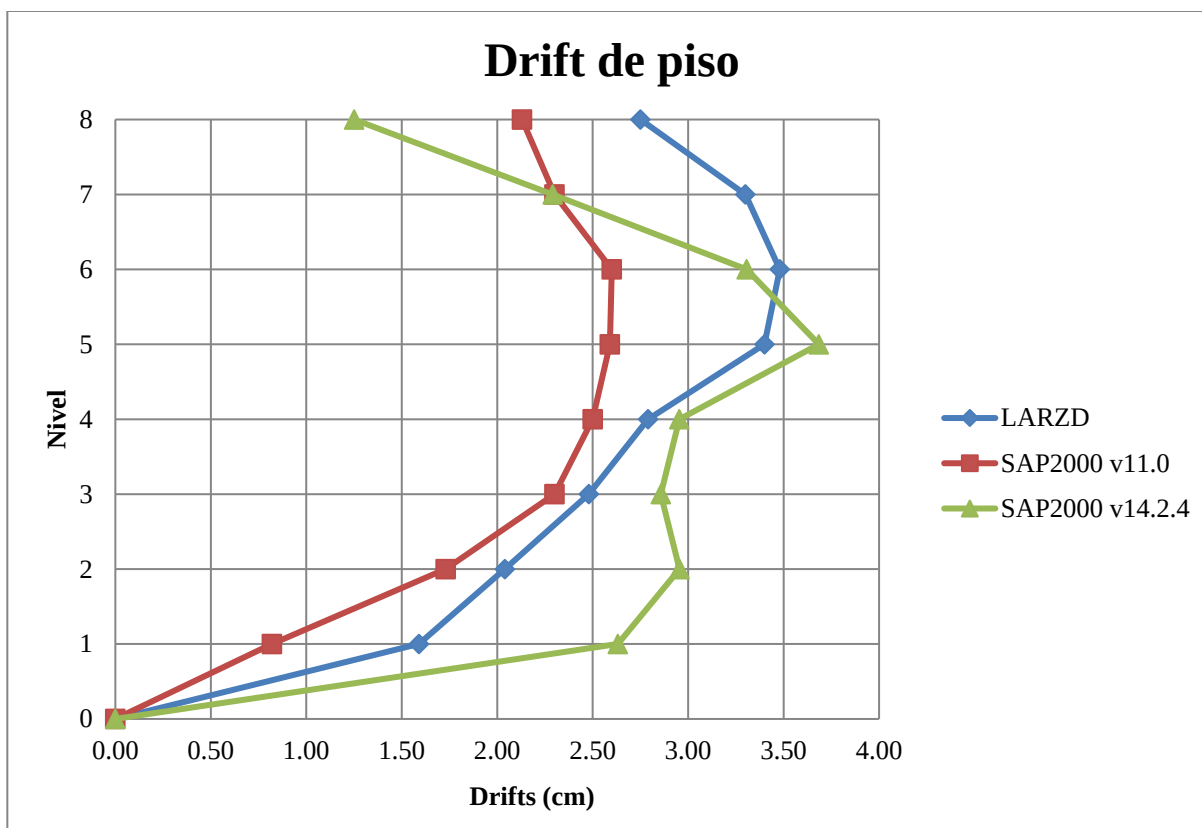


Gráfico 17: Comparación del Drifts de piso

El gráfico 17 presenta la comparación entre los drifts obtenidos y los que se presentan en el trabajo de Rosada y Altamirano. Se puede observar que se da una diferencia en la distribución de las deformaciones de entrepiso, notándose de manera más significativa entre los tres modelos en los pisos 6, 7 y 8.

III.4 ACELERACIONES ABSOLUTAS DE PISO

Se presentan a continuación las aceleraciones máximas absolutas por piso de la estructura, donde el mayor valor obtenido se da en el piso 8, con 12.74 m/s^2 .

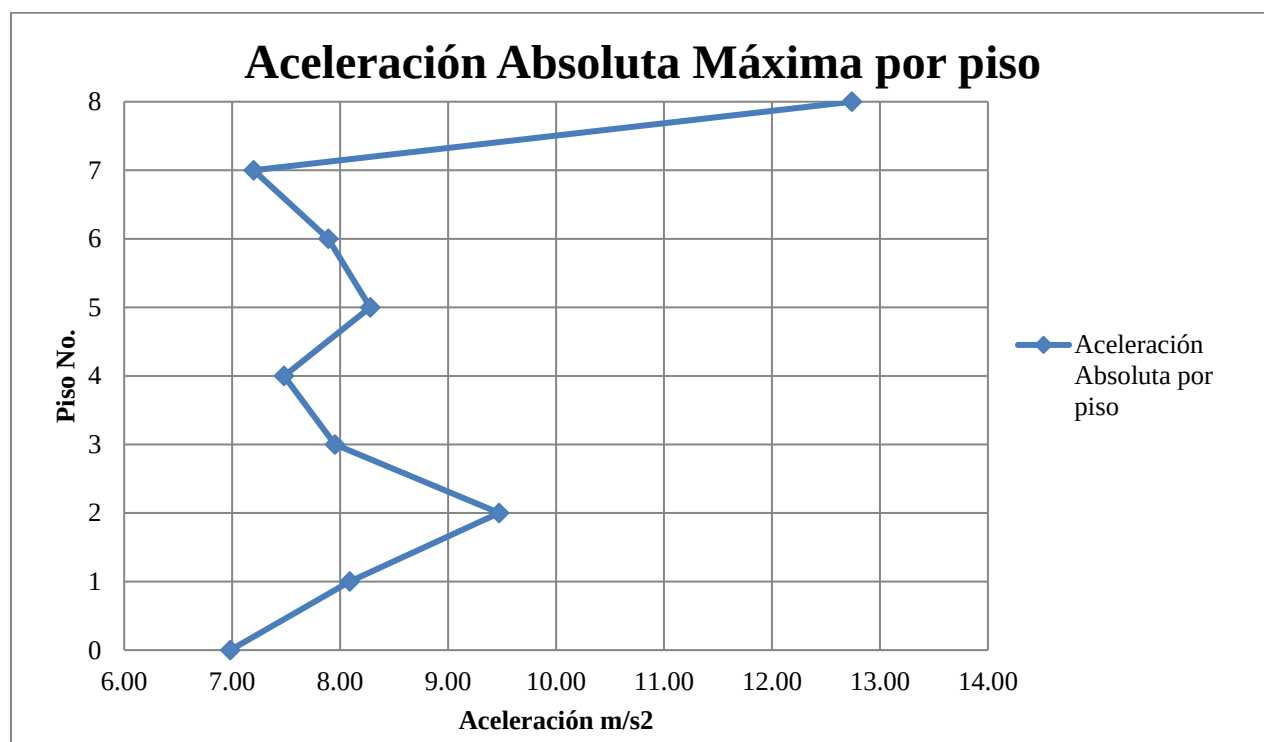


Gráfico 18: Aceleración absoluta máxima por piso

Tabla 16: Aceleración Absoluta Máxima por piso

Piso	Aceleración absoluta (m/s^2)
0	6.9827
1	8.0892
2	9.4723
3	7.9525
4	7.4807
5	8.2789
6	7.8910
7	7.1988
8	12.7400

No se tienen valores de las aceleraciones absolutas por parte de Rosada y Altamirano, por lo que este ítem queda sin posibilidad de comparación.

III.5 RÓTULAS PLÁSTICAS

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las rótulas plásticas modeladas en las vigas y columnas de la estructura. En la figura 33 se muestran las rótulas que se producen al final del análisis. El color magenta indica ductilidades locales menores que 2, mientras que el color azul magenta indica ductilidades locales mayores que 2 y menores que 3.

