



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**EFFECTOS DEL LEVANTAMIENTO EN
UNA ESTRUCTURA ESBELTA AISLADA
CON PENDULOS DE FRICCIÓN EN
SAP2000 CONSIDERANDO
INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA**

MARCOS EDUARDO PANIAGUA YOST

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

Profesor Supervisor:

JOSE LUIS ALMAZAN CAMPILAY

Santiago de Chile, octubre, 2020.

A mis padres Marco Antonio y
Francia Celeste y a mis hermanos
Miguel José y Franklin Javier.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer a mi Señor y Salvador Jesús quien en medio de mi rebeldía hacia El me brindó salvación por medio de su evangelio. En medio de la soledad que experimente en Chile, Su Palabra fue aliento de esperanza para mi y su provisión sin falta alguna.

Agradezco a mis padres por el soporte emocional y económico que fueron para mí, durante el tiempo que habite en Chile nunca faltaron sus llamadas de cariño y aliento que me hacían levantarme con ánimo para seguir adelante.

Agradezco a mis hermanos que siempre estuvieron dispuestos a tener largas conversaciones conmigo para buscar consejo o para simplemente saber como estaba, realmente me hicieron sentir como un hermano mayor aun en la distancia.

Agradezco a Javier Crespo por ser un amigo más unido que un hermano el cual soporto mis llamadas constantes y mis quejas, animándome y energizándome cada vez que compartíamos.

Agradezco a Claudia Oses por haber sido tan amorosa al recibirme en su casa y permitirme habitar en ella durante un año y tres meses sin quejarse ni una sola vez.

Agradezco a la Pontificia Universidad Católica de Chile por haberme dado la oportunidad de ser su estudiante y por haberme preparado de una manera mucho mayor de la que siquiera yo estaba pensando.

Agradezco a la AGCID por permitirme participar de la Beca Kizuna para realizar mis estudios y por la paciencia que han tenido en medio de todo el tema de la pandemia.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es evaluar el efecto que el fenómeno del levantamiento tiene sobre el caso de estudio, el cual es una estructura esbelta aislada con dispositivos de péndulo de fricción en la cual se considerará interacción suelo estructura. El caso de estudio es una estructura de marcos resistentes a momento de concreto reforzado de 10 pisos, se supuso que ya que la estructura contaría con aisladores sísmicos esta se comportaría lineal elástica y fue modelada en el software SAP2000®. Se utilizó un modelo simplificado de resortes para tomar en cuenta la interacción suelo estructura a partir de las propiedades del suelo en cuestión y las dimensiones de las fundaciones que en su momento se definieron como superficiales. Se definió tres tipos de modelos entre los cuales se harán comparaciones: uno considerando el suelo como infinitamente rígido, o sea, empotrado, otro considerando un suelo tipo intermedio y otro con un suelo duro. Se propone realizar análisis tiempo historia no lineal bajo excitaciones sísmicas en estos modelos con el cual se pueden evaluar los efectos que el levantamiento impone a la respuesta global de la estructura y a la local de los aisladores, también tomando en cuenta el efecto de considerar acoplamiento de los registros en diferentes direcciones.

ABSTRACT

The objective of the present work is to evaluate the effect that the uplifting phenomenon has on the case study, which is an isolated slender structure with friction pendulum devices in which soil-structure interaction was be considered. The case study is a 10-story reinforced concrete moment-resistant frame structure, it was assumed that since the structure would have seismic isolators it would behave linear elastic and was modeled in the SAP2000® software. A simplified model of springs was used to take into account the soil structure interaction based on the properties of the soil in question and the dimensions of the foundations that were defined as superficial at the time. Three types of models were defined between which comparisons will be made: one considering the soil as infinitely rigid, that is, embedded, another considering an intermediate type soil and another with a hard soil. It is proposed to perform non-linear time-history analysis under seismic excitations in these models with which the effects that the uplift imposes on the global response of the structure and the local response of the isolators can be evaluated, also taking into account the effect of considering coupling of records in different directions.

INDICE DE GENERAL

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
INDICE DE TABLAS	8
INDICE DE FIGURAS.....	10
1. Introducción.....	14
1.1 Motivación del estudio.....	14
1.2 Objetivo General.....	16
1.3 Objetivos Específicos.....	16
2. Modelamiento del caso de estudio en SAP2000®.....	17
2.1 Aspectos generales.....	17
2.2 Propiedades y consideraciones de rigidez de la superestructura.....	18
2.3 Propiedades y consideraciones de masa de la superestructura.....	21
2.4 Propiedades modales de la super estructura.....	23
3. Aisladores de sistema de péndulo de fricción (FPS)	26
3.1 Propiedades del péndulo de fricción.....	26
4. Incorporación de los aisladores FPS dentro del modelo de SAP2000®.....	36
4.1 Modelo estructural	36
4.2 Método de análisis para cuantificación de fuerzas y desplazamientos	37
4.3 Integrador HHT – Método α	40
4.4 Masa considerara a partir de los patrones de carga	41
4.5 Amortiguamiento del sistema.....	42
4.6 Resultados de análisis y dimensionamiento de los aisladores de péndulo de fricción	45
5. Incorporación de interacción suelo estructura dentro del modelo de SAP2000®.....	48
5.1 Representación del modelo estructural	48

5.2	Modelo numérico de los resortes.....	49
6.	Resultados de análisis tiempo historia bajo registros sísmicos	55
6.1	Metodología.....	55
6.2	Análisis tiempo historia no lineal	55
6.3	Registros sísmicos seleccionados	56
6.4	Respuesta global	59
6.4.1	Drift de entrepiso	59
6.4.2	Aceleraciones de techo	65
6.4.3	Corte basal.....	69
6.5	Respuesta local	70
6.5.1	Histéresis deformación lateral vs. Fuerza lateral.....	70
6.5.2	Fuerza axial y levantamiento.....	75
6.6	Comentarios respecto al análisis modal no lineal.....	90
7.	Conclusiones.....	94
8.	Bibliografía.....	97

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1 Propiedades propuestas del concreto para el caso de estudio.....	18
Tabla 2-2 Tabla de secciones de elementos y modificadores de propiedades geométricas.	18
Tabla 2-3 - Densidad asumida del material.....	22
Tabla 2-4 - Masa total del sistema por peso propio del caso de estudio.	22
Tabla 2-5 - Masa total por cargas adicionales del caso de estudio.	23
Tabla 2-6 - Periodos y participación de masa modal de la superestructura.	25
Tabla 4-1 Factores de participación de los patrones de carga en la masa total de la estructura.	41
Tabla 4-2 Fuerzas de compresión soportada por cada aislador.	45
Tabla 4-3 Propiedades físicas de los aisladores internos y externos.	46
Tabla 5-1 Tipos de suelo.	49
Tabla 5-2 Propiedades de los suelos.	50
Tabla 5-3 Dimensiones de zapatas.....	51
Tabla 5-4 Propiedades de resorte y amortiguador para representar el suelo.....	51
Tabla 6-1 Aceleraciones máximas de los registros sísmicos.....	57
Tabla 6-2 Fuerzas axiales y deformaciones máximas en los aisladores para el registro de Sylmar.	79
Tabla 6-3 Fuerzas axiales y deformaciones máximas en los aisladores para el registro de Newhall.	82

Tabla 6-4 Fuerzas axiales y deformaciones máximas en los aisladores para el registro de Lucerne.....	85
Tabla 6-5 Fuerzas axiales y deformaciones máximas en los aisladores para el registro de JMA.....	88

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1 Sistema de péndulo Simple (Briseghella, et al., 2013)	15
Figura 2-1 Esquema general de superestructura para el caso de estudio.	17
Figura 2-2 Puntos de inserción de los elementos estructurales que componen el caso de estudio.	19
Figura 2-3 Uniones de elementos viga columna.....	19
Figura 2-4 Elemento de área tipo Shell (Computers and Structures Inc., 1999).....	20
Figura 2-5 Esquema general del modelo 3D en SAP2000®.....	21
Figura 3-1 Forma de movimiento y fuerzas actuantes en el aislador FPS.	26
Figura 3-2 Elemento de péndulo de fricción simple para comportamiento de corte biaxial en SAP2000® (Computers and Structures Inc., 1999).....	29
Figura 3-3 Lazo de histéresis del aislador de péndulo de fricción simple.	31
Figura 3-4 Componentes del lazo de histéresis de un aislador de péndulo de fricción.	33
Figura 4-1 Planta de nivel de aislación e isométrica del caso de estudio con aisladores integrados.	37
Figura 4-2 Definición de función rampa.....	38
Figura 4-3 Definición del análisis tiempo historia no lineal bajo la función rampa.....	39
Figura 4-4 Parámetros de método de integración.	41
Figura 4-5 Representación gráfica del a) amortiguamiento modal proporcional a la masa y a la rigidez y b) amortiguamiento de Rayleigh (Chopra, 2012).....	43

Figura 4-6 Factores de amortiguamiento respecto al crítico utilizado para análisis tiempo historia no lineal con función rampa.....	44
Figura 4-7 Propiedades de los aisladores externos.	46
Figura 5-1 Esquema general de modelo de interacción suelo estructura.	48
Figura 5-2 Representación de la flexibilidad del suelo I.....	52
Figura 5-3 Representación de la flexibilidad del suelo II.	53
Figura 5-4 Rigidez del elemento gap utilizado en ambos sistemas.	54
Figura 6-1 Amortiguamiento asignado para análisis tiempo historia no lineal con excitaciones sísmicas.	56
Figura 6-2 Componentes de aceleraciones de registros sísmicos.	58
Figura 6-3 Drift máximos absolutos de los sistemas y respuesta en el tiempo del piso 5 para el registro de Sylmar.	60
Figura 6-4 Drift máximos absolutos de los sistemas y respuesta en el tiempo del piso 6 para el registro de Newhall.	61
Figura 6-5 Drift máximos absolutos de los sistemas y respuesta en el tiempo del piso 3 para el registro de Lucerne.....	63
Figura 6-6 Drift máximos absolutos de los sistemas y respuesta en el tiempo del piso 7 para el registro de JMA.....	64
Figura 6-7 Aceleraciones para los distintos análisis del registro de Sylmar y aceleración en el tiempo del techo para el caso de suelo infinitamente rígido.....	65
Figura 6-8 Aceleraciones para los distintos análisis del registro de Newhall y aceleración en el tiempo del techo para el caso de suelo infinitamente rígido.....	66

Figura 6-9 Aceleraciones para los distintos análisis del registro de Lucerne y aceleración en el tiempo del techo para el caso de suelo infinitamente rígido.....	67
Figura 6-10 Aceleraciones para los distintos análisis del registro de JMA y aceleración en el tiempo del techo para el caso de suelo infinitamente rígido.	68
Figura 6-11 Corte basal máximo en la dirección X (trans.) para todos los análisis y modelos.	69
Figura 6-12 Diagrama de histéresis en dirección transversal para el registro de Sylmar Dir. (X).....	71
Figura 6-13 Diagrama de histéresis en dirección transversal para el registro de Sylmar Dir. (X-Y).....	72
Figura 6-14 Diagrama de histéresis en dirección transversal para el registro de Sylmar Dir. (X-Y-Z).	74
Figura 6-15 Respuesta en el tiempo lateral y axial para el registro de Sylmar, Aislador 1.	76
Figura 6-16 Respuesta en el tiempo lateral y axial para el registro de Sylmar (X), Aislador 3.....	78
Figura 6-17 Representación gráfica de las fuerzas axiales máximas y levantamiento máximo del registro de Sylmar.	80
Figura 6-18 Representación gráfica de las fuerzas axiales máximas y levantamiento máximo del registro de Newhall.	83
Figura 6-19 Representación gráfica de las fuerzas axiales máximas y levantamiento máximo del registro de Lucerne.....	86
Figura 6-20 Representación gráfica de las fuerzas axiales máximas y levantamiento máximo del registro de JMA.....	89

Figura 6-21 Diagrama de histéresis en dirección transversal para el registro de Sylmar Dir. (X) con análisis FNA.	91
Figura 6-22 Respuesta en el tiempo lateral y axial para el registro de Sylmar (X), Aislador 1 con análisis FNA.....	92

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación del estudio

En nuestros días la aislación de base es una propuesta viable para la mitigación del daño esperado en estructuras bajo acciones sísmicas debido a la gran base de datos analítica y validación experimental que existe. Este concepto se basa en desacoplar la estructura del suelo mediante un sistema más flexible en la base que funciona como un filtro para el contenido de frecuencias del sismo y permitiendo que solo ciertas frecuencias exciten dicha estructura, reduciendo significativamente la demanda de deformaciones de entrepiso y por ende la demanda de esfuerzos sobre los elementos. Sin embargo, bajo las condiciones de una estructura esbelta, o sea con una relación altura-ancho altas, los soportes de aislamiento pueden experimentar esfuerzos de tracción axial o levantamiento, los cuales según (Panayiotis C., 2009) no son deseables ya que estas ocurrencias pueden tener efectos perjudiciales sobre dicho sistema de aislamiento y en la estructura.

Tal es el caso estructuras esbeltas aisladas con sistemas de péndulo de fricción simple, ya que estos al experimentar alguna aceleración vertical positiva no ofrecen ninguna resistencia y simplemente se levantan, al caer nuevamente en su base por acciones de gravedad generan fuerzas de impacto que realmente serian apreciables e importantes de tomar en cuenta al momento de diseño de dichos elementos y de las fundaciones.

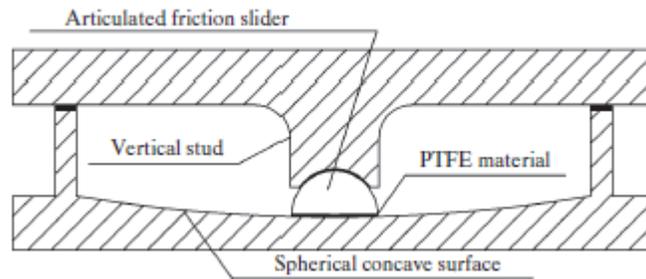


Figura 1-1 Sistema de péndulo Simple (Briseghella, et al., 2013)

En la Figura 1-1 se presenta brevemente el soporte de un sistema de péndulo de fricción simple. Este es un dispositivo basado en el deslizamiento que consta de una superficie esférica de acero inoxidable en el plato inferior el cual se vincula con el plato superior a través de un deslizador en forma de lenteja el cual tiene un recubrimiento de politetrafluoroetileno (PTFE), o mejor conocido como Teflón, en la interfaz con la base de acero con el fin de generar disipación de energía por la fricción entre ambos materiales (Briseghella, et al., 2013).

Como una manera de investigar la severidad del efecto de las fuerzas del levantamiento de los aisladores sobre la estructura, se propone realizar un modelo estructural de un edificio esbelto e incorporar la interacción con el suelo a través de resortes equivalentes para observar las repercusiones de este fenómeno sobre la estructura.

1.2 **Objetivo General**

Evaluar el fenómeno del levantamiento de los aisladores para ver sus efectos en la respuesta del caso de estudio.

1.3 **Objetivos Específicos**

Examinar como la respuesta global (drift de entrepiso, aceleraciones de techo) y la respuesta local de los aisladores es impactada por el fenómeno del levantamiento.

Analizar como el fenómeno del levantamiento se vería afectado si se considera flexibilidad en la base a partir de un modelo simplificado de interacción suelo estructura comparado con un modelo de suelo infinitamente rígido (empotrado).

Observar el efecto del acoplamiento direccional en los registros sísmicos en la demanda de corte basal con el fin de contrastar con el efecto unidireccional.

2. MODELAMIENTO DEL CASO DE ESTUDIO EN SAP2000®

2.1 Aspectos generales

Se propone modelar una estructura de 10 niveles en el software SAP2000® (Computers and Structures Inc., 1999). La estructura contará una relación altura ancho de 6 y una planta de 5m de ancho por 15m de largo. Como elementos resistentes a cargas laterales se utilizará un sistema de pórticos resistentes a momento de concreto reforzado, esto es esquematizado en la Figura 2-1.

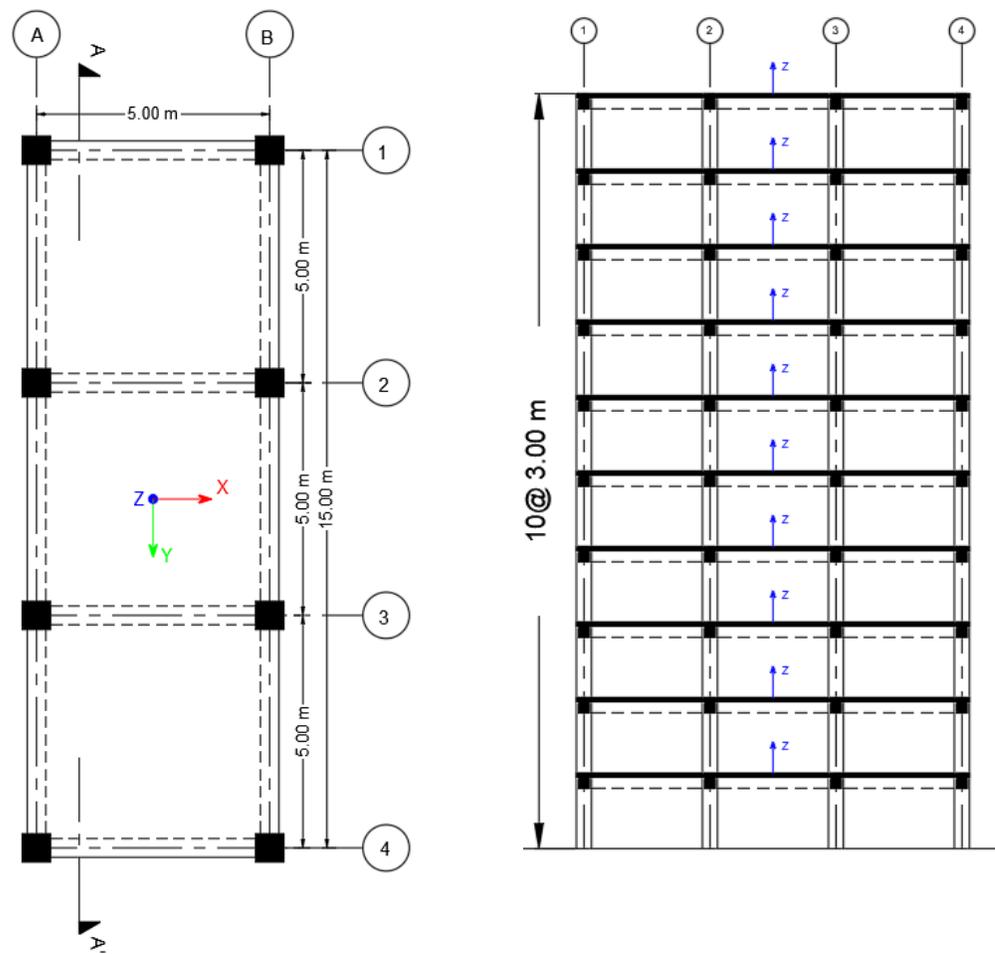


Figura 2-1 Esquema general de superestructura para el caso de estudio.