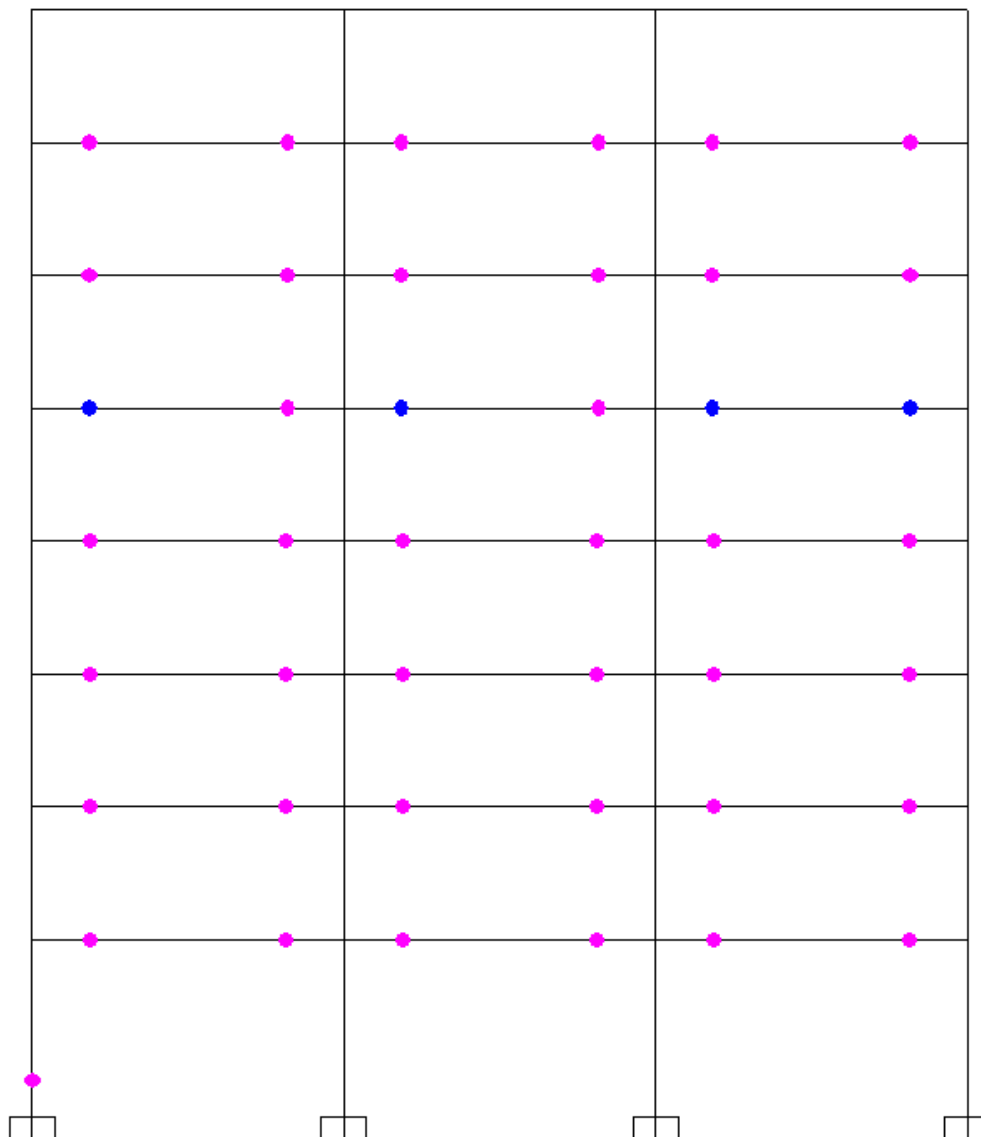


Figura 33: Rótulas plásticas

Para efectos prácticos se muestran los resultados de la viga del quinto piso del lado derecho (la más afectada), y de la columna exterior izquierda (la única que plastifica).

III.5.1 VIGAS

III.5.1.1 HISTORIA DEL MOMENTO EN EL TIEMPO

El gráfico 19 muestra la historia del momento en el tiempo. Se observa que el momento máximo absoluto que se obtiene es de 112,000.00 kgf-m, valor que es muy cercano al momento nominal negativo de la sección (112,244.00 kgf-m), con lo que se comprueba que existe plastificación en la viga.

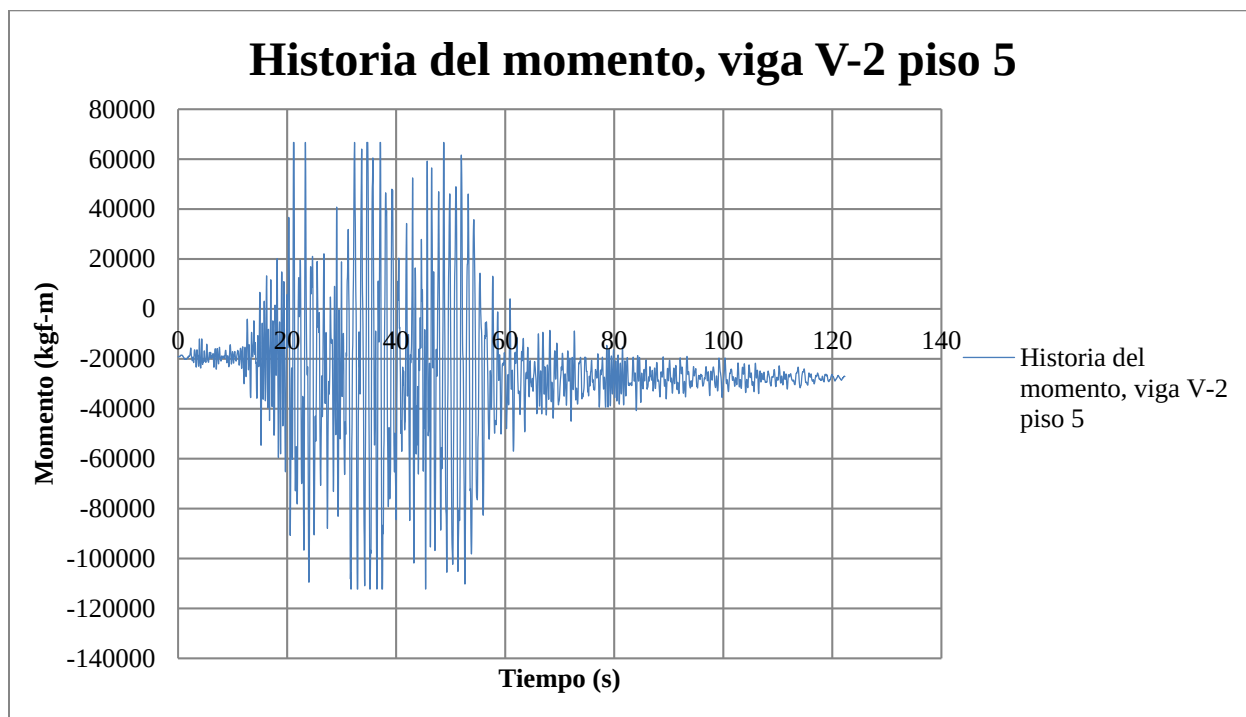


Gráfico 19: historia del momento en el tiempo, viga (elemento 53)

Para efectos de comparación de resultados con los obtenidos por Rosada y Altamirano, se presenta la historia del momento para la viga V-2 en el piso 6 (gráfico 20). En el gráfico se observa nuevamente la plastificación de la sección cuando el momento alcanza valores de 6500 tonf-cm y -11000 tonf-cm; con lo cual se confirma que para esta viga también se alcanza la plastificación.