2.2 Propiedades y consideraciones de rigidez de la superestructura

Para las propiedades mecánicas de la estructura se utiliza:

Tabla 2-1 Propiedades propuestas del concreto para el caso de estudio.

f'_c	E	ν	G
kgf/cm^2	kgf/cm^2	-	kgf/cm^2
250	238752	0.2	99479.98

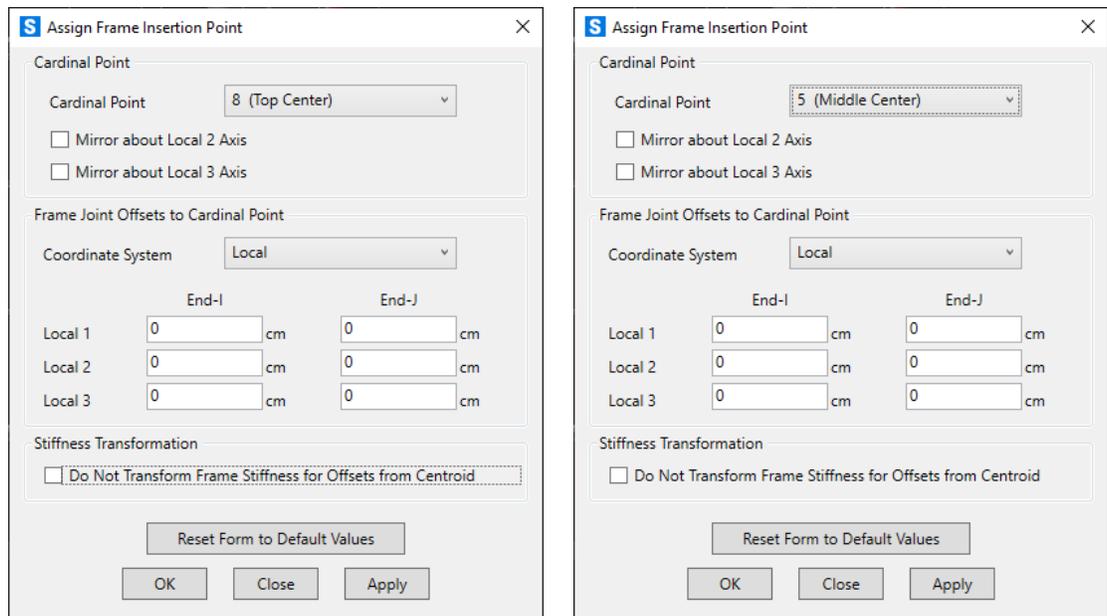
Las secciones de los elementos fueron las siguientes:

Tabla 2-2 Tabla de secciones de elementos y modificadores de propiedades geométricas.

Elemento	Base	Altura	Modif. Inercia	Modif. Torsional
	<i>cm</i>	<i>cm</i>	-	-
Columnas	60	60	0.7	-
Vigas	40	60	0.35	0.0001
Losas	-	15	0.25	-

En la Tabla 2-2, se presentan las secciones de los elementos utilizados para generar el modelo estructural del caso de estudio, además esta tabla muestra los factores de modificación de las propiedades geométricas las cuales tienen como propósito el representar en la estructura el agrietamiento del elemento a esfuerzos de flexión como en torsión para el caso de las vigas, la razón de haber realizado estas modificaciones es poder representar un modelo genérico de diseño de una estructura bajo cargas sísmicas.

Por otra parte, cabe destacar que los elementos tipo viga fueron colocados, con el punto de inserción en el tope central de la sección y las columnas en medio central, con el fin de representar una estructura de edificación, como se muestra en la Figura 2-2.



a) Elementos Vigas

b) Elementos Columnas

Figura 2-2 Puntos de inserción de los elementos estructurales que componen el caso de estudio.

Además, las uniones viga columna fueron modelados asumiendo que los nodos son infinitamente rígidos, dígame con el factor de zona rígida igual a 1.

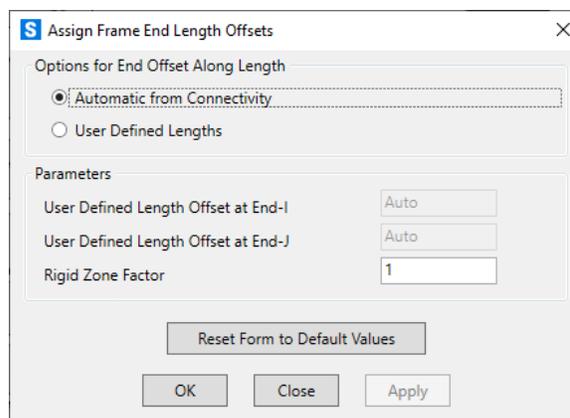


Figura 2-3 Uniones de elementos viga columna.

Las losas fueron modeladas como elementos tipo Shell, esto son: “elementos con formulación de tres o cuatro nodos que combinan los comportamientos de membrana y flexión de placa” (Computers and Structures Inc., 1999), ya que según el manual de referencias de análisis describe que este es un elemento ideal para modelar sistemas de piso (Computers and Structures Inc., 1999).

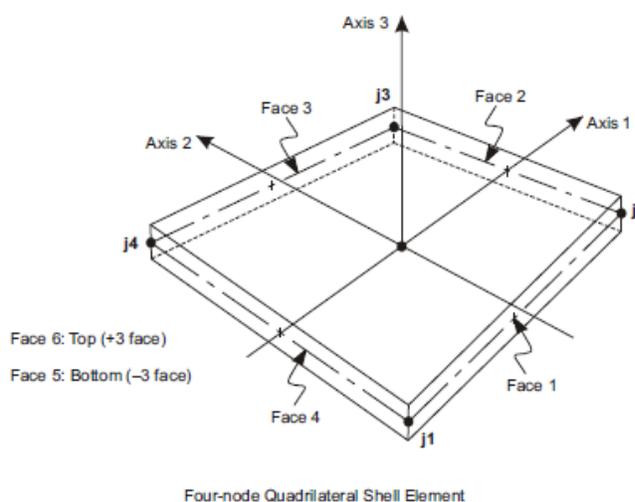


Figura 2-4 Elemento de área tipo Shell (Computers and Structures Inc., 1999).

Para modelar el sistema de piso se incorporó una discretización de 3x3 elementos por cada losa, o sea, elementos finitos de 1.667m x 1.667m. Esto con el fin de capturar el comportamiento de la flexibilidad de la losa en la dirección fuera de su plano en las componentes modales, ya que la estructura levantarse y luego impactar con la base por el efecto de vuelco generara aceleraciones verticales en la estructura.

Finalmente, se incorporó la formulación de diafragma rígido en cada nivel de la estructura. A continuación, se presenta una imagen del modelo 3D generado en SAP2000® como superestructura.

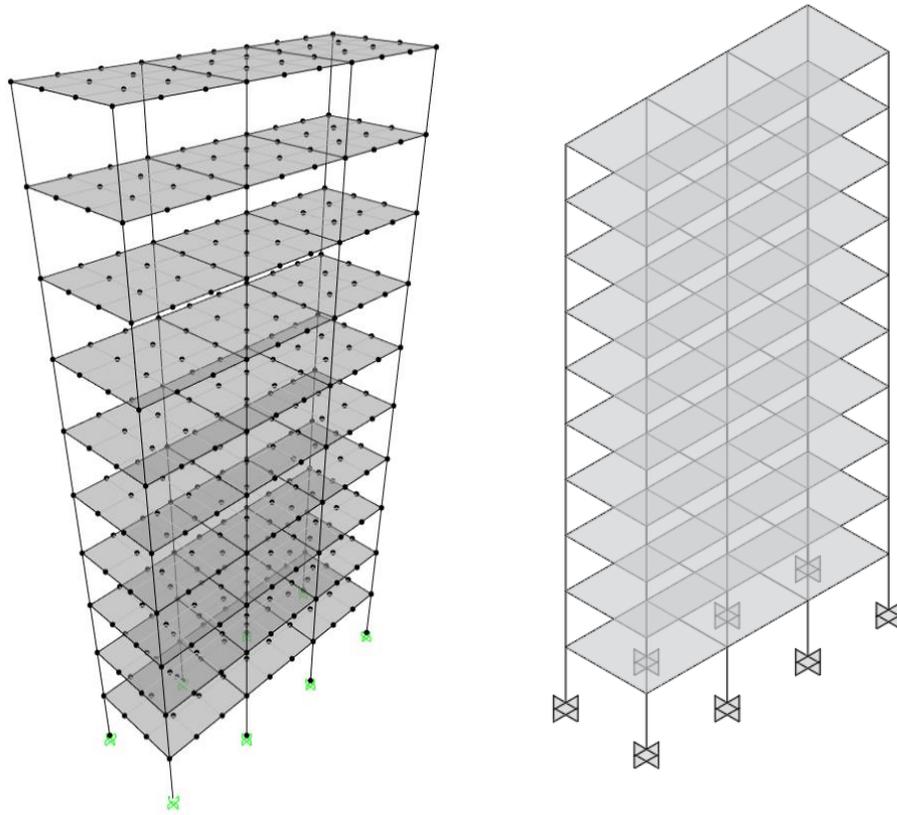


Figura 2-5 Esquema general del modelo 3D en SAP2000®.

2.3 Propiedades y consideraciones de masa de la superestructura

Conociendo la distribución y la cantidad de elementos se puede obtener el peso de los elementos a partir de la densidad de la densidad del material.

Tabla 2-3 - Densidad asumida del material.

Material	Densidad
	<i>tonf/m³</i>
Concreto Reforzado	2.4

Tabla 2-4 - Masa total del sistema por peso propio del caso de estudio.

Elemento	Cantidad	Longitud Total	Peso Total	Masa Total
		<i>m</i>	<i>tonf</i>	<i>tonf s²/cm</i>
Columna	80	240	207.36	0.211
Viga	300	500	288	0.294
Losa	270	-	270	0.275
Σ		-	765.36	0.780

Para simular el efecto de un edificio se consideraron cargas arbitrarias típicas (muertas adicionales y vivas). Para representar el efecto de la carga viva dentro de la masa se consideró el 25% de dicho patrón de carga como contribución a la masa. Estas son presentadas en la siguiente tabla:

Tabla 2-5 - Masa total por cargas adicionales del caso de estudio.

Nivel	DL	LL	Factor DL	Factor LL	Área	Peso Total	Masa Total
	<i>tonf/m²</i>	<i>tonf/m²</i>			<i>m²</i>	<i>Tonf</i>	<i>tonf s²/cm</i>
Techo	0.05	0.1	1	0.25	75	5.625	0.00573
Piso 9	0.12	0.25	1	0.25	75	13.6875	0.01395
Piso 8	0.12	0.25	1	0.25	75	13.6875	0.01395
Piso 7	0.12	0.25	1	0.25	75	13.6875	0.01395
Piso 6	0.12	0.25	1	0.25	75	13.6875	0.01395
Piso 5	0.12	0.25	1	0.25	75	13.6875	0.01395
Piso 4	0.12	0.25	1	0.25	75	13.6875	0.01395
Piso 3	0.12	0.25	1	0.25	75	13.6875	0.01395
Piso 2	0.12	0.25	1	0.25	75	13.6875	0.01395
Piso 1	0.12	0.25	1	0.25	75	13.6875	0.01395
Σ	-	-	-	-	-	128.8125	0.13131

De la Tabla 2-4 y Tabla 2-5 se puede calcular la masa total distribuida en todo el sistema como:

Peso Propio	Cargas Adicionales	Total
<i>tonf s²/cm</i>	<i>tonf s²/cm</i>	<i>tonf s²/cm</i>
0.780	0.131	0.911

2.4 Propiedades modales de la super estructura

Se realizó un análisis modal de la estructura para observar sus propiedades. Para esto se utilizó el acercamiento por vectores de Ritz, el cual resulta en excelentes resultados, según el Manual de Referencias de Análisis de SAP2000®, ya que estos están generados por la distribución espacial de las fuerzas dinámicas. Esta distribución de fuerzas dinámicas espaciales sirve como un vector inicial para empezar el procedimiento (Computers and Structures Inc., 1999).

Este análisis contara con condiciones iniciales igual a cero y con una distribución de fuerzas en todos los grados de libertad. Además, se propone utilizar un número máximo de vectores Ritz que se entenderán como suficientes para este caso y los subsiguientes.

Load Case Data - Modal

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

Notes: []

Load Case Type: Modal [Design...]

Stiffness to Use:

- Zero Initial Conditions - Unstressed State
- Stiffness at End of Nonlinear Case

 Important Note: Loads from the Nonlinear Case are NOT included in the current case.

Number of Modes:

- Maximum Number of Modes: 90
- Minimum Number of Modes: 1

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Maximum Cycles	Target Dynamic Participation Ratios (%)
Accel	UX	0	99.
Accel	UY	0	99.
Accel	UZ	0	99.
Accel	RX	0	99.
Accel	RY	0	99.
Accel	RZ	0	99.

Mass Source: MSSSRC1

Buttons: [OK] [Cancel]

Figura 2- 1. Definición del análisis modal por vectores de Ritz.

Tabla 2-6 - Periodos y participación de masa modal de la superestructura.

Modo	Periodo	SumUX	SumUY	SumUZ	SumRX	SumRY	SumRZ
	Seg						
1	0.7984	0.7802	0	0	0	0.2309	0
2	0.63595	0.7802	0.8192	0	0.155	0.2309	0
3	0.58699	0.7802	0.8192	0	0.155	0.2309	0.8162
4	0.25009	0.9179	0.8192	0	0.155	0.7529	0.8162
5	0.20826	0.9179	0.9269	0	0.6527	0.7529	0.8162
6	0.19124	0.9179	0.9269	0	0.6527	0.7529	0.9225
7	0.13323	0.9555	0.9269	0	0.6527	0.8311	0.9225
8	0.11835	0.9555	0.9609	0	0.6917	0.8311	0.9225
9	0.10836	0.9555	0.9609	0	0.6917	0.8311	0.9578
10	0.10636	0.9555	0.9609	0.5215	0.6917	0.8311	0.9578
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
90	0.00641	1	1	0.9981	0.9994	1	1

En la Tabla 2-6, se presenta los periodos de las formas modales de la superestructura definida para caso de estudio. Se observa que el periodo fundamental es de 0.798 segundos en la dirección X, o transversal, y 0.635 segundos en la dirección Y, o traslacional y 0.106 segundos en la dirección Z, o vertical. Por otro lado, también se confirma que utilizar al menos 90 vectores de Ritz llevan a representar de manera suficiente la respuesta dinámica global de dicha estructura.

3. AISLADORES DE SISTEMA DE PÉNDULO DE FRICCIÓN (FPS)

3.1 Propiedades del péndulo de fricción

Los sistemas de aislación de base se pueden dividir en dos grandes grupos: los elastoméricos y los deslizantes. Dentro del mundo de los aisladores deslizantes existen los aisladores de péndulo de fricción simple, estos son un sistema que funciona a base de fricción entre dos componentes: Teflón y Acero inoxidable (para este caso); los cuales interactúan en superficie de geometría cóncava.

(Aguiar, et al., 2008) describe que dicho aislador se activa en el momento que la fuerza de corte en la interfaz de aislación supera la fricción estática que existe debido a las fuerzas de diseño, cuyo coeficiente de fricción (μ) aproximadamente es de 5 – 7%. Al desplazarse el deslizador sobre la superficie cóncava la masa soportada es elevada con movimientos equivalentes a los de un péndulo.

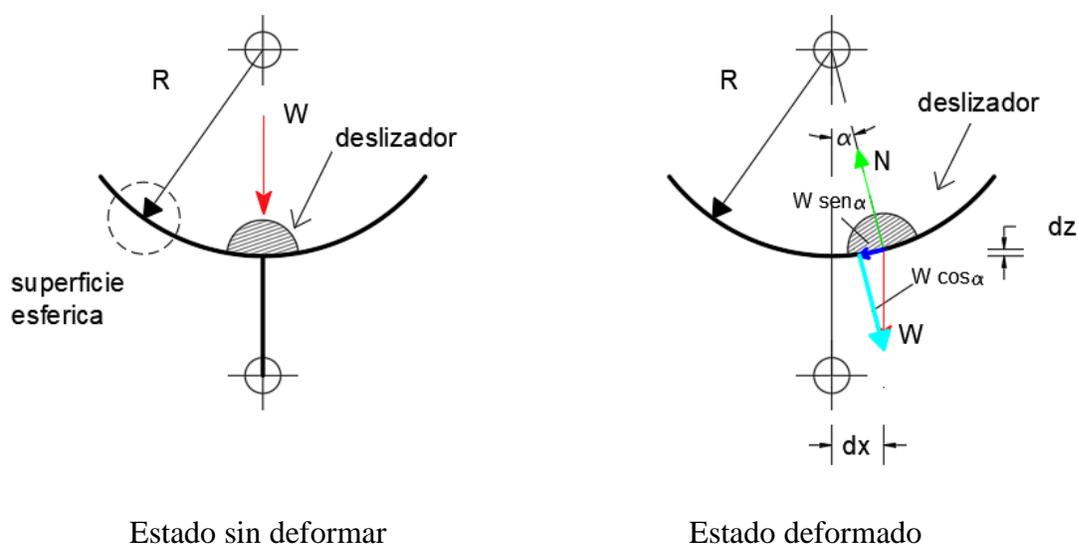


Figura 3-1 Forma de movimiento y fuerzas actuantes en el aislador FPS.

La Figura 3-1 presenta a la izquierda el estado no deformado del aislador y su relación con la respuesta de un péndulo donde el soporte representa la masa m y el radio de curvatura, R , de la superficie de deslizamiento la cuerda; a la derecha se encuentra el estado deformado del aislador para cuando la fuerza de corte supere a la fuerza opuesta de fricción μN , donde N es la fuerza normal producida por el peso W , que viéndolo desde el punto de vista de un péndulo simple sería la fuerza de tracción de la cuerda, que este soportando el aislador. Al desplazarse el aislador experimenta fuerzas en la interfaz con la superficie de descomponen en las fuerzas tangenciales $W \operatorname{sen} \alpha$ y las radiales $W \operatorname{cos} \alpha$, en la que la componente tangencial es la fuerza que se opone a la excitación pendular (Aguilar, et al., 2008).

Entonces conociendo que el arco descrito por $R\alpha$ es la distancia recorrida por la masa, se puede realizar el equilibrio de las fuerzas tangenciales:

$$\frac{W}{g} R \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + W \operatorname{sen} \alpha = 0 \quad (\text{Ec. 3 - 1})$$

Donde:

$\frac{W}{g}$ - Representa la masa del péndulo.

$\frac{d^2 \alpha}{dt^2}$ - Representa la aceleración angular del péndulo.

g - Representa la constante de gravedad en unidades consistentes.

Haciendo la primera suposición de que α tendrá valores pequeños, o sea una condición de pequeñas deformaciones, se puede inferir entonces que para estos valores

$W \text{ sen} \alpha = W \alpha$. Por lo que al aplicar este cambio a la (Ec. 3 - 1) y normalizando la masa se tiene que:

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{g}{R} \alpha = 0 \quad (\text{Ec. 3 - 2})$$

Donde $M = 1$ & $K = \frac{g}{R}$, de manera que viéndolo desde el contexto de movimiento armónico simple sin considerar amortiguamiento:

$$K = \omega^2 m \rightarrow \omega^2 = \frac{g}{R} \rightarrow K = \frac{N}{R} \quad (\text{Ec. 3 - 3})$$

$$\ddot{\alpha} + \omega^2 \alpha = 0 \quad (\text{Ec. 3 - 4})$$

Siendo ω la frecuencia angular del sistema, por lo que el periodo del sistema se puede determinar de la siguiente forma, tomando a partir de la (Ec. 3 - 3):

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{R}} \rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (\text{Ec. 3 - 5})$$

Por lo que al observar la (Ec. 3 - 5), se deduce que el periodo del sistema esta únicamente regido por el radio de curvatura que presente la superficie de deslizamiento, esta es una de las ventajas con las que cuentan este tipo de aisladores ya que el periodo objetivo no depende de la masa, ni de la rigidez de la superestructura.

Dentro de SAP2000® el sistema de péndulo de fricción simple está definido como un elemento link llamado “Friction Pendulum Isolator”, dicho elemento considera el acoplamiento de las deformaciones de corte en ambas direcciones transversales a su eje (ver Figura 3-2) y para el comportamiento axial utiliza un elemento gap para tomar en cuenta el efecto del levantamiento que pueden experimentar estos soportes cuando existen esfuerzos de tracción sobre ellos (Computers and Structures Inc., 1999).

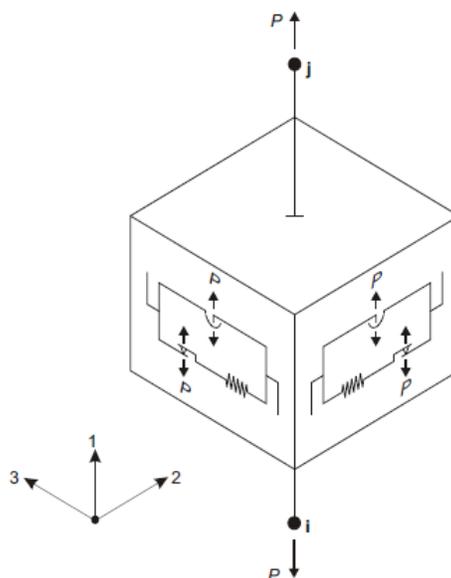


Figura 3-2 Elemento de péndulo de fricción simple para comportamiento de corte biaxial en SAP2000® (Computers and Structures Inc., 1999).

Para el comportamiento axial se define la siguiente función a trozos:

$$f_{uz} = P = N = \begin{cases} k_z d_{uz} & \text{si } d_{uz} < 0 \\ 0 & \text{si } d_{uz} \geq 0 \end{cases} \quad (\text{Ec. 3 - 6})$$

Donde k_z representa la rigidez axial del aislador y du_z representa la deformación axial del aislador. Es importante notar que para poder obtener alguna fuerza de corte en el aislador la fuerza axial N debe ser una fuerza de compresión, ya que es necesario que se deslice masa para que exista fuerza de corte. Para la rigidez vertical del aislador se presenta un acercamiento considerado un grado de libertad vertical en el cual se soporta la masa producida por la carga axial.

$$k_z = \omega_z^2 m \quad (\text{Ec. 3 - 7})$$

$$k_z = \frac{(2\pi f_z)^2 N}{g} \quad (\text{Ec. 3 - 8})$$

La (Ec. 3 - 8) presenta la rigidez axial del aislador como una función de la fuerza axial y una cierta frecuencia, la cual se sintonizará igual a $f_z = 45 \text{ Hz}$, dato tomado como sugerencia del profesor guía a partir de estudios experimentales.

En el comportamiento de corte, se observa el lazo de histéresis del aislador de péndulo simple.

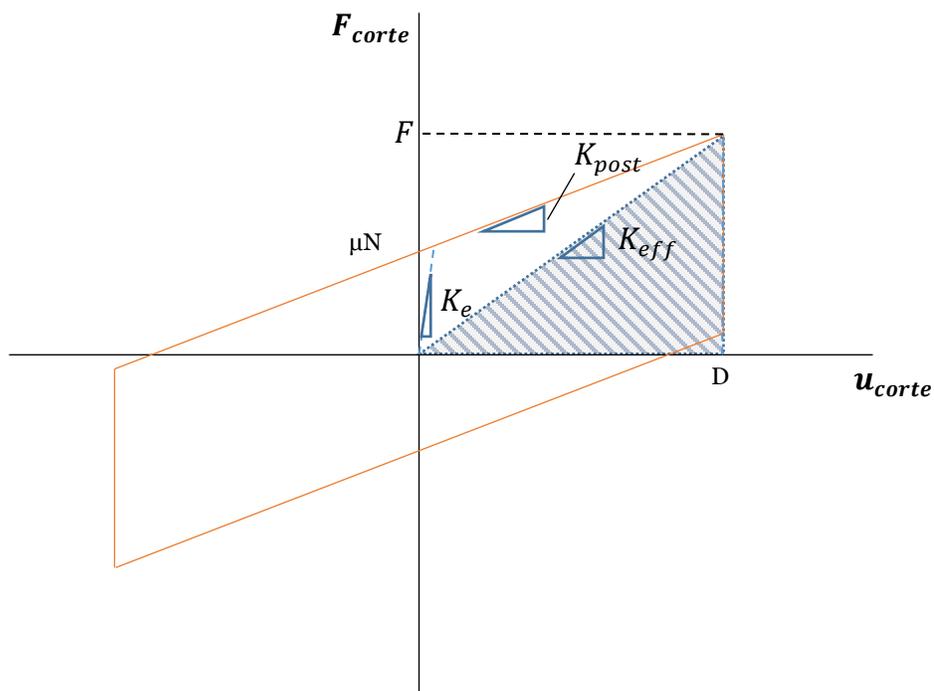


Figura 3-3 Lazo de histéresis del aislador de péndulo de fricción simple.

La Figura 3-3 describe en la abscisa la deformación por corte del aislador y en la ordenada la fuerza de corte generada en el aislador dentro de un ciclo de carga y descarga en el aislador con carga axial y fricción constante. En la que K_{post} define a la rigidez post fluencia que se relaciona con la rigidez pendular obtenida en (Ec. 3 - 3), K_e se refiere a la rigidez equivalente del sistema, la cual tendría la siguiente forma:

$$K_e = \frac{\mu N}{D_y} \quad (\text{Ec. 3 - 9})$$

Donde para la componente friccional D_y representaría el desplazamiento de fluencia el cual es número que tiende a cero. Y $K_{eff} \neq K_e$ que será la rigidez secante o efectiva del sistema, la cual es obtenida a través de la fuerza máxima F alcanzada en el desplazamiento entre la deformación máxima D en la que se produce esta fuerza máxima del aislador. La fuerza máxima F está relacionada la siguiente expresión la cual contiene dos componentes: una friccional la cual está asociada a la disipación de energía y la componente elástica que es la pendular.

$$F = f_{friccional} + f_{pendular}$$

$$F = \mu N + \frac{N}{R} D \quad (\text{Ec. 3 - 10})$$

Entonces al dividir F entre el desplazamiento máximo D se obtiene la rigidez efectiva:

$$K_{eff} = \frac{\mu N + \frac{N}{R} D}{D} \quad (\text{Ec. 3 - 11})$$

Para el caso del amortiguamiento respecto al crítico efectivo ξ_{eff} , vale la pena descomponer la Figura 3-3 en: las componentes elástica y friccional.

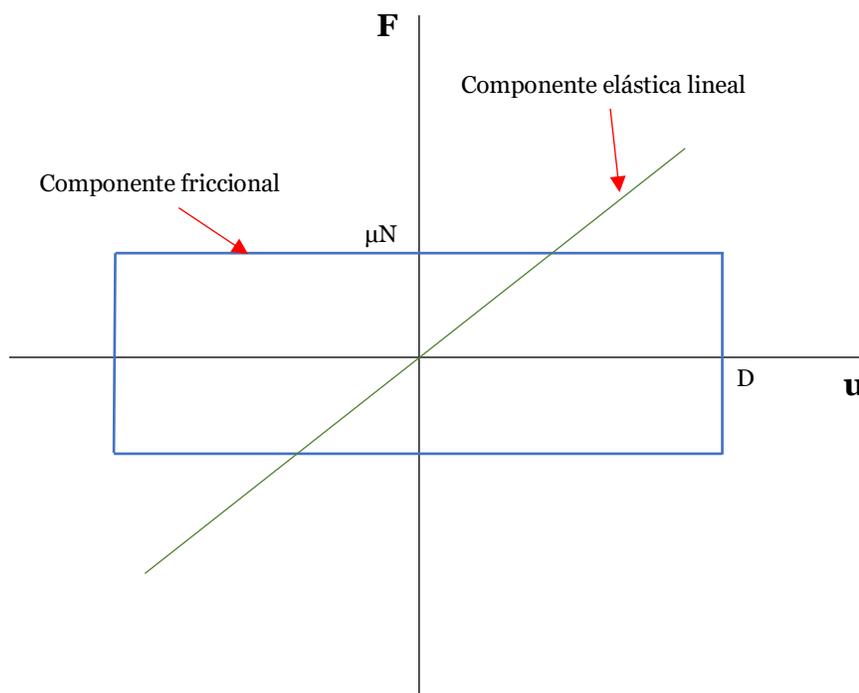


Figura 3-4 Componentes del lazo de histéresis de un aislador de péndulo de fricción.

Al mostrar las componentes del lazo de histéresis se puede observar que el área bajo la curva de la componente friccional o de disipación de energía, representa la energía disipada en un ciclo de histéresis la cual es:

$$E_d = 4\mu ND \quad (\text{Ec. 3 - 12})$$

Además, la componente de energía elástica es igual a:

$$E_s = \frac{1}{2} K_{eff} D^2 \quad (\text{Ec. 3 - 13})$$

Con lo obtenido se puede obtener ξ_{eff} , como:

$$\xi_{eff} = \frac{E_d}{4\pi E_s} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\mu}{\mu + \frac{D}{R}} \right) \quad (\text{Ec. 3 - 14})$$

Por lo que el amortiguamiento efectivo C_{eff} es;

$$C_e = 2 \frac{N}{g} \xi_{eff} \omega_{eff} \quad (\text{Ec. 3 - 15})$$

Por otro lado, el elemento Friction Isolator del SAP2000® utiliza un modelo de fricción citando a (Nagarajaiah, et al., 1991), en el que se define que el coeficiente de fricción es variable y dependiente de la velocidad de los grados de libertad transversales a su eje, utilizando la siguiente expresión:

$$\mu = \mu^{fast} - (\mu^{fast} - \mu^{slow}) e^{-r\dot{u}} \quad (\text{Ec. 3 - 16})$$

Donde μ^{fast} & μ^{slow} son los límites de para fricción para la condición rápida y lenta respectivamente, r es un parámetro de tasa de cambio medida en $\left(\frac{\text{tiempo}}{\text{distancia}} \right)$ característico de las velocidades de deslizamiento y \dot{u} es la velocidad del grado de libertad.

Para este documento se utilizaron como valores genéricos de fricción 0.07 & 0.035, para las condiciones rápida y lenta respectivamente; y para el parámetro r se utilizó $0.10 \frac{seg}{cm}$, el comportamiento de la fricción se observa en la siguiente figura:

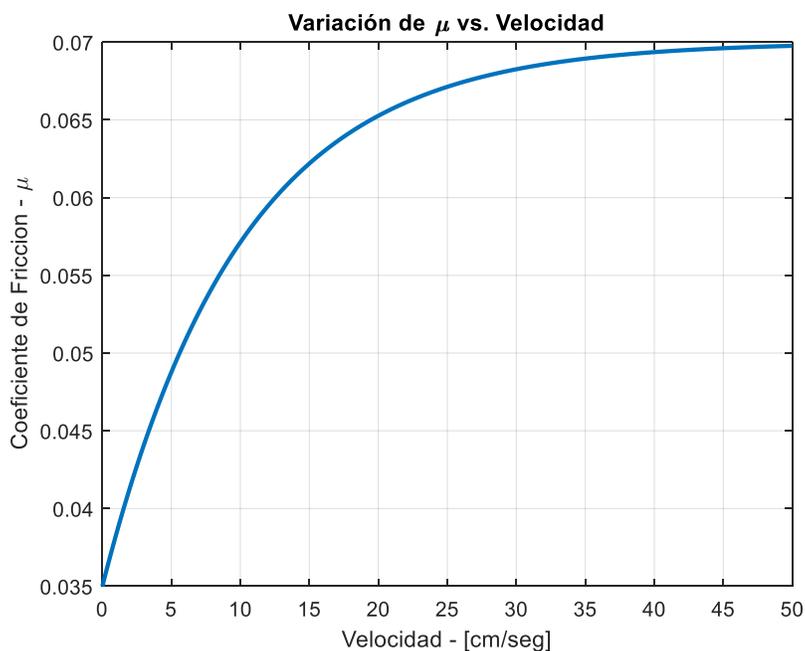


Figura 3- 1. Variación del coeficiente de fricción versus velocidad.

La Figura 3- 1 se presenta la variación del coeficiente de fricción en comparación con el aumento paulatino de la velocidad en el grado de libertad transversal al eje del elemento Friction Pendulum Isolator, se observa que la función es exponencial y varía entre los límites definidos de condición lenta de baja velocidad y condición rápida de alta velocidad. Cabe destacar que si el coeficiente de fricción rápido y lento son el mismo valor numérico entonces se encuentra en una condición de fricción de Coulomb donde la variación de la fricción con respecto a la velocidad es nula.

4. INCORPORACIÓN DE LOS AISLADORES FPS DENTRO DEL MODELO DE SAP2000®

En el presente capítulo se obtendrán las propiedades físicas de los aisladores aplicadas para el caso de estudio desarrollado en el capítulo 2.

4.1 Modelo estructural

En caso de estudio es un edificio relativamente esbelto de 10 niveles de altura (ver Figura 2-5). A este se le agregara un sistema de losas y vigas similares a los pisos subsiguientes en el nivel de la base con el mismo patrón de carga de los Pisos 1-9, a este nivel se le llamara Piso de aislación o Nivel de aislación. La razón de esto es generar que a través de la rigidez de las vigas y losas se genere una restricción cinemática para que no existan deformaciones laterales diferentes entre los aisladores en planta, cabe también destacar que al igual que los demás niveles se utilizó un diafragma rígido en este nivel con el fin de asemejarse a un modelo típico de diseño. Esto es ilustrado en la Figura 4-1 donde se muestran las etiquetas para identificar cada aislador en el nivel de aislación y el esquema isométrico de la estructura soportada por los aisladores.