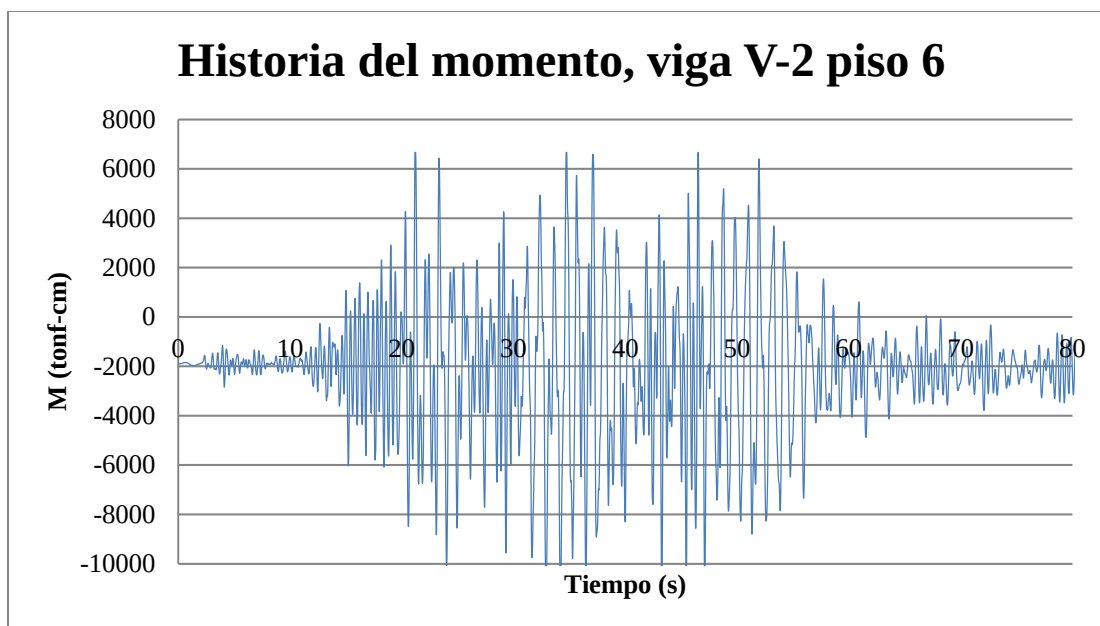


Gráfico 20: Historia del momento, viga V-2 piso 6

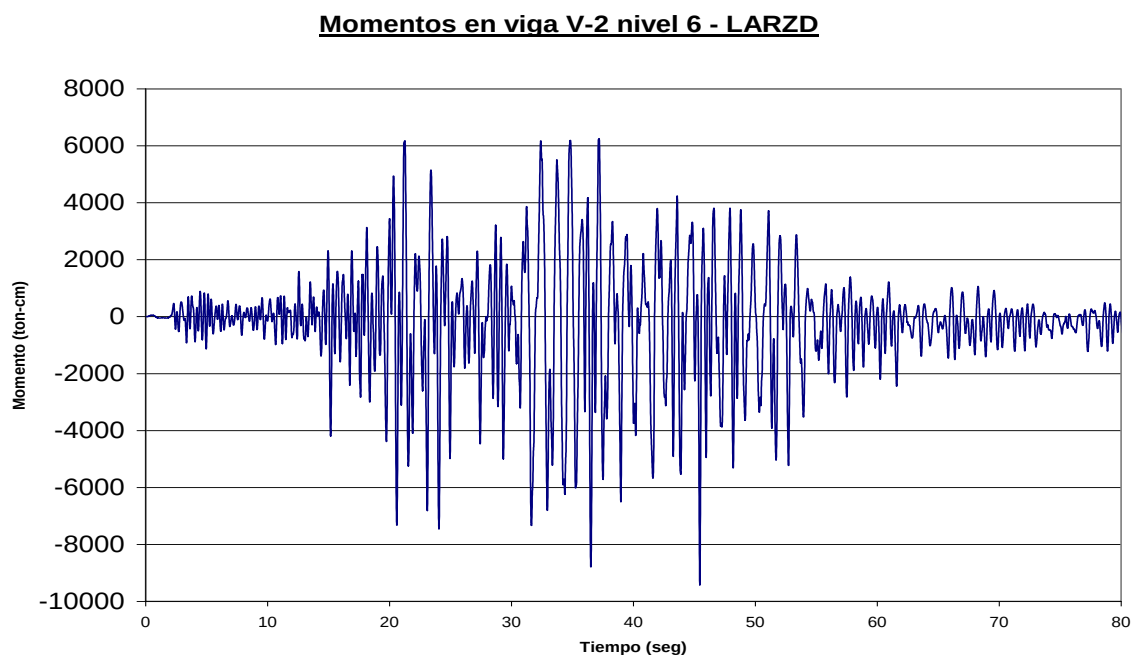


Gráfico 21: Historia del momento, LARZD (Rosada y Altamirano)

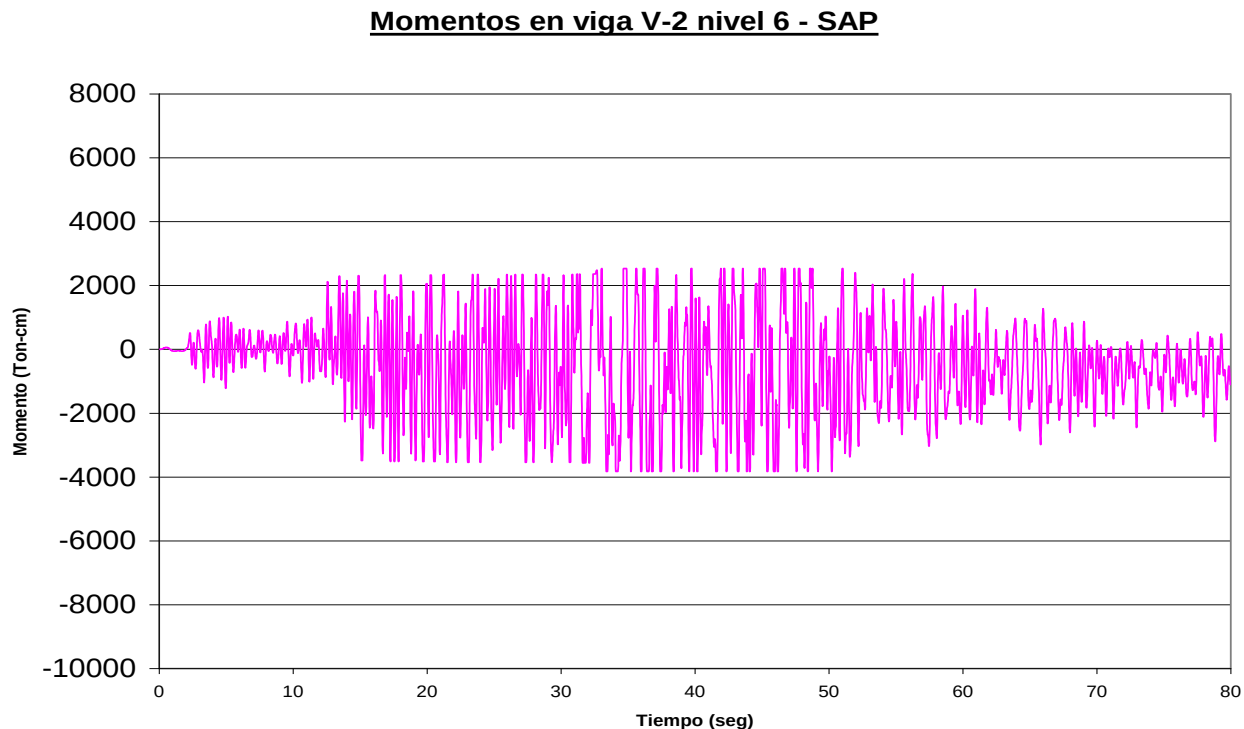


Gráfico 22: Historia del momento, SAP2000 v11.0 (Rosada y Altamirano)

Como se observa en las figuras anteriores para los valores que se obtienen en SAP v14.2.4 y LARZD la plastificación se da según lo esperado, cuando el momento alcanza valores superiores o iguales a los nominales, lo que comprueba la formación de la rótula en la sección, contrario con lo que se muestra para los resultados de SAP v11.0 en los que la sección no llega a los valores de rotura; lo cual confirma la existencia de errores en la modelación.

III.5.1.2 RESULTADOS DE RÓTULA

En la figura 34 se presentan los resultados de la rótula del extremo izquierdo de la viga del quinto piso del lado derecho, en la que se puede observar que el comportamiento bilineal de la misma es el esperado.

Se comprueba que la rótula se forma a las 21.17 segundos, cuando se llega al momento nominal positivo de la sección (66,675.00 kgf-m).