Como se va visto en el capítulo III, las propiedades de los aisladores dependen fundamentalmente de dos parámetros, la fuerza axial de compresión N que tienen que soportar los aisladores y el radio de curvatura R de la superficie de deslizamiento.

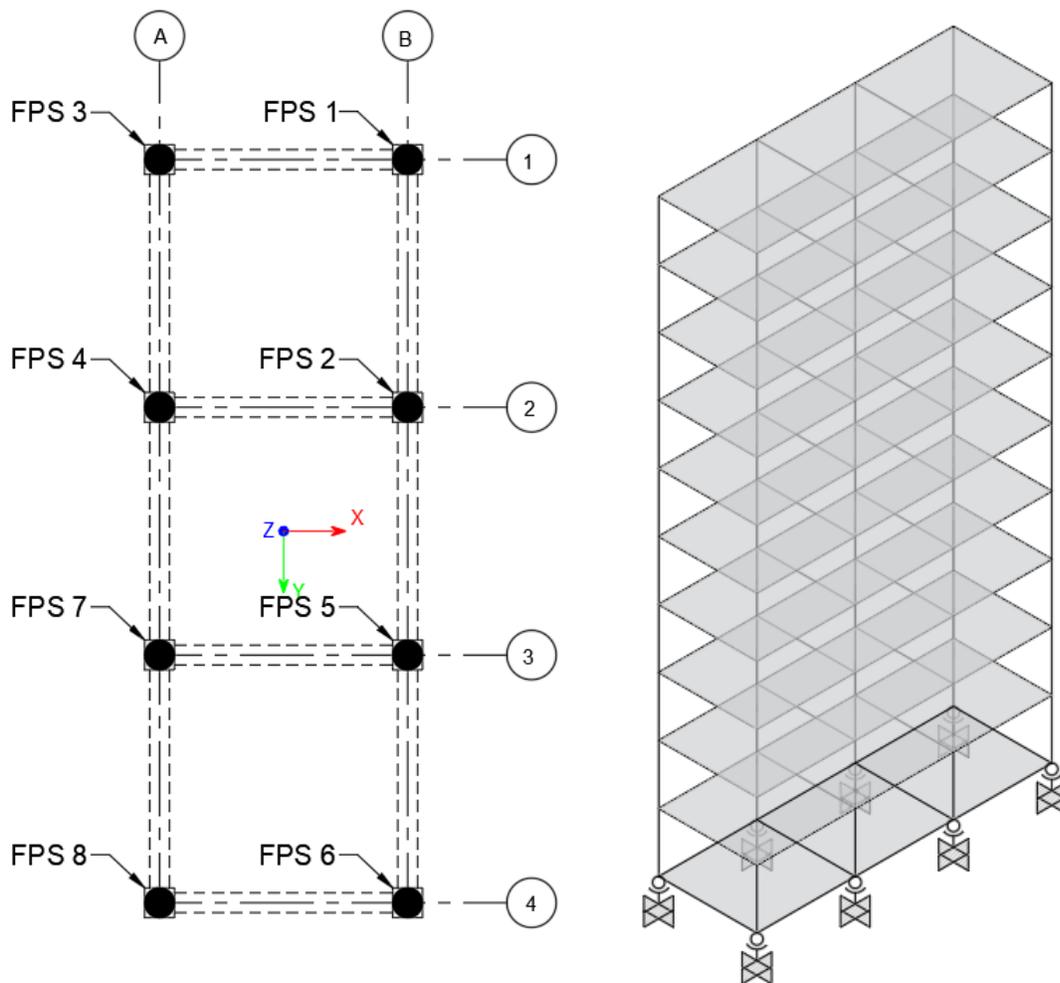


Figura 4-1 Planta de nivel de aislación e isométrica del caso de estudio con aisladores integrados.

4.2 Método de análisis para cuantificación de fuerzas y desplazamientos

Para obtener las fuerzas axiales que debe soportar cada aislador se propone realizar un análisis tiempo historia no lineal, en el cual la excitación será una función rampa aplicado en los grados de libertad verticales U_3 o z (ver Figura 4-1). Esta función rampa tratará de representar como los aisladores poco a poco empiezan a soportar las cargas gravitacionales de la estructura hasta el punto de que el 100% de la carga este

soportada sobre los aisladores, entonces al conocer las fuerzas que estos están resistiendo se procederá a calcular propiedades físicas para cada uno.

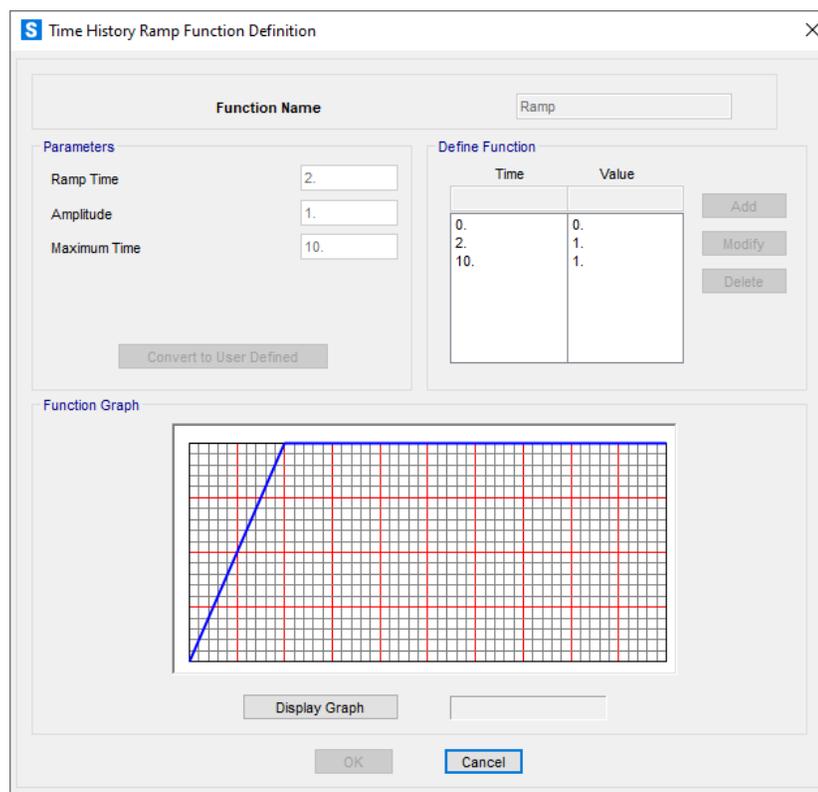


Figura 4-2 Definición de función rampa.

La función rampa mostrada en la Figura 4-2, muestra su dicha definición en SAP2000®, en la cual toda la estructura se carga en dos segundos y se mantiene constante durante ocho segundos más con el fin de que el amortiguamiento asignado disipe las vibraciones de la estructura, además el último paso de este estado de carga servirá como condición inicial para los subsiguientes análisis.

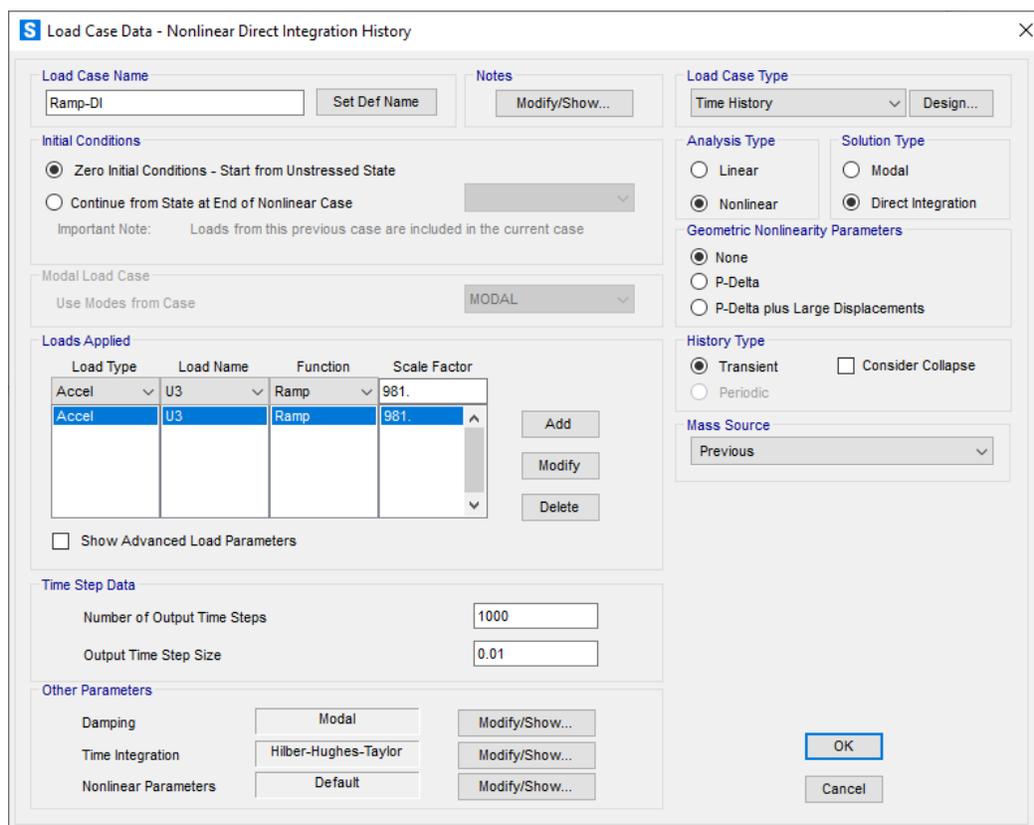


Figura 4-3 Definición del análisis tiempo historia no lineal bajo la función rampa.

Dicho análisis es definido en el SAP2000®, en la dirección (Z o U3) o todos los grados de libertad verticales y es multiplicada por la aceleración de la gravedad de manera que se represente la como toda la estructura se cargaría durante el lapso de los 2 segundos de manera paulatina. Las condiciones iniciales es el total reposo y haciendo integración directa en la cual no se hacen reducciones de orden de ningún tipo, sino que se utilizan las matrices de rigidez, masa y amortiguamiento completas para hacer la integración de la estructura. (Wilson, 1995) define este procedimiento de análisis como el acercamiento más general para resolver la respuesta dinámica de una estructura, el cual intenta satisfacer el equilibrio dinámico en puntos discretos de tiempo expresados en intervalos ($\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t \dots n\Delta t$). SAP2000® cuenta con varios métodos de integración

tales como: el Método de Newmark, el Método Wilson- θ , Método Hilber – Hughes - Taylor (HHT) y el Método de Chung y Hulbert. Como la función rampa definida anteriormente tiene una duración de 10 segundos, se utilizó 1000 pasos de análisis discretizados con un Δt igual 0.01 segundos por paso de esta manera se cubrirán los 10 segundos completos de la excitación.

4.3 Integrador HHT – Método α

Para este estudio se utilizó el método de integración HHT o método α el cual utiliza el método de Newmark modificando las ecuaciones del movimiento de la siguiente manera:

$$M\ddot{u}(t) + (1 + \alpha)C\dot{u}(t) + (1 + \alpha)Ku(t) = (1 + \alpha)F(t) - \alpha F(t) + \alpha C\dot{u}(t - \Delta t) + Ku(t - \Delta t) \quad (\text{Ec. 4- 1})$$

Cuando el valor de α es cero, este método es exactamente similar al método de Newmark de aceleración constante y al colocarle algún valor este produce un amortiguamiento, no físico sino más bien numérico, en los modos superiores y es utilizado para alcanzar convergencia (Wilson, 1995). En el manual de referencias de análisis de SAP2000® se recomienda que este valor oscile entre $-\frac{1}{3} < \alpha < 0$ (Computers and Structures Inc., 1999), en lo concerniente a este estudio se utilizarán los siguientes parámetros para el método de integración HHT o método α .

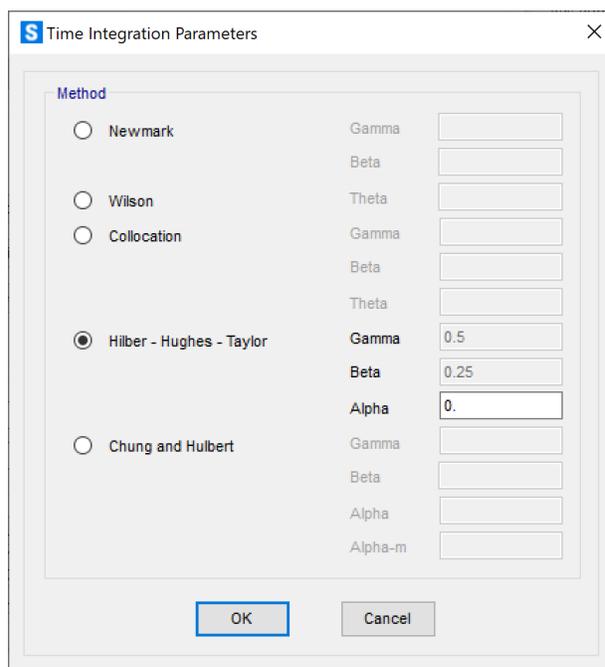


Figura 4-4 Parámetros de método de integración.

4.4 Masa considerara a partir de los patrones de carga

La masa del caso de estudio fue obtenida tanto por la masa distribuida en los elementos como peso propio, pero también se consideró que los patrones de carga participaran con factores, por ejemplo, se consideró que las cargas muertas adicionales *DL* participen al 100%, pero no se tomó en cuenta que toda la carga viva *LL* estará, por lo que tendrá 25% de su participación en la masa de la estructura.

Tabla 4-1 Factores de participación de los patrones de carga en la masa total de la estructura.

Patrones	Factor
Peso Propio	1
DL	1
LL	0.25

4.5 Amortiguamiento del sistema

SAP2000® considera dos formas de incorporar amortiguamiento en un análisis tiempo historia por integración directa, uno de estos es el amortiguamiento proporcional a la masa y a la rigidez, también conocido como amortiguamiento de Rayleigh, la cual es definida de la siguiente manera:

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (\text{Ec. 4- 2})$$

Donde a_0 & a_1 son constantes con unidades de seg^{-1} y seg respectivamente, los cuales son calculados a través de la siguiente expresión.

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (\text{Ec. 4- 3})$$

En las que ω_i & ω_j son las frecuencias naturales de los modos en los que se interesa agregar un factor de amortiguamiento con respecto al crítico ξ_i & ξ_j respectivamente (Chopra, 2012). El factor de amortiguamiento respecto al crítico para los modos subsiguientes se obtiene entonces como:

$$\xi_n = \frac{a_0}{2\omega_n} + \frac{a_1}{2}\omega_n \quad (\text{Ec. 4- 4})$$

El fin de generar esta matriz de amortiguamiento proporcional a la masa y a la rigidez es obtener una matriz que se pueda desacoplar por los vectores propios del sistema, o

sea generar una matriz de amortiguamiento clásico. Dicha matriz de amortiguamiento clásico es una idealización apropiada para los mecanismos de amortiguamiento distribuidos en la estructura, especialmente cuando son estructuras de edificio multipiso con sistema estructural y materiales similares a lo largo de la altura (Chopra, 2012).

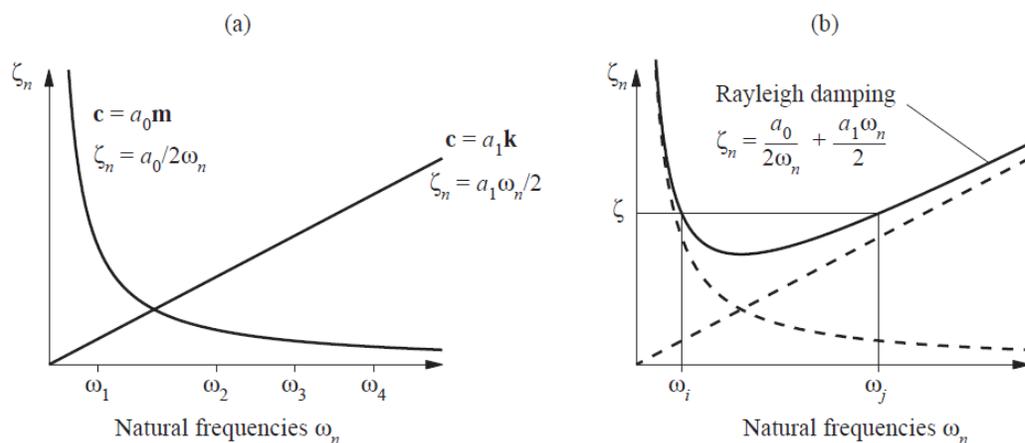


Figura 4-5 Representación gráfica del a) amortiguamiento modal proporcional a la masa y a la rigidez y b) amortiguamiento de Rayleigh (Chopra, 2012)

Otra solución fue la adaptada para los casos de estudio, fue usar la matriz de amortiguamiento modal, la cual también genera una matriz de amortiguamiento clásico. Esta es una alternativa que se deriva de asumir que la matriz de amortiguamiento modal C_n es diagonal y ya que cada modo es en esencia un sistema de un grado de libertad, se encarga de asignar un factor de amortiguamiento respecto al crítico ξ a cada uno (Chopra, 2012).

$$\Phi^T C \Phi = C_n \quad (\text{Ec. 4- 5})$$

$$C_n = 2m_n \xi_n \omega_n \quad (\text{Ec. 4- 6})$$

Para este caso se utilizó $\xi_{1-3} = 0\%$ para los modos aislados y $\xi_{4-90} = 99\%$ para todos los modos con el fin que las vibraciones de las respuestas sean atenuadas y la carga paulatina sea asemejada a una carga estática.