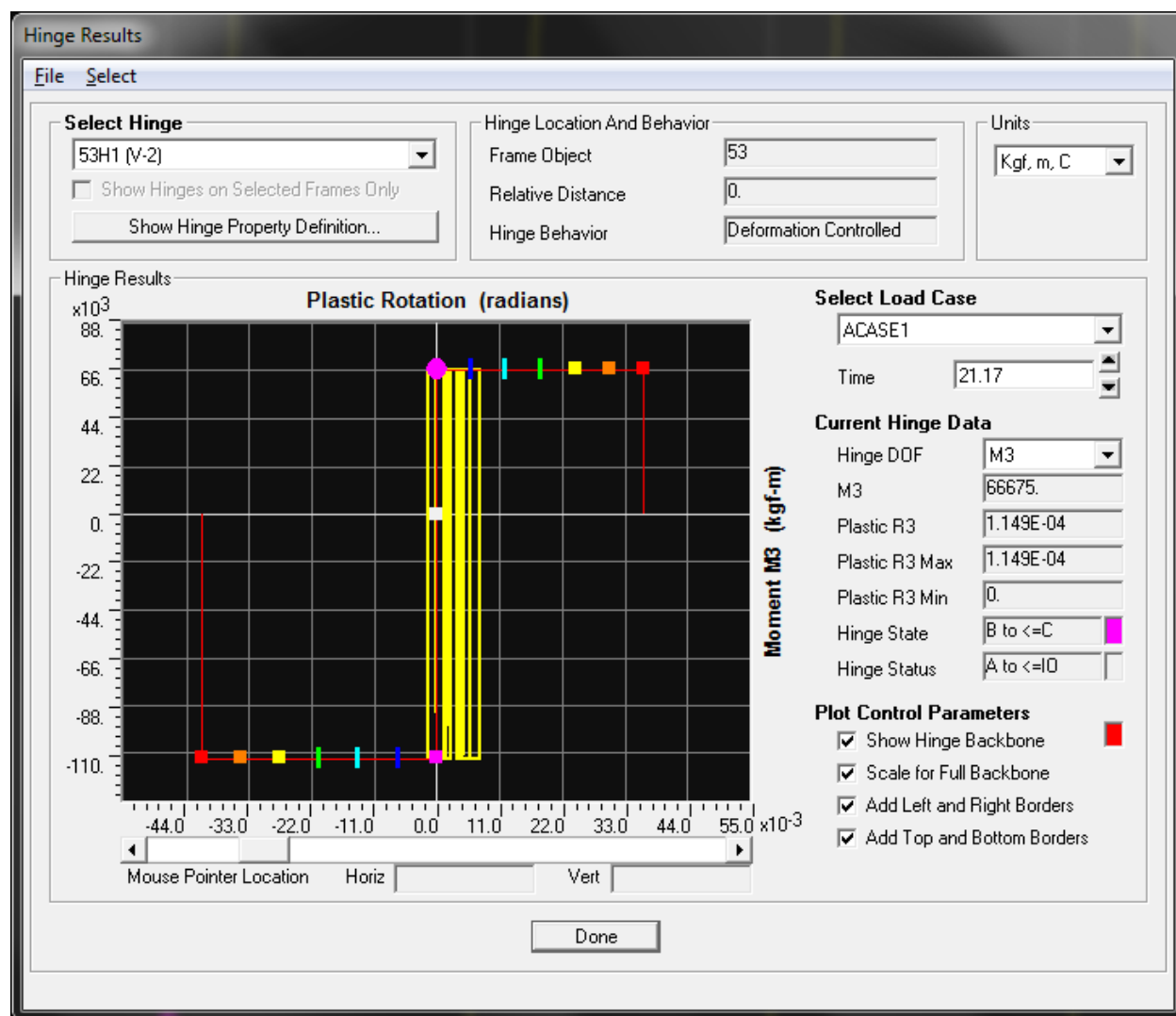


Figura 34: Resultados de Rótula

Para este ítem no se tienen valores de comparación con el trabajo de Rosada y Altamirano.

III.5.2 COLUMNAS

III.5.2.1 HISTORIA DE LA FLEXO-COMPRESIÓN EN EL TIEMPO

En la figura 35 se presenta la historia de la flexo-compresión en el tiempo.

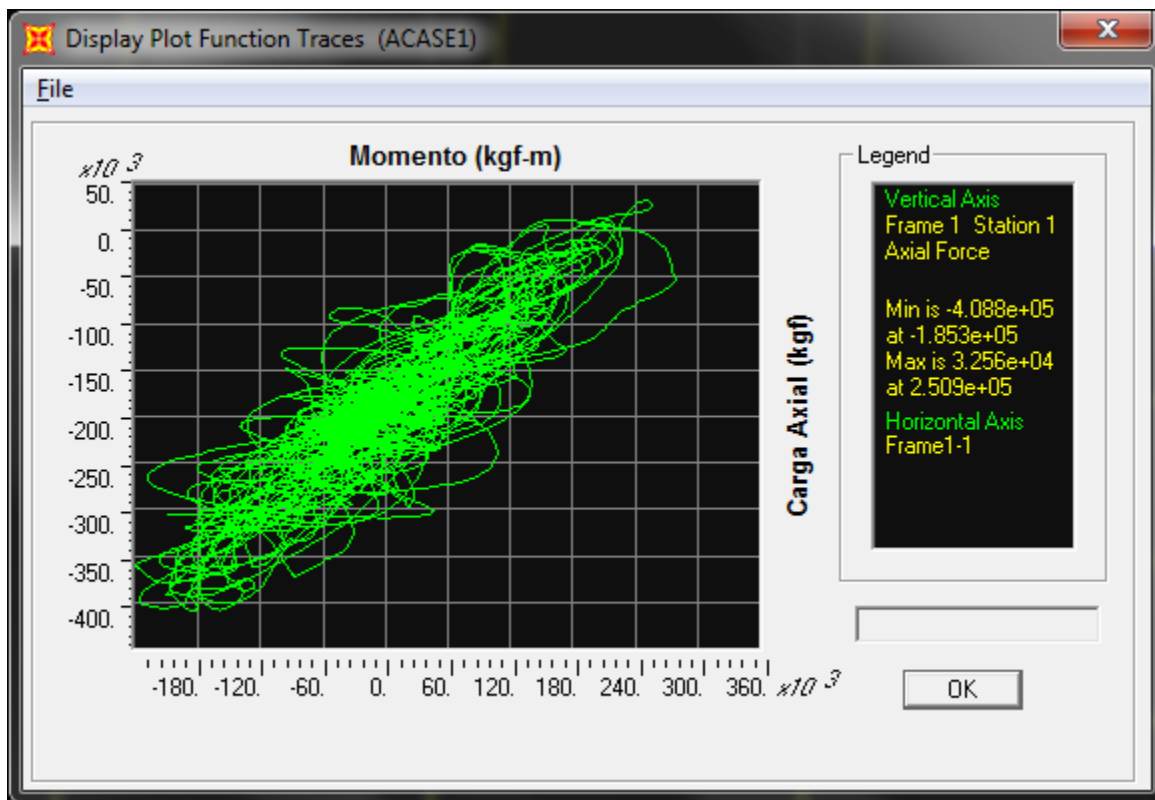


Figura 35: Historia de la flexo-compresión

En el gráfico 23 se presenta la interacción superpuesta a los valores de la historia de la flexo-compresión, para los que se observa que la columna alcanza los valores límite de la curva de interacción, con lo que se comprueba la formación de la rótula.

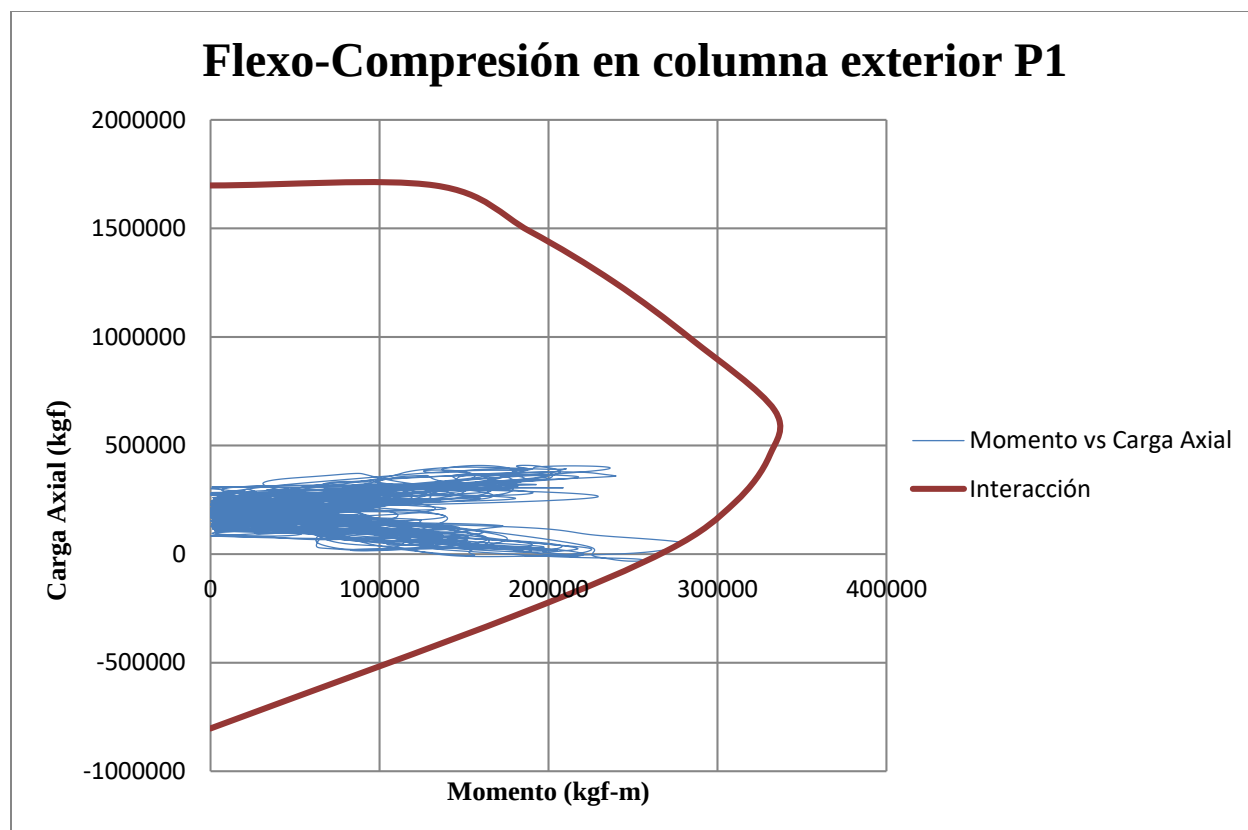


Gráfico 23: Flexo-Compresión en columna exterior P1

Para este ítem no se toman en cuenta los resultados de carga axial y momento de las columnas obtenidos por Rosada y Altamirano, ya que ellos en su trabajo no consideraron el efecto de la acción de las cargas verticales antes de la aplicación de las cargas sísmicas.

III.5.2.2 RESULTADOS DE RÓTULA

A continuación se presenta en la figura 36 los resultados de la rótula que se forma en la columna exterior izquierda del primer piso, en la que se comprueba lo que se expuso en el apartado anterior respecto de la plastificación de la sección.