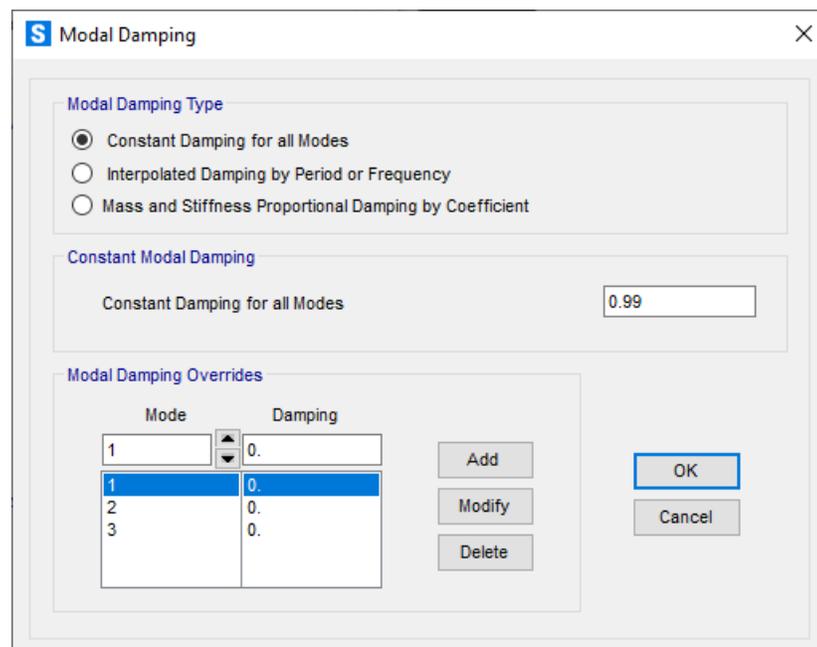


Figura 4-6 Factores de amortiguamiento respecto al crítico utilizado para análisis tiempo historia no lineal con función rampa.

4.6 Resultados de análisis y dimensionamiento de los aisladores de péndulo de fricción

Al realizar este análisis se obtuvieron las siguientes fuerzas verticales que experimentara cada resorte de manera gravitacional, estas serán las fuerzas N con las cuales se dimensionaran las propiedades físicas de los aisladores.

Tabla 4-2 Fuerzas de compresión soportada por cada aislador.

Aislador	N
	tonf
1	-101.91
2	-139.1156
3	-101.9101
4	-139.1157
5	-139.1156
6	-101.9096
7	-139.1153
8	-101.9095

Como fue observado en el Capítulo 3, las propiedades físicas de los aisladores de péndulo de fricción dependen tanto de la fuerza que soportan como el radio de la superficie de desplazamiento, esta superficie de desplazamiento está directamente relacionada con el periodo objetivo que se desee alcanzar T_{obj} . En el caso de estudio se decidió utilizar de manera arbitraria un periodo de $T_{obj} = 2.50 \text{ seg}$, lo que resulta en un radio de curvatura $R = 1.55 \text{ m}$. Entonces conociendo estas propiedades y tomando como parámetro de fricción la máxima que se puede desarrollar $\mu = \mu^{fast} = 0.07$, $D_y = 0.01 \text{ cm}$ y $r = 0.1 \frac{\text{seg}}{\text{cm}}$. Observando la Tabla 4-2 se aprecia que los aisladores centrales (2-3-6-7) presentan cargas axiales similares y los extremos (1-4-

5-8) también, por lo que se diseñaran dos tipos de aisladores unos para las columnas internas y otros para las columnas externas. A continuación, se presentan las propiedades de los aisladores y su introducción en SAP2000®.

Tabla 4-3 Propiedades físicas de los aisladores internos y externos.

Aislador	K_e tonf/cm	K_z tonf/cm
Externos (1-3-6-8)	713.37	8304.86
Internos (2-4-5-7)	973.8092	11336.8

The figure displays two screenshots of the 'Link/Support Directional Properties' dialog box in SAP2000. Both screenshots show the 'Identification' section with 'Property Name' set to 'FPS1', 'Type' set to 'Friction Isolator', and 'NonLinear' set to 'Yes'.

a) Propiedades para las direcciones laterales:

- Direction: U2
- Properties Used For Linear Analysis Cases:
 - Effective Stiffness: 0.9013
 - Effective Damping: 0.1054
- Shear Deformation Location:
 - Distance from End-J: 50.
- Properties Used For Nonlinear Analysis Cases:
 - Stiffness: 713.37
 - Friction Coefficient, Slow: 0.035
 - Friction Coefficient, Fast: 0.07
 - Rate Parameter: 0.1
 - Net Pendulum Radius: 155.

b) Propiedades para la dirección axial:

- Direction: U1
- Properties Used For Linear Analysis Cases:
 - Effective Stiffness: 8304.86
 - Effective Damping: 0.
- Properties Used For Nonlinear Analysis Cases:
 - Stiffness: 8304.86
 - Damping Coefficient: 0.

a) Propiedades para las direcciones
laterales

b) Propiedades para la dirección
axial

Figura 4-7 Propiedades de los aisladores externos.

S Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: FPS2

Direction: U2

Type: Friction Isolator

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 1.2312

Effective Damping: 0.144

Shear Deformation Location

Distance from End-J: 50.

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness: 973.8092

Friction Coefficient, Slow: 0.035

Friction Coefficient, Fast: 0.07

Rate Parameter: 0.1

Net Pendulum Radius: 155.

OK Cancel

S Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: FPS2

Direction: U1

Type: Friction Isolator

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 11336.8

Effective Damping: 0.

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness: 11336.8

Damping Coefficient: 0.

OK Cancel

a) Propiedades para las direcciones
laterales

b) Propiedades para la dirección
axial

Figura 4- 1. Propiedades de los aisladores internos.

5. INCORPORACIÓN DE INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA DENTRO DEL MODELO DE SAP2000®

Este capítulo se enfocará en describir el proceso implementado para incorporar la flexibilidad del suelo al modelo estructural aislado.

5.1 Representación del modelo estructural

La interacción suelo estructura es un área de investigación bastante grande para solo realizar una investigación en la que se enfoque encontrar cual sería el mejor modelo para representar la flexibilidad del suelo en un edificio como el caso de estudio. Sin embargo, se optó por utilizar un método simplificado a partir de resortes interconectados para representar la respuesta de la flexibilidad del suelo.

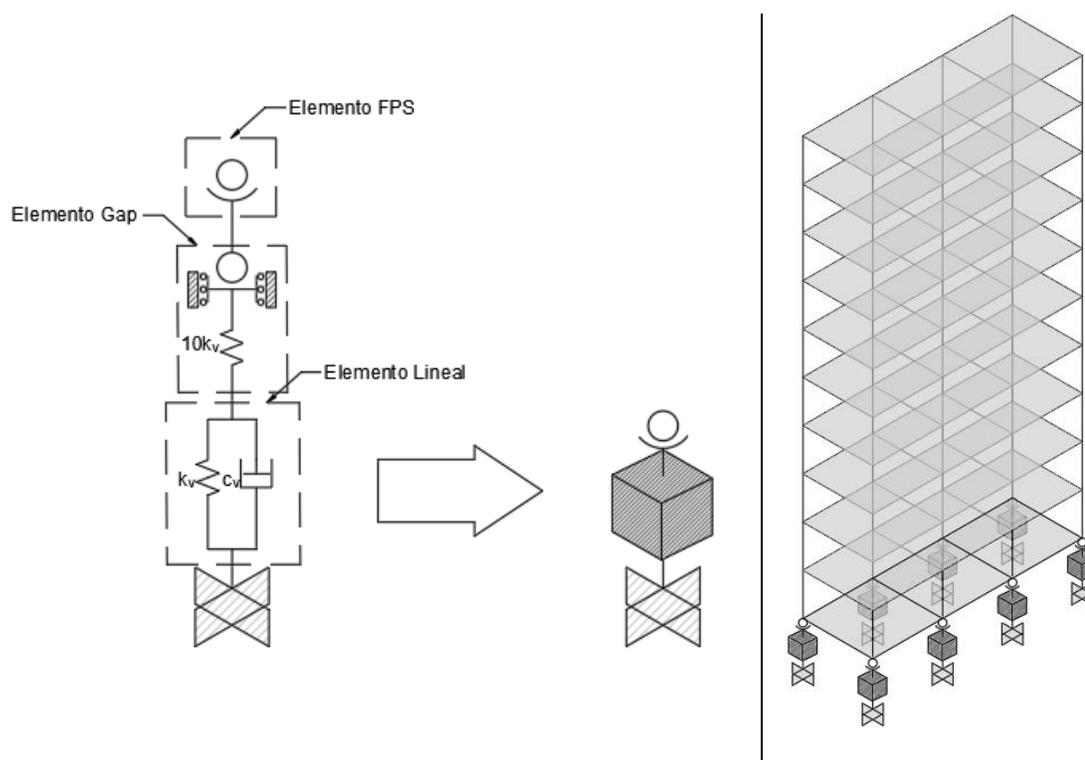


Figura 5-1 Esquema general de modelo de interacción suelo estructura.

El modelo consiste en representar el comportamiento del suelo en sentido vertical a través de una rigidez y un amortiguador lineal conectado con el aislador por un elemento gap, que permitirá que a la estructura experimentar levantamiento el suelo no desarrolle esfuerzos de tracción ya que esto no es real. El elemento gap se le asignará una rigidez arbitraria de 10 veces la rigidez del suelo de forma de las deformaciones se concentre en el suelo además se restringirá el nodo que interconecta el aislador con el elemento gap de manera que solo quede el grado de libertad vertical libre.

5.2 Modelo numérico de los resortes

Para obtener el valor numérico de la rigidez de los resortes y amortiguadores a utilizar se procedió a partir de una tarea provista por el profesor guía de este documento, en la materia de dinámica de estructuras del año 2019 (Almazan, 2019), en la cual se proveen las expresiones para definir dichas magnitudes. El suelo estará representado en dos tipos:

Tabla 5-1 Tipos de suelo.

Modelo	Tipo
Suelo I	Intermedio
Suelo II	Duro

Las propiedades de cada tipo de suelo serán expuestas en la siguiente tabla:

Tabla 5-2 Propiedades de los suelos.

	Propiedades de Suelo I	Propiedades de Suelo II
ρ	1600.00 <i>kg/m³</i>	1800.00 <i>kg/m³</i>
V_s	200.00 <i>m/seg</i>	300.00 <i>m/seg</i>
G	0.652 <i>tonf/cm²</i>	1.651 <i>tonf/cm²</i>
ν	0.45	0.45
σ_{adm}	0.003 <i>tonf/cm²</i>	0.004 <i>tonf/cm²</i>

La Tabla 5-2 presenta valores genéricos para describir el tipo de suelo en cuestión, cabe destacar que no se eligió un tipo de suelo blando ya que la solución para fundación en estos tipos de suelo es generalmente una losa de fundación, pilotes o una combinación de ambos lo que llevaría a un análisis más riguroso que el presentado y fuera del alcance de este estudio, por lo que se decidió obviarlo.

Conociendo los parámetros del suelo se utilizaron las ecuaciones provistas en (Almazan, 2019), las cuales parten de conocer las dimensiones de las zapatas aisladas superficiales de la estructura, dichas fundaciones fueron dimensionadas utilizando las fuerzas axiales que deben soportar los aisladores mostradas en la Tabla 4-2. Tomándose como la carga de diseño $N = 140 \text{ tonf}$ y teniendo las tensiones admisibles definidas en la Tabla 5-2, se obtienen las siguientes dimensiones de zapatas.

Tabla 5-3 Dimensiones de zapatas

Dimensiones de Zapata Cuadrada		
	Suelo I	Suelo II
B =	250.00 cm	200.00 cm
A =	62500.00 cm ²	40000.00 cm ²
r =	141.05 cm	112.84 cm

Estas zapatas serán colocadas bajo cada aislador para el tipo de suelo correspondiente, además dichas fundaciones fueron asumidas como fundaciones rectangulares. A continuación, se presentan las ecuaciones para definir la rigidez y el amortiguamiento del suelo en sentido vertical.

Tabla 5-4 Propiedades de resorte y amortiguador para representar el suelo.

Dirección	Rigidez	Amortiguamiento
Vertical	$K_v = \frac{4Gr_f}{1 - \nu}$	$C_v = \frac{0.75K_v r_f}{V_s}$
Suelo I	$K_v = 669.23 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}}$	$C_v = 3.54 \text{ tonf} \frac{\text{seg}}{\text{cm}}$
Suelo II	$K_v = 1355.18 \frac{\text{tonf}}{\text{cm}}$	$C_v = 3.82 \text{ tonf} \frac{\text{seg}}{\text{cm}}$

Donde $r_f = \sqrt{\frac{B^2}{\pi}}$ se refiere al radio efectivo de la zapata cuadrada, G es el módulo de corte del suelo, ν es el módulo de Poisson del suelo y V_s es la velocidad de onda de corte característica del suelo analizado. Como se observa la relación de rigidez entre suelos es importante ya que el suelo II es un poco mayor a dos veces la rigidez del suelo I, sin embargo, los amortiguadores lineales son muy similares. Se presenta la asignación de estas propiedades en SAP2000® con un elemento Link lineal o Linear Link:

S Linear Link/Support Directional Properties

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>

Shear Distance from End J

U2

U3

Units

Tonf, cm, C

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
669.23	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
3.54	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed

OK Cancel

Figura 5-2 Representación de la flexibilidad del suelo I.

Linear Link/Support Directional Properties

Link/Support Name

Directional Control

Direction	Fixed
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input checked="" type="checkbox"/>

Stiffness Values Used For All Load Cases

Stiffness Is Uncoupled Stiffness Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
1355.18	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed

Damping Values Used For All Load Cases

Damping Is Uncoupled Damping Is Coupled

U1	U2	U3	R1	R2	R3
3.82	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed

Shear Distance from End J

U2

U3

Units

Tonf, cm, C

OK Cancel

Figura 5-3 Representación de la flexibilidad del suelo II.

Como fue mencionado también se incorporó un elemento gap que servirá de transición entre el elemento del aislador y el elemento Link del suelo el cual tendrá 10 veces la rigidez del suelo que se esté evaluando.

The dialog box 'Link/Support Directional Properties' for 'Suelo I' contains the following data:

Identification	
Property Name	Gap
Direction	U1
Type	Gap
NonLinear	Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	6692.3
Effective Damping	0.

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	6692.3
Open	0.

Buttons: OK, Cancel

a) Suelo I

The dialog box 'Link/Support Directional Properties' for 'Suelo II' contains the following data:

Identification	
Property Name	Gap
Direction	U1
Type	Gap
NonLinear	Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	13551.8
Effective Damping	0.

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	13551.8
Open	0.

Buttons: OK, Cancel

b) Suelo II

Figura 5-4 Rigidez del elemento gap utilizado en ambos sistemas.

6. RESULTADOS DE ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA BAJO REGISTROS SÍSMICOS

Hasta este punto se han definido los modelos, en estos se harán análisis tiempo historia no lineales con registros sísmicos que serán relativamente impulsivos con el fin generar el fenómeno de levantamiento y poder entonces evaluar el efecto que este trae a la respuesta de la estructura, además de observar cómo se modifica esta respuesta al flexibilizar la base con los modelos de interacción suelo estructura y con el acoplamiento direccional de los registros.

6.1 Metodología

Se usarán tres modelos diferentes: un modelo con la estructura aislada y los aisladores conectados con el nodo rígido en la base (empotrado) como se muestra en la Figura 4-1 este modelo servirá como parámetro de comparación, y otros dos modelos cada uno con un tipo de suelo asignado como lo especifica la Figura 5-1. Estos modelos serán las variaciones para evaluar cómo modifica el fenómeno de levantamiento a la respuesta de la estructura.

6.2 Análisis tiempo historia no lineal

Los análisis tiempo historia que se realizarán partirán del último paso del caso de carga gravitacional definido en el Capítulo 4.6 con el que se obtuvieron las fuerzas axiales de los aisladores, sirviendo como condición inicial para estos análisis. Dichos análisis serán similares en el método de definición salvo algunas excepciones, por ejemplo, las excitaciones serán cuatro registros sísmicos colocados en las siguientes direcciones: transversal (X), transversal-longitudinal (XY) y transversal-longitudinal-vertical

(XYZ); con el fin de observar el efecto de acoplamiento direccional. Y otra diferencia será el amortiguamiento que se asignará $\xi_{1-3} = 0.5\%$ en los primeros tres modos y $\xi_{4-90} = 2\%$ en los modos subsiguientes.

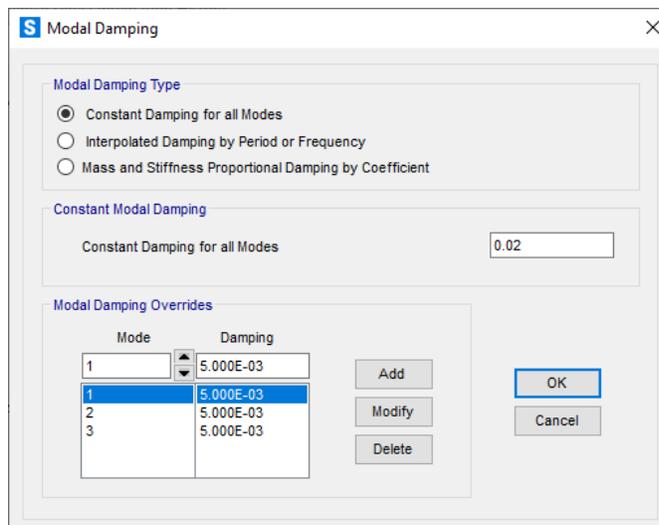


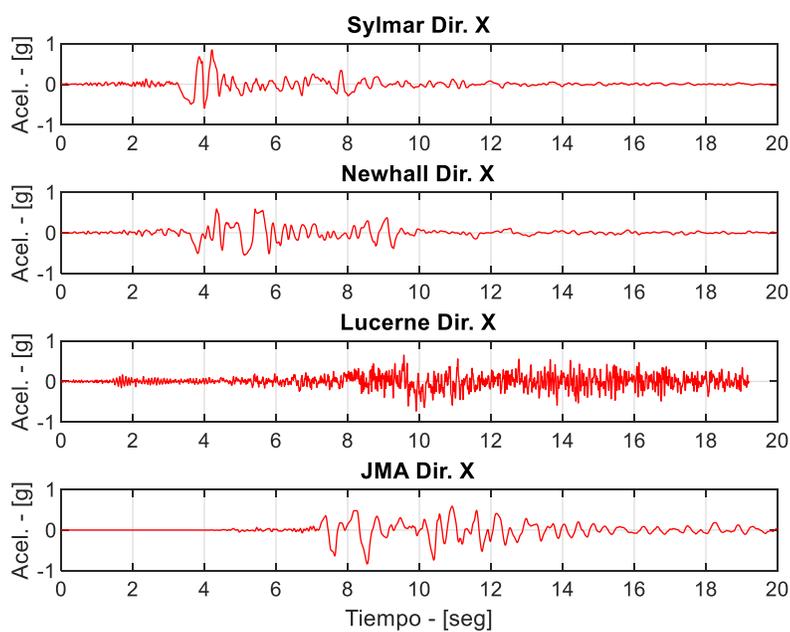
Figura 6-1 Amortiguamiento asignado para análisis tiempo historia no lineal con excitaciones sísmicas.

6.3 Registros sísmicos seleccionados

La selección de los registros sísmicos a emplear en estos análisis resulto en los siguientes:

Tabla 6-1 Aceleraciones máximas de los registros sísmicos.

Registro	Evento	Dir. X	Dir. Y	Dir. Z
		g	g	g
Sylmar	Northridge (EEUU. 1995) M = 6.7	0.842	0.604	0.535
Newhall	Northridge (EEUU. 1995) M = 6.7	0.589	0.582	0.547
Lucerne Valley	Landers (EEUU. 1992) M = 7.5	0.731	0.805	0.864
JMA	Kobe (Japón. 1995) M = 7.2	0.834	0.629	0.339



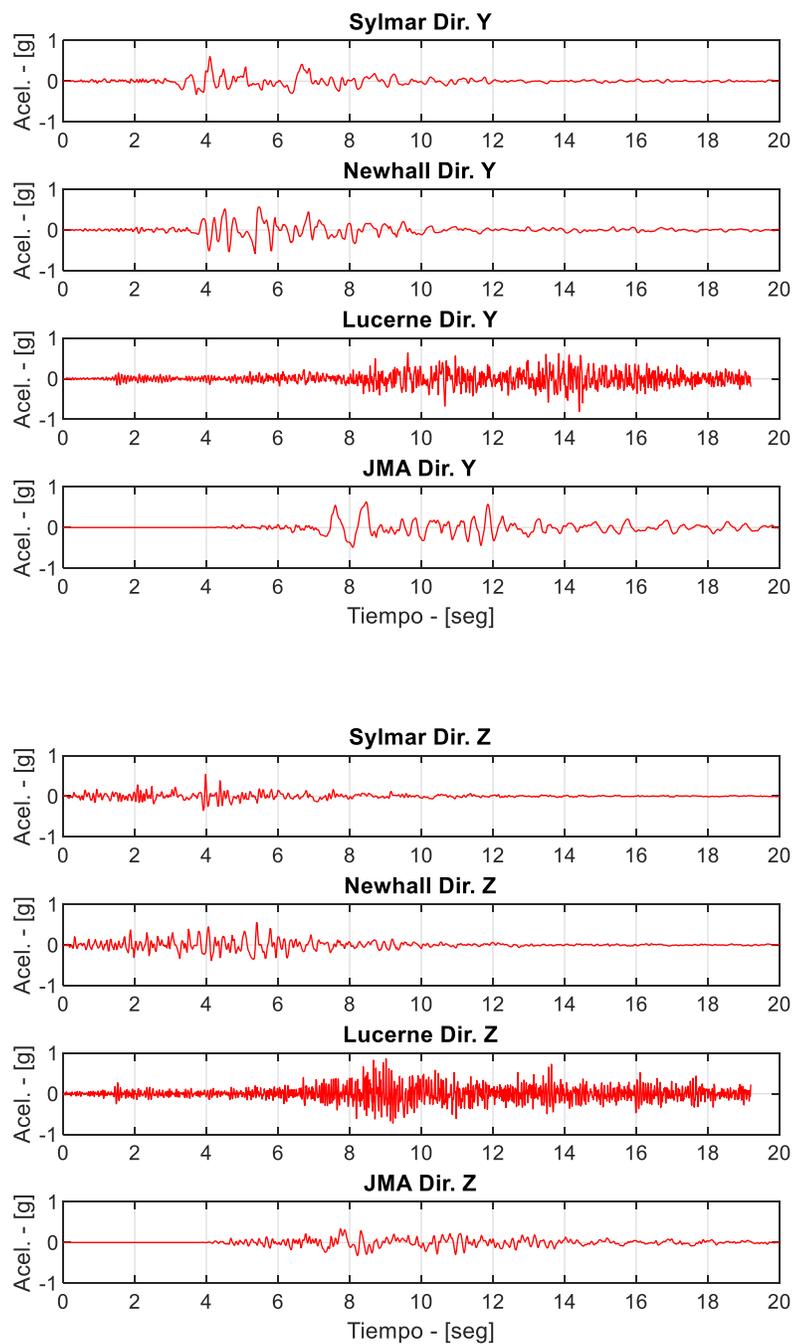


Figura 6-2 Componentes de aceleraciones de registros sísmicos.

6.4 Respuesta global

A nivel global se pueden presentar algunas respuestas que podrían ser interesantes para obtener conclusiones, por ejemplo: drift de entrepiso, aceleraciones máximas de techo y cortes basales máximos; las cuales darían una idea de cómo afecta el fenómeno del levantamiento al sistema para el modelo del suelo escogido.

6.4.1 Drift de entrepiso

A continuación, se presentarán las respuestas globales de drift en la dirección X (transversal), de los casos de estudio.

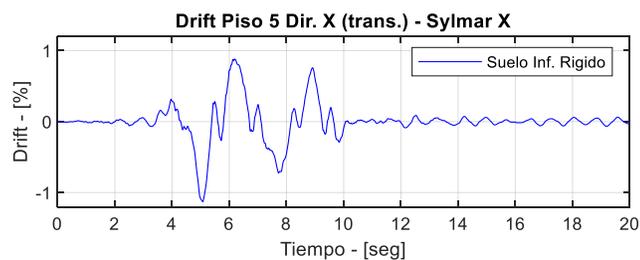
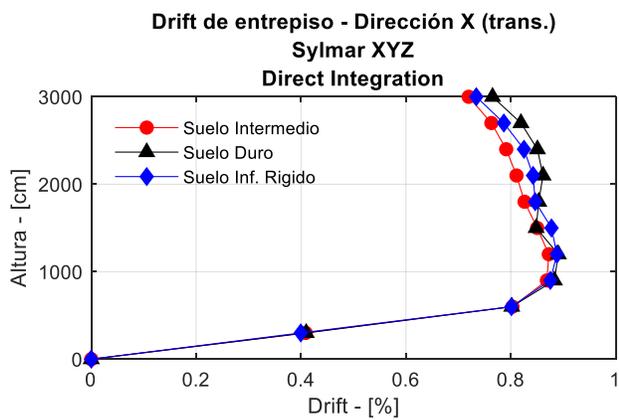
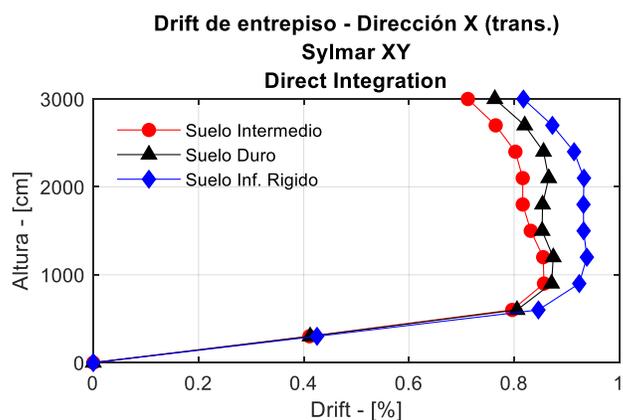
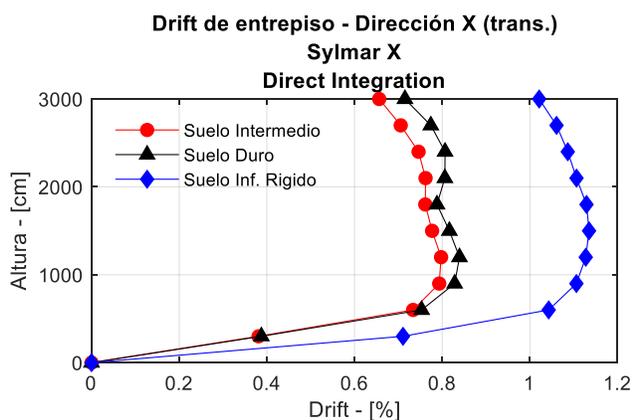


Figura 6-3 Drift máximos absolutos de los sistemas y respuesta en el tiempo del piso 5 para el registro de Sylmar.

A primera vista llama a la atención en la Figura 6-3 que la demanda de drift sea tan alta para un edificio que cuenta con aisladores sísmicos. Sin embargo, si se observa en el drift en el tiempo del piso 5 para el sismo de Sylmar solo considerando la componente X, se puede apreciar que para instantes de tiempo entre $0 \leq t \leq 3$ segundos y $10 < t \leq 20$ segundos la demanda de drift es realmente pequeña que sería lo que cualquiera esperaría de una edificación aislada, pero entre los segundos $3 \leq t \leq 10$ la demanda aumenta de manera sustancial. Esto ocurre porque dentro de este último intervalo ocurren levantamientos de todo un eje de la estructura, esto se verá más claramente en el apartado de respuestas locales (ver Figura 6-15 y Figura 6-16), lo cual entonces da sentido a que las demandas de entrepiso sean tan grandes. Por otra parte, dentro del mismo análisis se observa que la demanda de drift para los modelos que incorporan interacción suelo estructura fue menor que la que considera el suelo empotrado o infinitamente rígido. Además, se resalta que al acoplar el sismo en las direcciones XY se aumentó la demanda de drift en los modelos con interacción suelo estructura, aunque se redujo para el de suelo infinitamente rígido o empotrado y para el acoplamiento XYZ la demanda de drift es aproximadamente similar para los tres modelos.

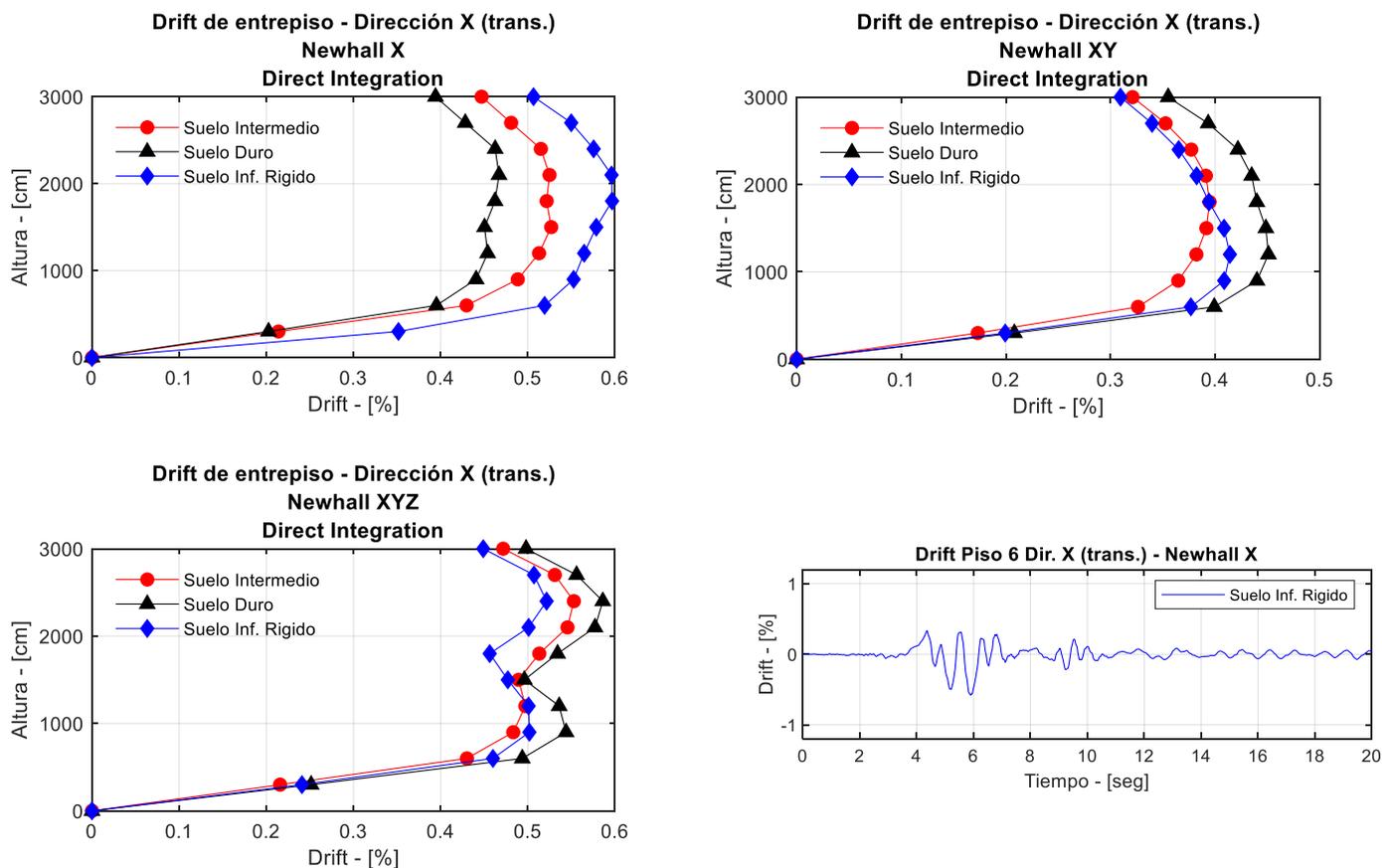


Figura 6-4 Drift máximos absolutos de los sistemas y respuesta en el tiempo del piso 6 para el registro de Newhall.

En el registro de Newhall considerando solo la componente X del sismo se aprecia que la demanda de drift es mayor para el modelo de suelo empotrado de la misma manera que en el registro de Sylmar, sin embargo, se obtuvieron drift menores en el modelo de suelo duro que en el modelo de suelo intermedio, esto es debido a que los niveles de levantamiento en el modelo de suelo duro fueron ligeramente superiores a los del modelo de suelo intermedio. Al poner la atención en el análisis de componentes XY se observa que el modelo de suelo rígido redujo la demanda de drift comparada con el análisis en X, aunque se destaca que para el modelo del suelo duro no se redujo tanto, por lo menos en términos de drift máximo total, lo interesante en

este caso es que el modelo de suelo intermedio se redujo importantemente comparado con el análisis anterior. Acoplado las componentes XYZ se resalta que los niveles de drift son aproximadamente iguales, aunque cabe decir que los modelos de la interacción suelo estructuras generaron demanda de drift mayores que el modelo de suelo empotrado para este caso. También cabe decir que la demanda máxima en todos los modelos de este último análisis fue dada en el piso 8 lo que traería la idea de que para este caso en que se acoplan los registros XYZ la respuesta de los modos superiores tomo mayor participación que en los análisis anteriores.