Se observa que la rótula se forma a los 36.965 segundos, cuando se alcanza un momento de 278,905.52 kgf-m.

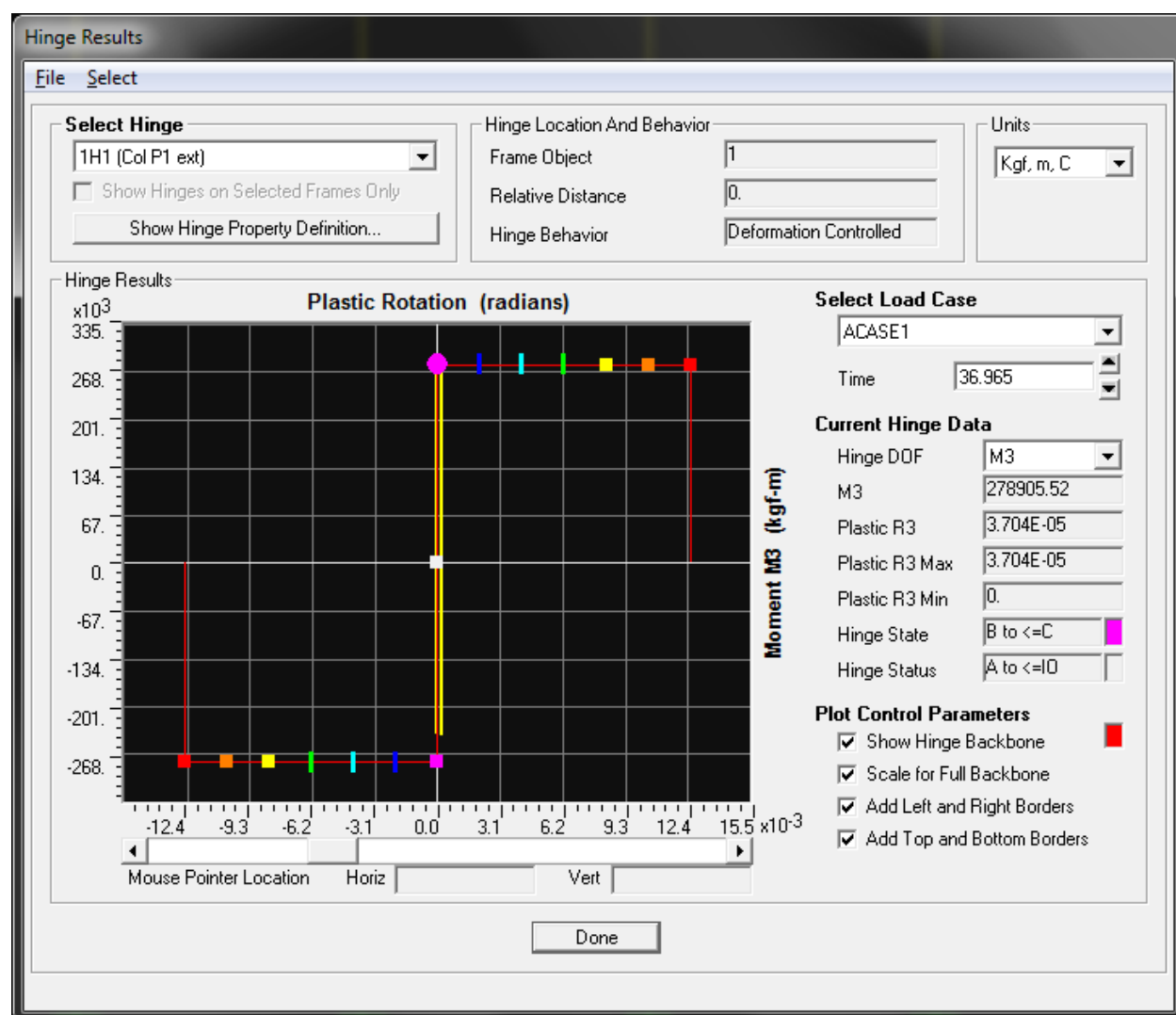


Figura 36: Resultados de rótula (flexión)

III.6 OTROS RESULTADOS

En las figuras siguientes se presentan los resultados de las rótulas correspondientes a las histéresis Kinematic y Takeda respectivamente.

Para la histéresis Kinematic se aprecia que para la viga V-2 del lado izquierdo del quinto piso funciona correctamente, ya que se alcanza la plastificación en el momento en que alcanza el momento nominal positivo (66,675.00 kgf-m) a los 21.17 s.

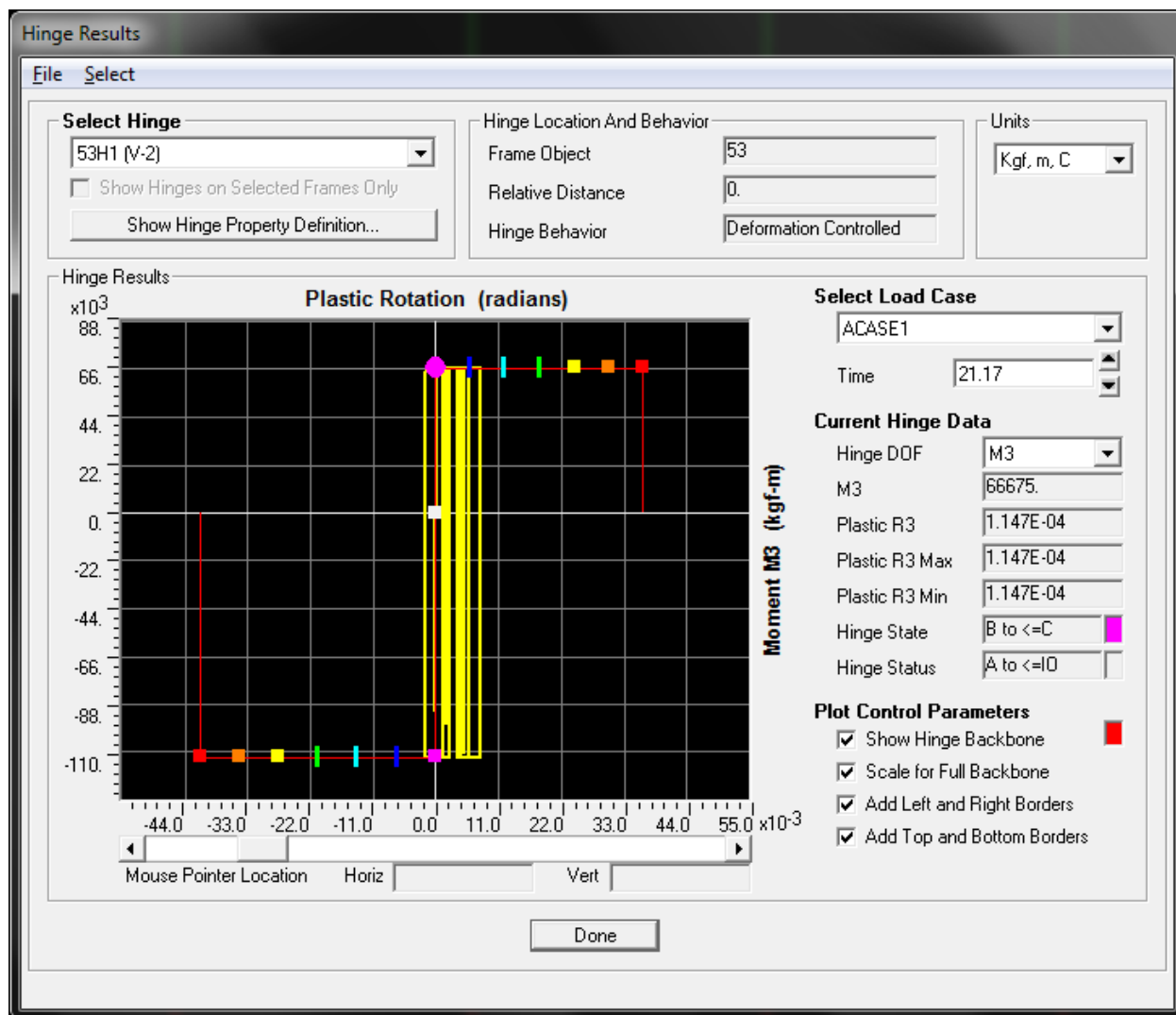


Figura 37: Resultados de rótula, histéresis Kinematic

En la figura 38 se presentan los resultados de la rótula que corresponden al uso de la histéresis Takeda para la misma viga. En los que se puede observar que SAP no logra realizar la integración correctamente cuando alcanza valores de rotación plástica superiores a 790 radianes, lo cual es erróneo y hace dudar de la capacidad de SAP para realizar un análisis no lineal usando la histéresis Takeda.