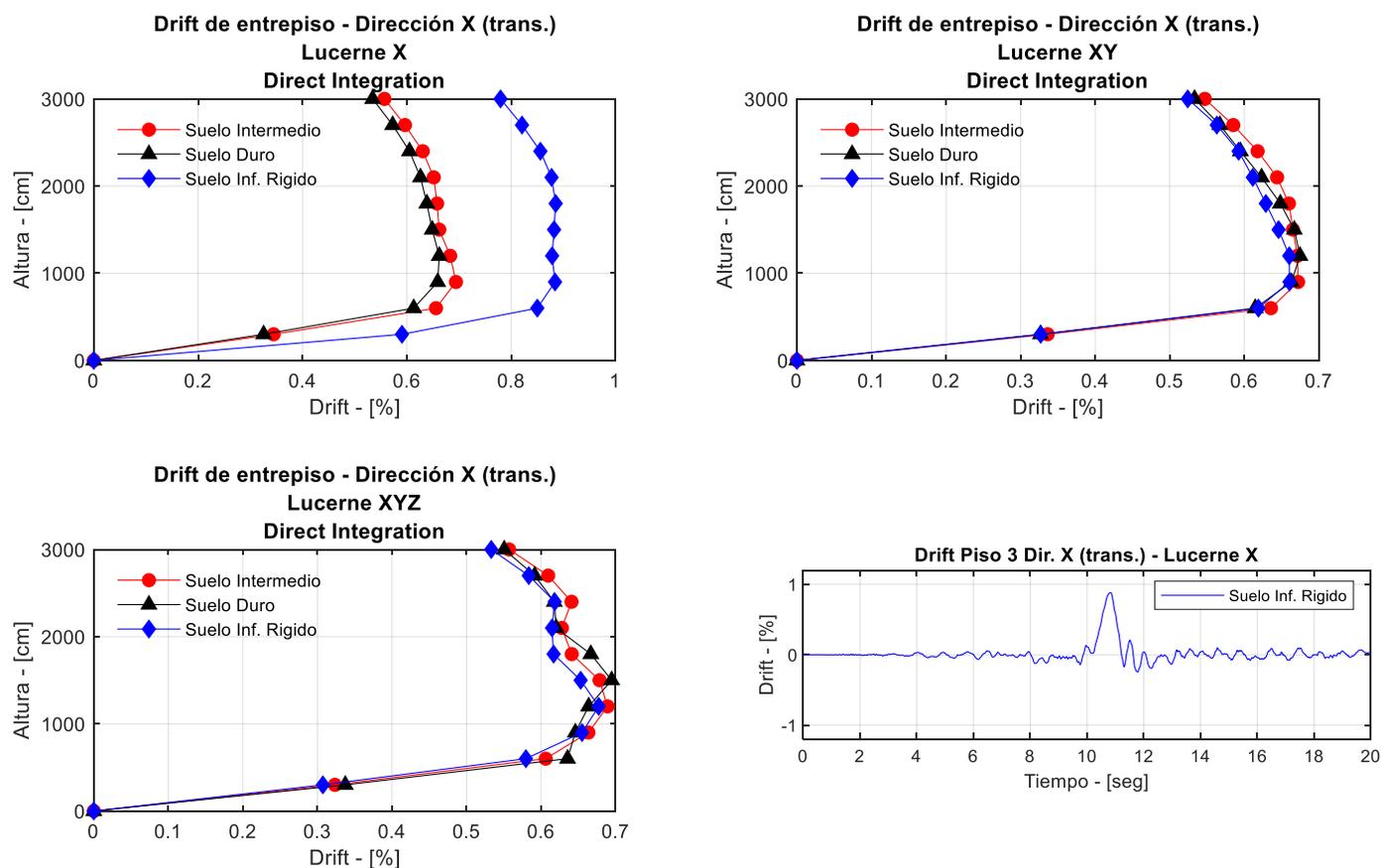


Figura 6-5 Drift máximos absolutos de los sistemas y respuesta en el tiempo del piso 3 para el registro de Lucerne

Esta figura presenta los resultados obtenidos en el registro de Lucerne que al igual que en los registros anteriores se observa que para en análisis X el nivel de demanda de drift es mayor para el modelo de suelo infinitamente rígido y este nivel de desplazamiento es producido precisamente en el momento que se produce el levantamiento máximo. Para el caso de este registro los modelos de interacción suelo estructura mantienen una demanda de drift relativamente similar lo cual es similar en los análisis XY y XYZ, destacando que al igual que en los demás registros la respuesta máxima del modelo de suelo infinitamente rígido se redujo hasta hacerse relativamente similar a la de los modelos de interacción suelo estructura.

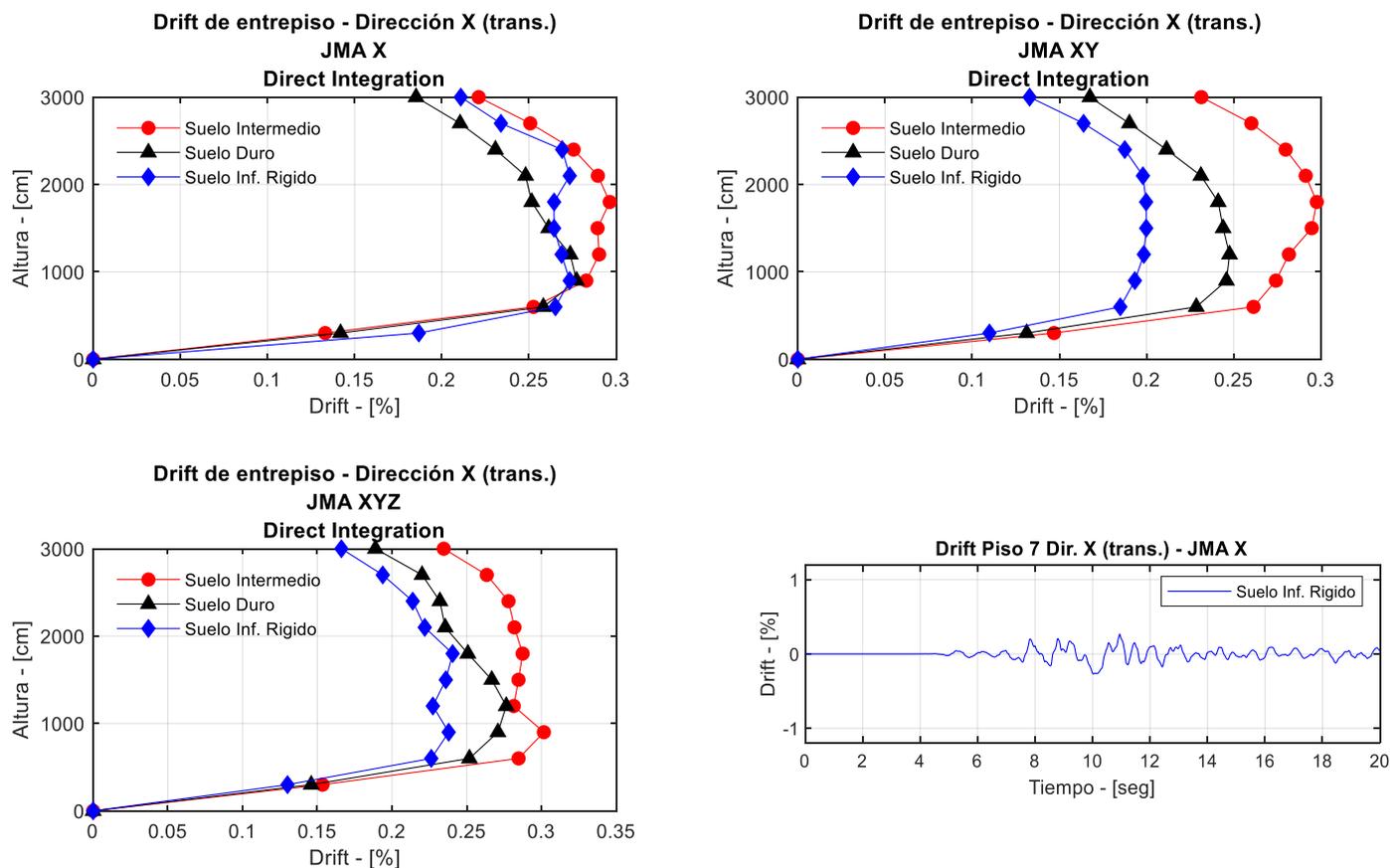


Figura 6-6 Drift máximos absolutos de los sistemas y respuesta en el tiempo del piso 7 para el registro de JMA

A diferencia de los demás registros, el registro de JMA no generó niveles de levantamiento importantes como se verá más adelante (ver Figura 6-20), por lo que la demanda de drift fue realmente pequeña aún para los niveles de aceleración máxima que contiene este registro que son importantes. Se observa que en todos los análisis el que obtiene mayor demanda de drift es el del suelo intermedio, o sea el suelo más flexible.

En resumen, los niveles de drift están atados al levantamiento de la base lo cual hace irrelevante que la estructura se aislé porque los drift siguen siendo altos hasta niveles en los que se esperaría daño en los elementos de la superestructura.

6.4.2 Aceleraciones de techo

Es importante mostrar las aceleraciones de techo porque estas dan la idea de lo que podría estar sucediendo con elementos no estructurales. A continuación, se presentan las aceleraciones máximas registradas en el techo en la dirección X (transversal).

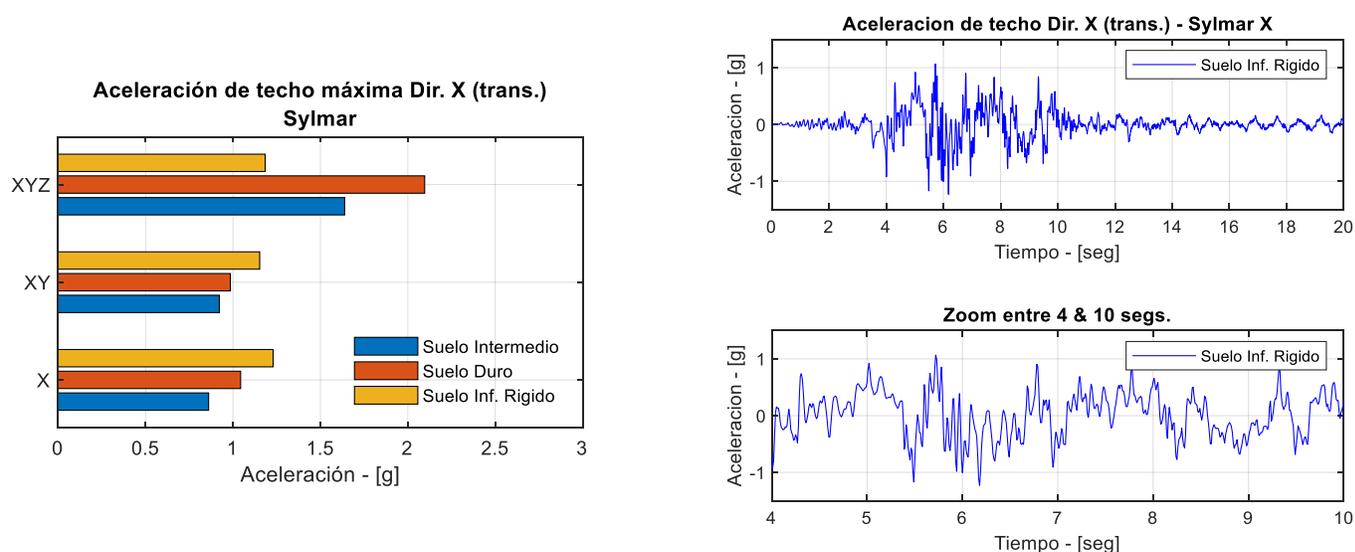


Figura 6-7 Aceleraciones para los distintos análisis del registro de Sylmar y aceleración en el tiempo del techo para el caso de suelo infinitamente rígido.

Al igual que con los drift se aprecia que en los instantes de tiempo en los que ocurre levantamiento las aceleraciones del techo aumentan significativamente, pero no es hasta un poco luego que el aislador levantado impacta con la base que se general peaks importantes de aceleración en el techo. Por otra parte, en los análisis X e XY se observa que a medida que el suelo se hace más flexible la aceleración el techo

disminuye, pero en el análisis XYZ se presenta que en el suelo duro las aceleraciones sobrepasan $2g$, el modelo de suelo intermedio presenta aceleraciones máximas de superan la marca de $1.5g$ y en el modelo de suelo de suelo infinitamente rígido o empotrado las aceleraciones rondan entre $1.1 - 1.2g$.

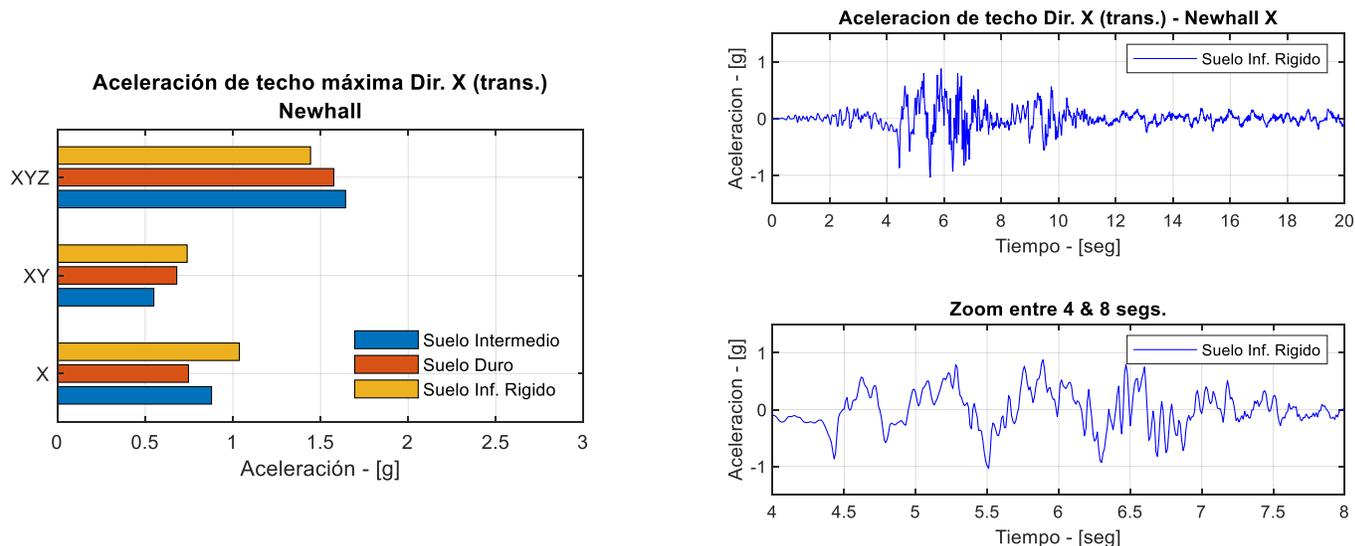


Figura 6-8 Aceleraciones para los distintos análisis del registro de Newhall y aceleración en el tiempo del techo para el caso de suelo infinitamente rígido.

En el registro de Newhall se muestra a diferencia del registro de Sylmar que las aceleraciones en del análisis solo en la dirección X resultaron menores en el modelo de suelo duro que en modelo de suelo intermedio, aunque el modelo de suelo infinitamente rígido resultó ser mayor que estos dos últimos. Al acoplar las componentes XY aprecia que las aceleraciones se redujeron para todos los modelos, sin embargo, al acoplar las componentes XYZ las aceleraciones de todos los modelos aumentaron en aproximadamente un 50%.

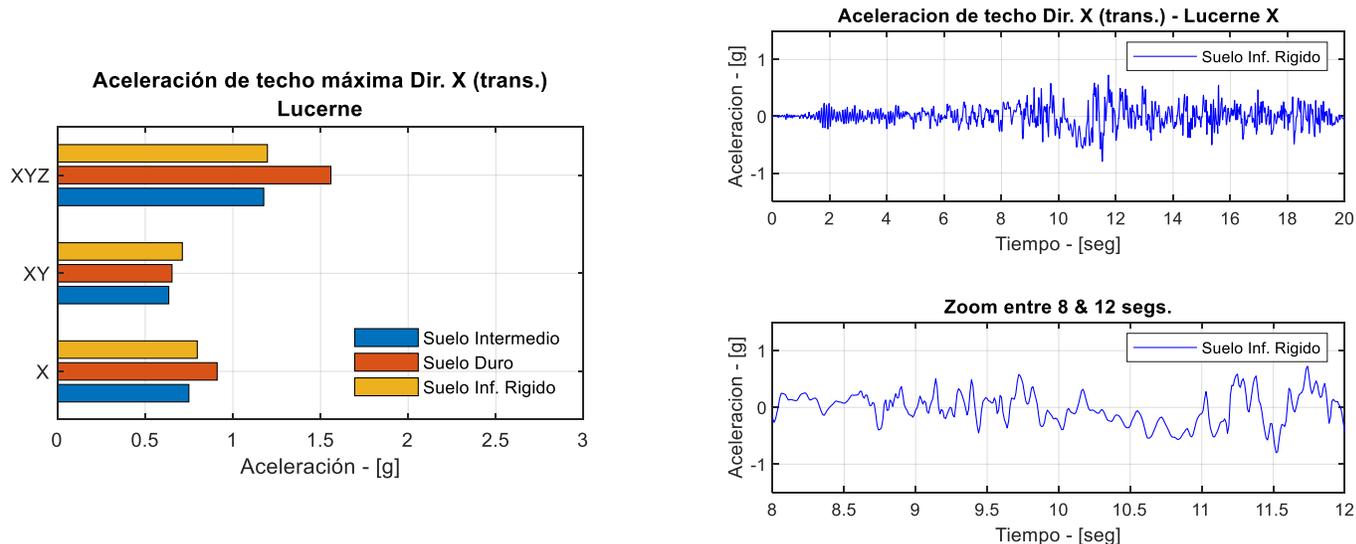


Figura 6-9 Aceleraciones para los distintos análisis del registro de Lucerne y aceleración en el tiempo del techo para el caso de suelo infinitamente rígido.

En el registro de Lucerne para el análisis en la componente X se observa para la aceleración en el tiempo de modelo de suelo infinitamente rígido que la aceleración máxima se da en el mismo instante en el que se dio el drift máximo como se muestra en la Figura 6-5, este coincide en el mismo instante donde se produce el levantamiento máximo en este modelo para ese análisis. Revisando los diagramas de barras se ve que en el análisis solo de componente X el modelo de suelo duro tiene la aceleración mayor, que los demás modelos. Al acoplar las componentes XY estas aceleraciones disminuyen quedando es todos los modelos aproximadamente iguales, sin embargo, al acoplar XYZ las aceleraciones máximas aumentan sustancialmente.