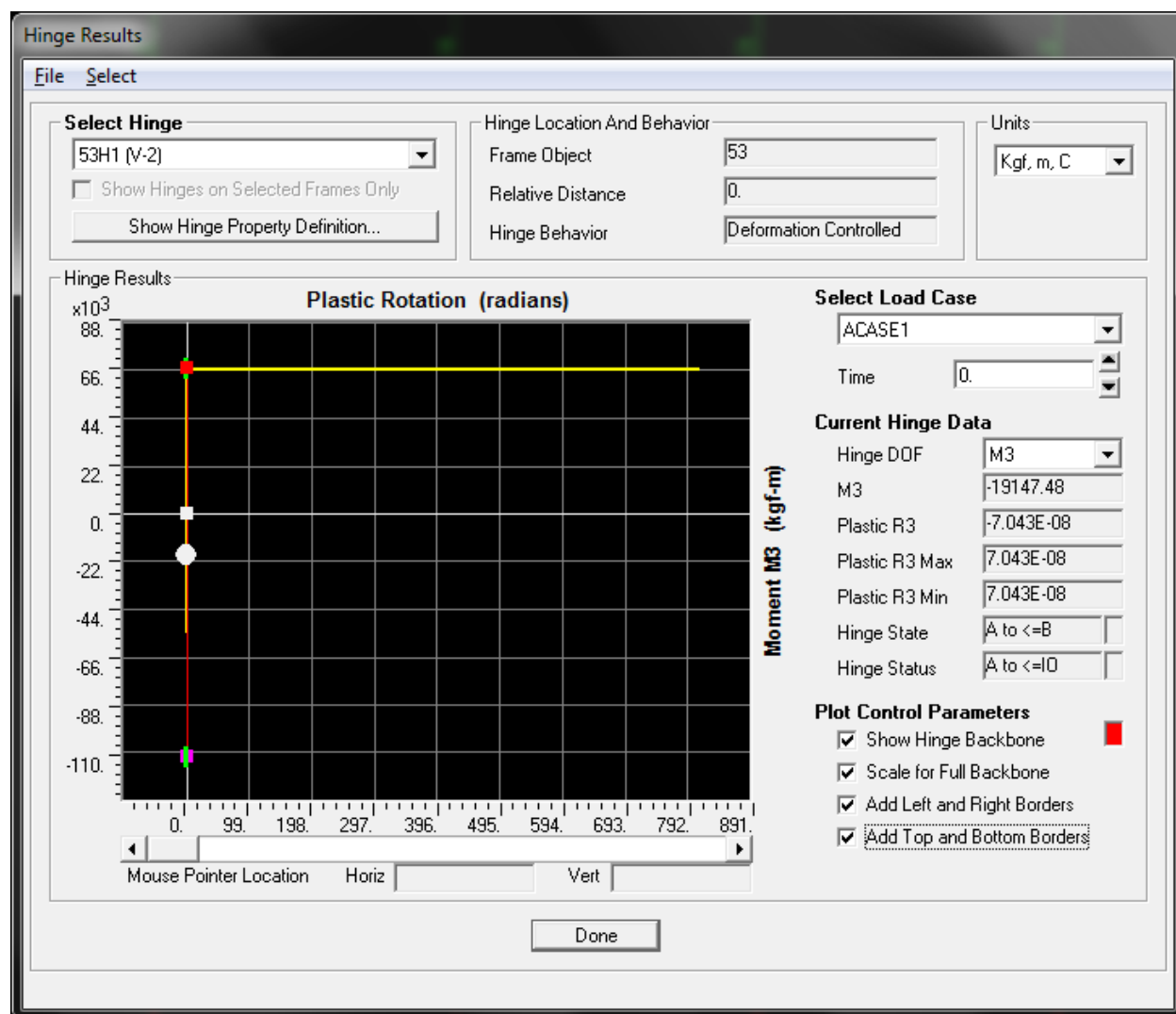


Figura 38: Resultados de rótula, histéresis Takeda

Debido a la incertidumbre causada por la falencia encontrada en SAP se decidió verificar el problema para ambas histéresis (Kinematic y Takeda) haciendo un modelo simple que consta de una viga empotrada (perfil W18x35) en un extremo con la masa calibrada para que el periodo sea de 1 s. Se sabe que para el perfil seleccionado, y usando en acero con $f_y = 36 \text{ kip/in}^2$ el momento plástico es 2394 kip-in.

En la figura siguiente se muestran los resultados de rótula usando la histéresis Takeda, como se puede apreciar SAP indica que la plastificación se alcanza cuando llega a un momento de 25.67 kip-in, lo cual es incorrecto. Con lo que se verifica la falla en la integración de SAP para este tipo de histéresis.

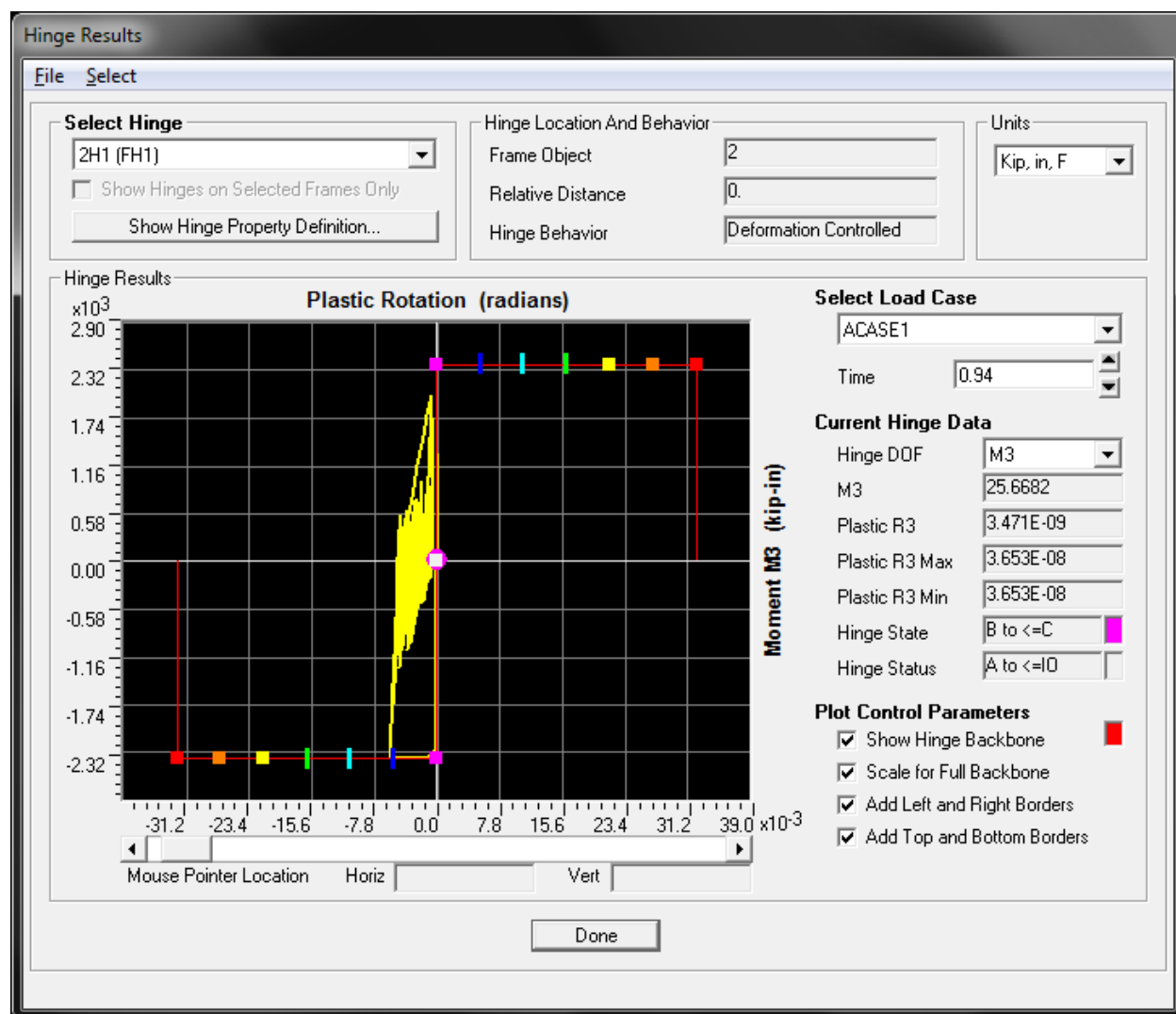


Figura 39: Verificación de resultados de rótula, histéresis Takeda

Se toma el mismo modelo para la histéresis Kinematic y se observa que los resultados del a integración fueron siempre incorrectos tal y como se muestra en la figura 40. En la que se puede observar que si bien logra alcanzar la plastificación de la sección correctamente (para un momento de 2394 kip-in), la histéresis no es correcta.

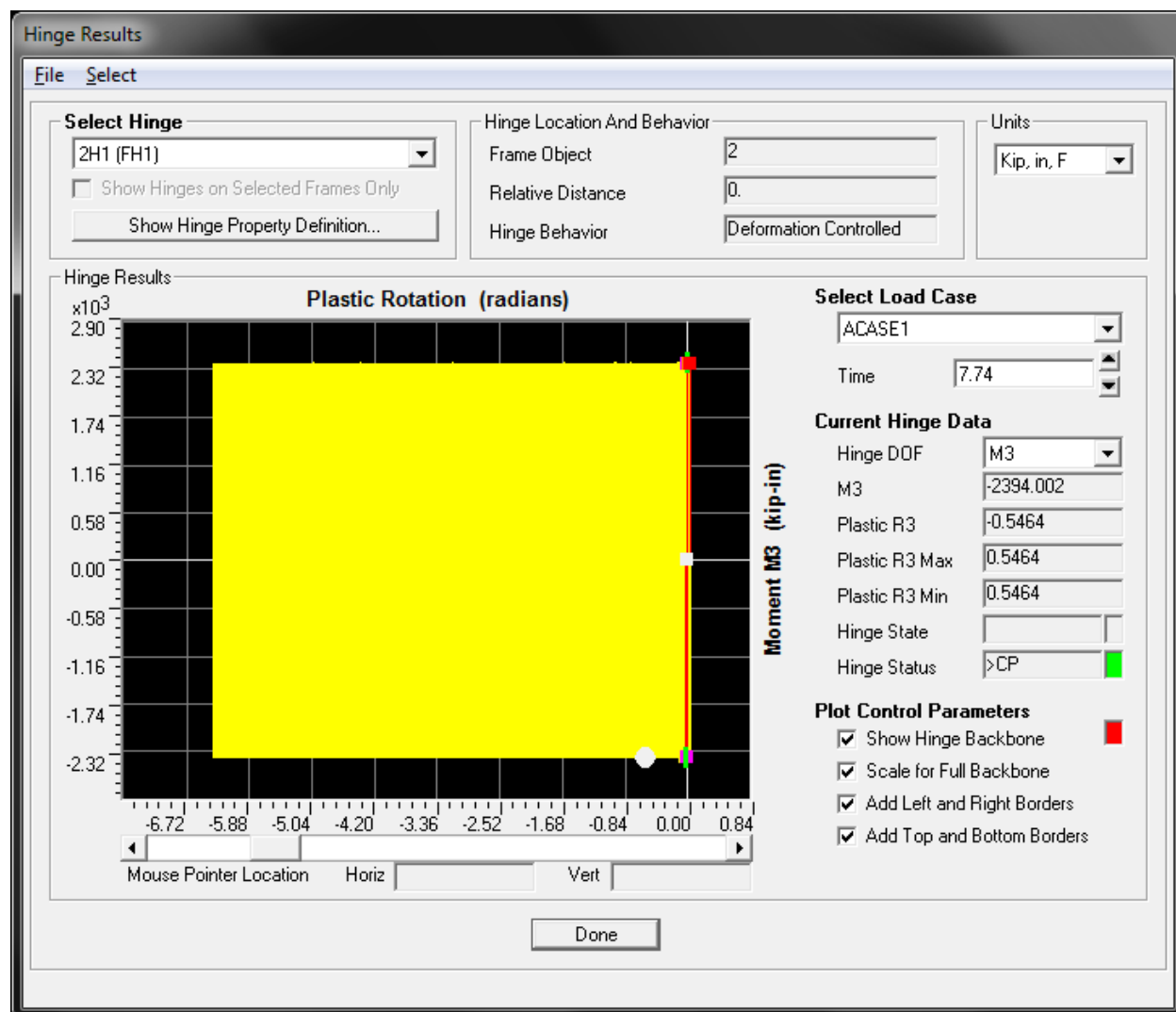


Figura 40: Verificación de resultados, histéresis Kinematic

IV CONCLUSIONES

- La comparación planteada al inicio del estudio resultó de manera satisfactoria dado que los resultados obtenidos en el análisis son en alguna medida comparables con los calculados por Rosada y Altamirano, dándose la mayor diferencia en los que corresponden a SAP2000 v11.0; tal y como ellos proponen en su trabajo existió algún problema en la modelación que no se pudo identificar.
- La diferencia en los resultados obtenidos puede tener su origen en varios factores, tales como:
 - Un error detectado en la modelación de las masas sísmicas en SAP2000 v11.0.
 - Diferencia en los criterios de los factores de reducción de rigidez.
 - Incertidumbre en cuanto al funcionamiento del programa LARZD.
 - Diferencia de criterio en la modelación de las rótulas plásticas, ya que ellos consideraron tres puntos del gráfico momento-curvatura (rotura, fluencia, estado último).
- Los resultados son satisfactorios únicamente cuando se usa el modelo isotropic, para la modelación de las rótulas a flexión en las vigas, se observó que en esta versión de SAP cuando se usan las histéresis kinematic y takeda no se obtienen valores correctos (tanto para vigas como para columnas) ya que no es capaz de integrar correctamente en cada una de ellas.
- El “Section Designer” es una buena herramienta para modelar una sección más cercana a la realidad, y al mismo tiempo más confiable para la obtención de datos tales como momentos nominales, curvaturas y curvas de interacción.

V REFERENCIAS

Mander, J. B., M. J. N. Priestley and E. Park 1984. *Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete*. Journal of Structural Engineering. ASCE. 114(3). 1084-8126.

T. Paulay, M. Priestley 1992. *Seismic Desing of Reinforced Concrete and Mansory Buildings*. John Wiley and Sons, Inc.

Computers and Structures, Inc., 1978 – 2010, *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSibridge*.

VI ANEXOS

VI.1 ANEXO A: Verificación del Momento – Curvatura (programa matlab)

Se presenta a continuación la programación realizada en matlab para la verificación de los resultados de Momento – Curvatura para la viga V-2, la cual es similar para el resto de las secciones que forman la estructura.

```

clc
clear all

% Propiedades del refuerzo

fy=4200;      %kgf/cm2
fu=4200;      %kgf/cm2
Es=2.1e6;     %kgf/cm2
Epsy=fy/Es;   %Deformación unitaria de fluencia en el acero
Epsu=2e-3;    %Deformación unitaria última en el acero
phies=8;      %Diámetro del estribo
phis1=28;     %Diámetro de barra a utilizar como refuerzo superior (punta)
phis2=28;     %Diámetro de barra a utilizar como refuerzo superior (punta)
ns1=2;        %Número de barras a utilizar como refuerzo superior
correspondiente a phis1
ns2=2;        %Número de barras a utilizar como refuerzo superior
correspondiente a phis2
phi1=25;      %Diámetro de barra a utilizar como refuerzo inferior (punta)
phi2=25;      %Diámetro de barra a utilizar como refuerzo inferior (punta)
n1=2;         %Número de barras a utilizar como refuerzo inferior
correspondiente a phi1
n2=2;         %Número de barras a utilizar como refuerzo inferior
correspondiente a phi2

% Número de capas de la sección (sin contar el refuerzo en las puntas):
N=3;
D=zeros(N,1); %Vector de distancias centro centro de refuerzo por capa
NC=zeros(N,1); %Vector de número de barras por capa

NC(1)=4;      %Número de barras en capa 1
NC(2)=2;      %Número de barras en capa 2
NC(3)=4;      %Número de barras en capa 3

B=zeros(N,1); %Vector de diámetros de barra en cada capa

% DIÁMETROS
B(1,1)=28;    %Diámetro de barra en 1ra capa (cm)
B(2,1)=28;    %Diámetro de barra en 2da capa (cm)
B(3,1)=25;    %Diámetro de barra en 3ra capa (cm)

% DISTANCIAS
D(1,1)=5.1;   %Distancia (cm) recubrimiento del refuerzo en la punta
              (superior)

```

```

D(2,1)=5.6;      %Distancia (cm) centro a centro desde refuerzo en la punta
hasta 1era capa
D(3,1)=5.6;      %Distancia (cm) centro a centro desde refuerzo en 1era capa
hasta la segunda
D(4,1)=43;       %Distancia (cm) centro a centro desde refuerzo en 2da capa
hasta la tercera
D(5,1)=5.6;      %Distancia (cm) centro a centro desde refuerzo en 3era capa
hasta la cuarta
D8=5.1;          %Distancia (cm) centro a centro desde refuerzo en la punta hasta
recubrimiento (inferior)

% Propiedades del hormigón H30
fc=250;          %kgf/cm2
Ec=238800;       %kgf/cm2
Epcu=3e-3;       %Deformación última en el hormigón
if fc<=280
    Beta1=0.85;
else
    Beta1=0.85-(fc-280)/1400;
    if Beta1<0.65
        Beta1=0.65;
    else
        Beta1;
    end
end

% Propiedades de la sección
b=55;            %Ancho base en cm
h=70;            %Altura en cm

% ÁREAS DE ACERO
Ass=pi*((phis1/10)^2/4)*ns1+pi*((phis2/10)^2/4)*ns2;      %Área de acero
superior (punta)
As=pi*((phi1/10)^2/4)*n1+pi*((phi2/10)^2/4)*n2;          %Área de acero
inferior (punta)
ds=D(1);           %d'
dp=h-D8;           %d

A=zeros(N+2,1);
A(1,1)=Ass;
A(N+2,1)=As;
x=0;

for i=2:N+1
    x=i-1;
    A(i)=pi*((B(x)/10)^2/4)*NC(x);
    A(i);
end

% SE DEFINE UNA CARGA P, PARA ENCONTRAR EL MOMENTO NOMINAL Y LA CURVATURA
CORRESPONDIENTE

% Suma de fuerzas igual a la carga P
P=0;              %ton

```

```

% Interacción para el calculo de c, verificando suma de Fuerzas
c=0; %se inicializa el valor de c
dc=0.0001; %delta c
a=1; %se inicializa la condición para la interacción

while a>=0
    c=c+dc;
    for i=1:N+2
        d(i)=sum(D(1:i));
        Eps(i)=Epcu*((c-d(i))/c); %deformación unitaria de acero en
    capa i (valor negativo indica tracción)
        if abs(Eps(i))>Epsy
            Eps(i)=sign(Eps(i))*Epsy;
        else
            Eps(i);
        end
        Fs(i)=Eps(i)*Es*A(i)/1000; %fuerza que actúa en capa i de
    acero (ton)
        Cc=0.85*fc*Beta1*c*b/1000; %Compresión en el hormigón (ton)
    end
    Q=sum(Fs(:))+Cc-P; %suma de fuerzas igual a cero
    if abs(Q)<=0.01
        Q;
        for k=1:N+2
            d(k)=sum(D(1:k));
            Dcg(k)=abs(h/2-d(k))/100; %distancias al centro
        geométrico (m)
            Ms(k)=abs((Fs(k)))*Dcg(k); %momento que produce la fuerza en
        capa k (ton) tomado al centro geométrico de la sección
        end
        Mn=sum(Ms(:))+Cc*((h/2-(Beta1*c/2))/100); %Momento nominal de la
    sección (ton*m), tomado al centro geométrico de la sección
        phi=Epcu/(c/100);
    %curvatura en m
        a=-1;
    else
        a=1;
    end
end
Dcg=Dcg';
Fs=Fs';
d=d';
Ms=Ms';

Q
Mn
phi
c

```

VI.2 Anexo B: Verificación de curva de interacción (programa matlab)

Se presenta a continuación el programa confeccionado en matlab con el que se verificaron las curvas de interacción para las columnas propuestas.

```

clc
clear all

% Propiedades del refuerzo

fy=2800;      %kgf/cm2
fu=4400;      %kgf/cm2
Es=2.1e6;     %kgf/cm2
Epsy=fy/Es;   %Deformación unitaria de fluencia en el acero
Epsu=2e-3;    %Deformación unitaria última en el acero
phies=8;      %Diámetro del estribo
phis=25;      %Diámetro de barra a utilizar como refuerzo superior
ns=3;         %Número de barras a utilizar como refuerzo superior
phi=25;       %Diámetro de barra a utilizar como refuerzo inferior
n=3;         %Número de barras a utilizar como refuerzo inferior

% Propiedades del hormigón H25

fc=200;       %kgf/cm2
Ec=213600;    %kgf/cm2
Epcu=3e-3;    %Deformación última en el hormigón
Beta=0.85;

% Propiedades de la sección

b=30;         %Ancho base en cm
h=50;         %Altura en cm
rec=1.95;     %Recubrimiento en cm

Ass=pi*((phies/10)^2/4)*ns;      %Área de acero superior
As=pi*((phi/10)^2/4)*n;         %Área de acero inferior
ds=rec+phies/10+phis/(10*2);
d=h-(phies/10+rec+phi/(10*2));

%Compresión pura

Ac=b*h-(Ass+As);                %Área total de hormigón
Cc1=0.85*fc*Ac;                %Compresión en hormigón
Css1=fy*Ass;                    %Compresión en acero superior
Cs1=fy*As;                      %Compresión en acero inferior
P1=.8*(Cc1+Css1+Cs1)/1000      %En ton

%Tracción pura

Tc1=0;                          %Se considera que el concreto no trabaja en tracción

```

```

Tss1=fy*Ass;           %Tracción en acero superior
Ts1=fy*As;             %Tracción en acero inferior
T1=-(Tss1+Ts1)/1000    %En ton

%FLEXIÓN PURA

%Suma de fuerzas debe ser igual a cero
syms c1 %variable simbólica

%Compresión en acero superior
Epss2=Epcu*((c1-ds)/c1);
fss2=Epss2*Es;
Css2=fss2*Ass/1000;

%Compresión en concreto
Cc2=0.85*fc*Beta*c1*b/1000;

%Tracción en acero inferior
Ts2=Epsy*Es*As/1000;

%Suma de fuerzas
S1=Css2+Cc2-Ts2;

%Solución de la ecuación para c1
c1=solve(S1,c1);
c1=eval(c1);

if c1(1)>0
    cf=c1(1);
else
    cf=c1(2);
end
cf;

c1=cf;

%Compresión en acero superior
Epss2=Epcu*((c1-ds)/c1);
fss2=Epss2*Es;
Css2=fss2*Ass/1000;

%Compresión en concreto
Cc2=0.85*fc*Beta*c1*b/1000;

%Suma de momentos en torno a d (As)
af=Beta*cf;
hsf=(d-ds)/100; %distancia hasta barra refuerzo superior (m)
hcf=(d-af/2)/100; %distancia hasta fuerza resultante de compresión en
concreto (m)

Msf=Css2*hsf+Cc2*hcf

%Comprobación de que la suma de fuerzas es igual a cero
Pf=Css2+Cc2-Ts2;

```

```

%Curvatura en flexión pura (cuando P=0)
phi_y=Epsy/(d-cf);
Phi_u=Epcu/cf

%PUNTO DE BALANCE
%Se supone compresión máxima en el concreto y tracción máxima en el acero
%Se toman momentos en torno al eje centroidal de la sección

cb=Epcu*d/(Epsu+Epcu); %distancia c para el punto de balance

%Compresión en acero superior
Epss3=Epcu*((cb-ds)/cb);

if Epss3>Epsy
    Epss3=Epsy;
    fss3=fy;
else
    Epss3;
    fss3=Epss3*Es;
end

Epss3;
fss3;
Css3=fss3*Ass/1000;

%Compresión en concreto
ab=Beta*cb;
Cc3=0.85*fc*ab*b/1000;

%Tracción en acero inferior
fsb=Epsy*Es;
Ts3=fsb*As/1000;

%Fuerza de balance Pb
Pb=Css3+Cc3-Ts3

%Distancias para el cálculo del Mn

hssb=(h/2-ds)/100; %distancia hasta el centro de las barras superiores (m)
hcb=(h/2-ab/2)/100; %distancia hasta la fuerza resultante del concreto (m)
hsb=(h/2-ds)/100; %distancia hasta el centro de las barras superiores (m)

%Momento de balance Mb
Mnb=Css3*hssb+Cc3*hcb+Ts3*hsb

%Curvatura en punto de balance
%phib=Epcu/cb

%PIVOTE (se varia el valor de c)

```



```

i=ceil(ds);
n=floor(d);
x=0;

for c=i:n;
    x=x+1;
    Epss(x)=Epcu*( (c-ds)/c );
    fss(x)=Epss(x)*Es;
    if Epss(x)>Epsy
        Epss(x)=Epsy;
        fss(x)=fy;
    else
        Epss(x);
        fss(x);
    end
    Epss(x);
    fss(x);
    Css(x)=fss(x)*Ass/1000;           %Compresión en acero superior
    Eps(x)=Epcu*( (d-c)/c );
    fs(x)=Eps(x)*Es;
    if Eps(x)>Epsy
        Eps(x)=Epsy;
        fs(x)=fy;
    else
        Eps(x);
        fs(x);
    end
    Eps(x);
    fs(x);
    T(x)=fs(x)*As/1000;               %Tensión en acero inferior
    Cc(x)=0.85*fc*Beta*c*b/1000;      %Compresión en concreto
    P(x)=Cc(x)+Css(x)-T(x);           %Sumatoria de fuerzas
    if P(x)>=P1                        %Condicionante P nunca puede ser mayor
        que P de compresión pura
        P(x)=P1;
    else
        P(x);
    end
    P(x);
    M(x)=Cc(x)*(h/2-Beta*c/2)/100+Css(x)*(h/2-ds)/100+T(x)*(h/2-ds)/100;
    %Suma de momentos respecto al centro de gravedad
end

M=M';
P=P';

%Ploteo de puntos encontrados
plot(0,P1,'r*',0,T1,'r*',Msf,0,'r*',Mnb,Pb,'r*',M,P,'c-')

```