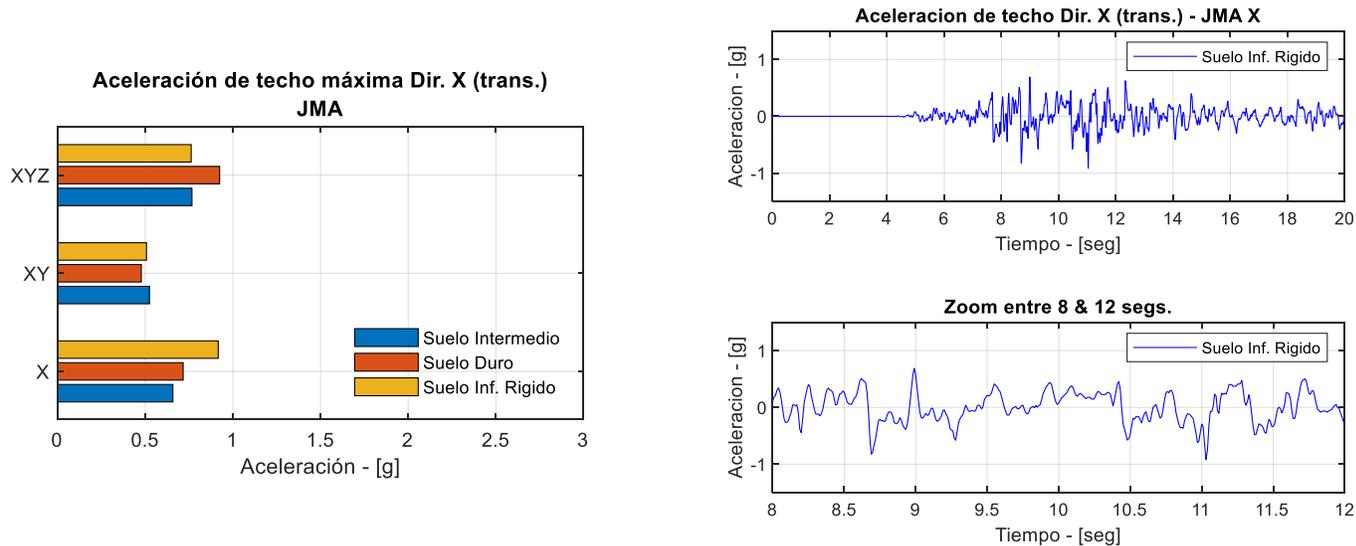


Figura 6-10 Aceleraciones para los distintos análisis del registro de JMA y aceleración en el tiempo del techo para el caso de suelo infinitamente rígido.

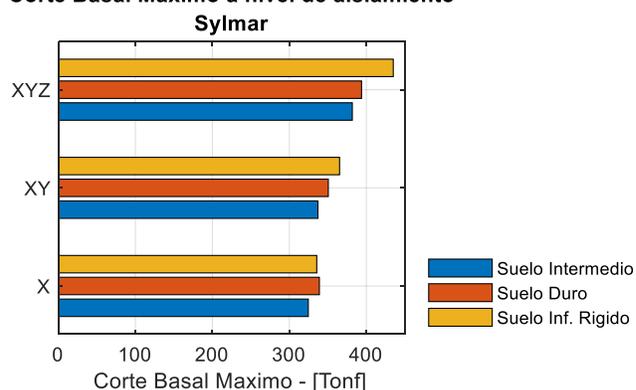
Finalmente se tiene el registro de JMA en el cual no sucedieron levantamientos muy importantes por lo que las aceleraciones máximas no fueron de igual magnitud que en los registros anteriores, sin embargo, fueron aceleraciones que el autor estima importante para cualquier sistema no estructural. Además, se aprecia también que al igual que en todos los demás registros las aceleraciones máximas laterales se aumentaron, aunque en menor medida, al acoplar las aceleraciones XYZ.

Se puede concluir de igual manera que las aceleraciones laterales con este tipo de aisladores dependen de la inclusión del registro en la dirección vertical, además del levantamiento que pueda existir en la estructura. Dicho levantamiento puede generar aceleraciones muy importantes a nivel de techo.

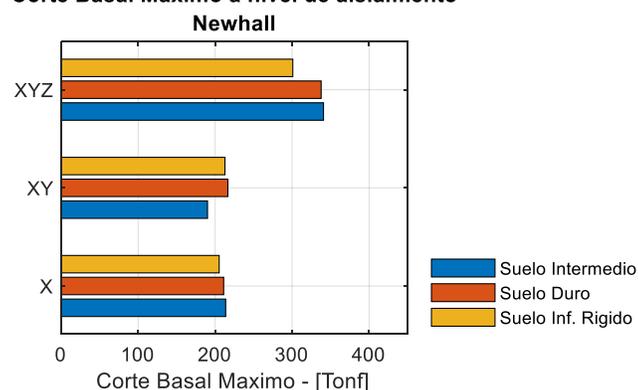
6.4.3 Corte basal

A continuación, se presenta el corte basal máximo a nivel de los aisladores en la dirección X (transversal):

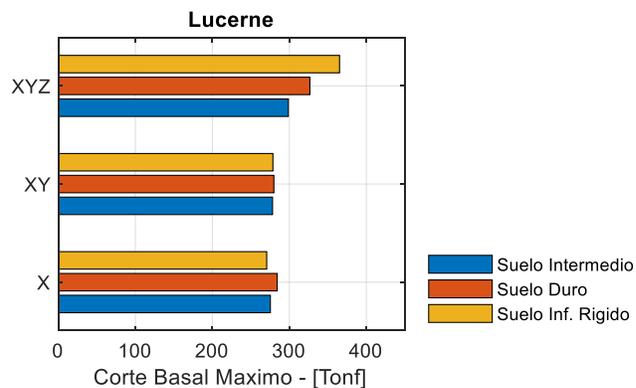
Corte Basal Máximo a nivel de aislamiento



Corte Basal Máximo a nivel de aislamiento



Corte Basal Máximo a nivel de aislamiento



Corte Basal Máximo a nivel de aislamiento

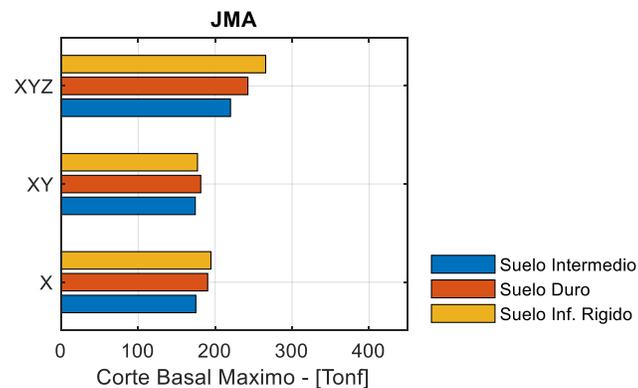


Figura 6-11 Corte basal máximo en la dirección X (trans.) para todos los análisis y modelos.

La Figura 6-11 presenta los cortes basales máximos en la dirección X (transversal) del edificio. Se observa que en estos términos el registro de Sylmar fue el más severo teniendo cortes basales mayores a 300 tonf para todos los análisis y todos los modelos. Llama a la atención que similarmente a como sucedió con las aceleraciones laterales, el corte basal aumentara considerablemente al acoplar los registros en la dirección

vertical (Z), sin embargo, al solo acoplar las direcciones XY la diferencia entre cortes máximos no se ve afectada de manera importante.

6.5 Respuesta local

Al haber visto la respuesta del edificio a nivel global, se propone resaltar algunas respuestas locales a nivel de los aisladores como los diagramas de histéresis lateral en la dirección X (transversal), la demanda de fuerzas axiales y levantamientos en dichos dispositivos.

6.5.1 Histéresis deformación lateral vs. Fuerza lateral

A continuación, se presentarán los diagramas de histéresis obtenidos en cada análisis para los aisladores (1 – 4), ya que por simetría los aisladores (5 – 8) son similares a estos últimos (ver Figura 4-1). También se mostrarán los diagramas solamente del registro de Sylmar.

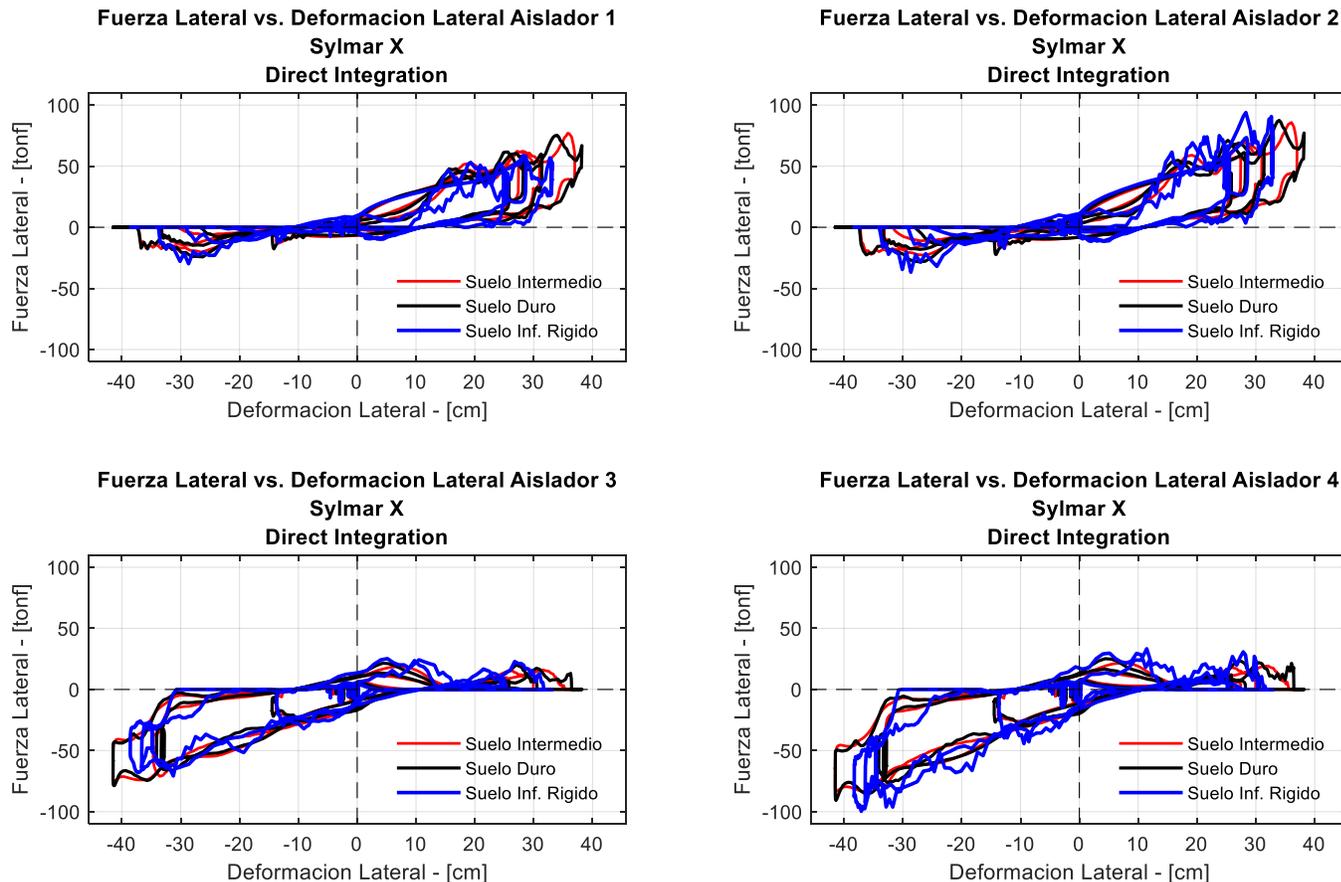


Figura 6-12 Diagrama de histéresis en dirección transversal para el registro de Sylmar Dir. (X).

La Figura 6-12 presenta los diagramas de histéresis para el registro de Sylmar considerando solo la componente X, se observa que la fuerza lateral o fuerza de corte máxima sobre el aislador es mayor en los aisladores centrales (2 & 4) ya que como se observó en el Capítulo 3 esta fuerza depende de la fuerza axial que este recibiendo. Por otra parte, si se comparan estos diagramas con el diagrama esquematizado en la Figura 3-3, se nota que los aisladores (1 & 2) en el eje (B) desarrollan fuerzas de corte importantes cuando el desplazamiento es positivo, pero cuando el desplazamiento es negativo no desarrollan fuerzas similares, esto es caso opuesto en los aisladores (3&4) en el eje (A). Efectivamente esto sucede por el fenómeno del levantamiento a la

estructura levantarse, los aisladores al levantarse se descargan debido al elemento gap y si no existe una fuerza de compresión en este eje de aisladores levantados pues la fuerza de corte también es cero. Otro aspecto importante para resaltar es que los desplazamientos de los aisladores no varían no significativamente dependiendo de la rigidez del suelo. Prestando atención a la forma de los diagramas se ve de manera interesante que los efectos de alta frecuencia son disminuidos a medida que la rigidez del suelo se reduce, esto tiene relación directa con cómo está variando la fuerza axial en los aisladores.

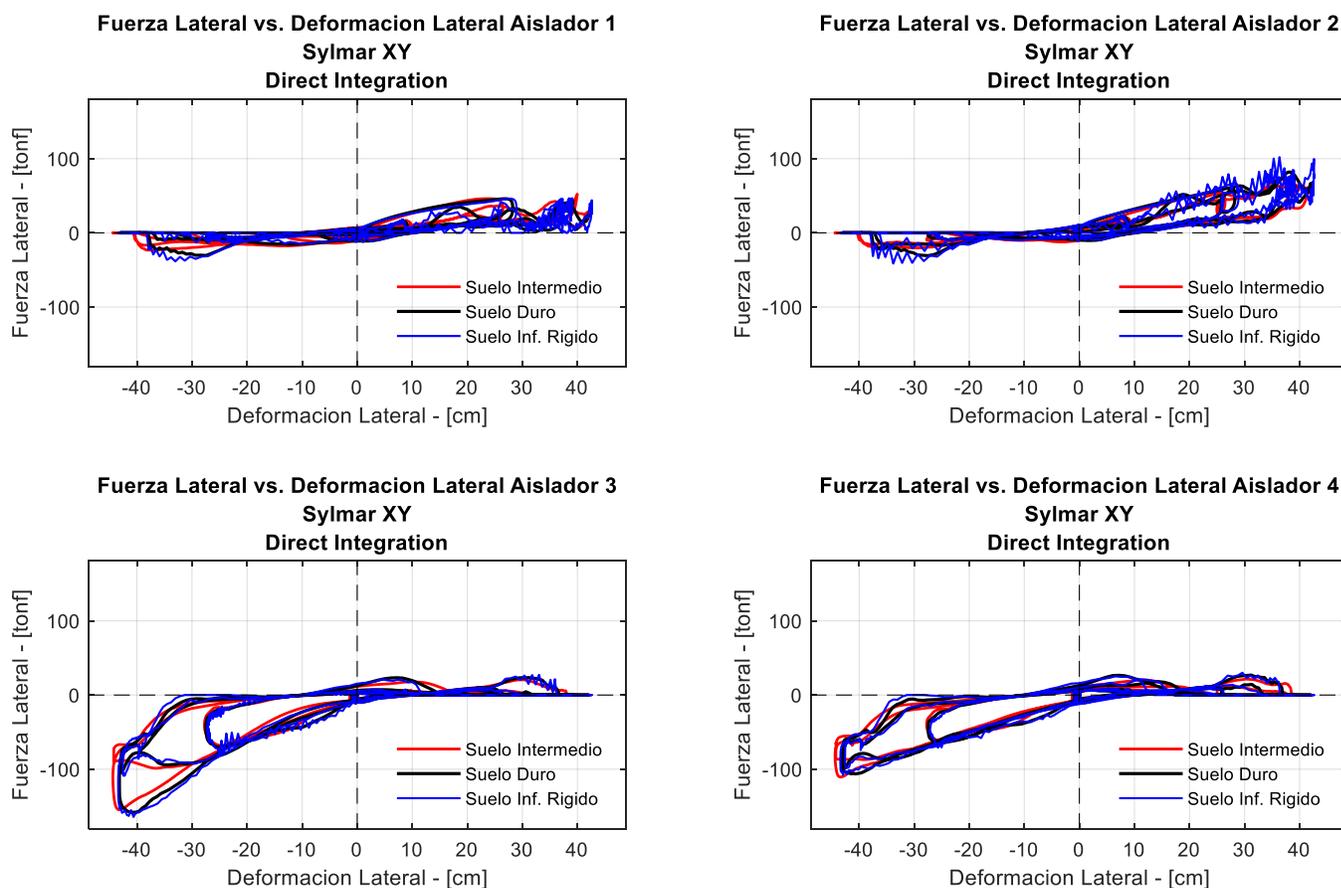


Figura 6-13 Diagrama de histéresis en dirección transversal para el registro de Sylmar Dir. (X-Y).

Al acoplar las direcciones del sismo en las direcciones (X-Y) se presentan diferencias apreciables en comparación con solo considerar una sola dirección del registro. Una de estas es que en el eje (B) donde se encuentran los aisladores (1 & 2) la demanda de fuerza lateral o corte es reducida significativamente, sin embargo, en el eje (A) donde están los aisladores (3 & 4) las fuerzas resultaron aún mayores que en el pasado análisis donde existía de alguna manera “cierta” simetría en términos de la magnitud de las fuerzas, este fenómeno es debido a que la estructura está siendo excitada en dos direcciones. Las fuerzas axiales aumentan abruptamente en el orden de 3 veces la carga axial debido a la acción gravitacional (ver Tabla 6-2). También se nota que la frecuencia de las oscilaciones de fuerzas laterales para el caso de este registro se redujo importantemente en comparación con el caso con el registro solo en la dirección X. Además de todo esto se resalta que el efecto de interacción suelo no tuvo ningún efecto importante respecto a la demanda de fuerzas y de desplazamiento lateral.

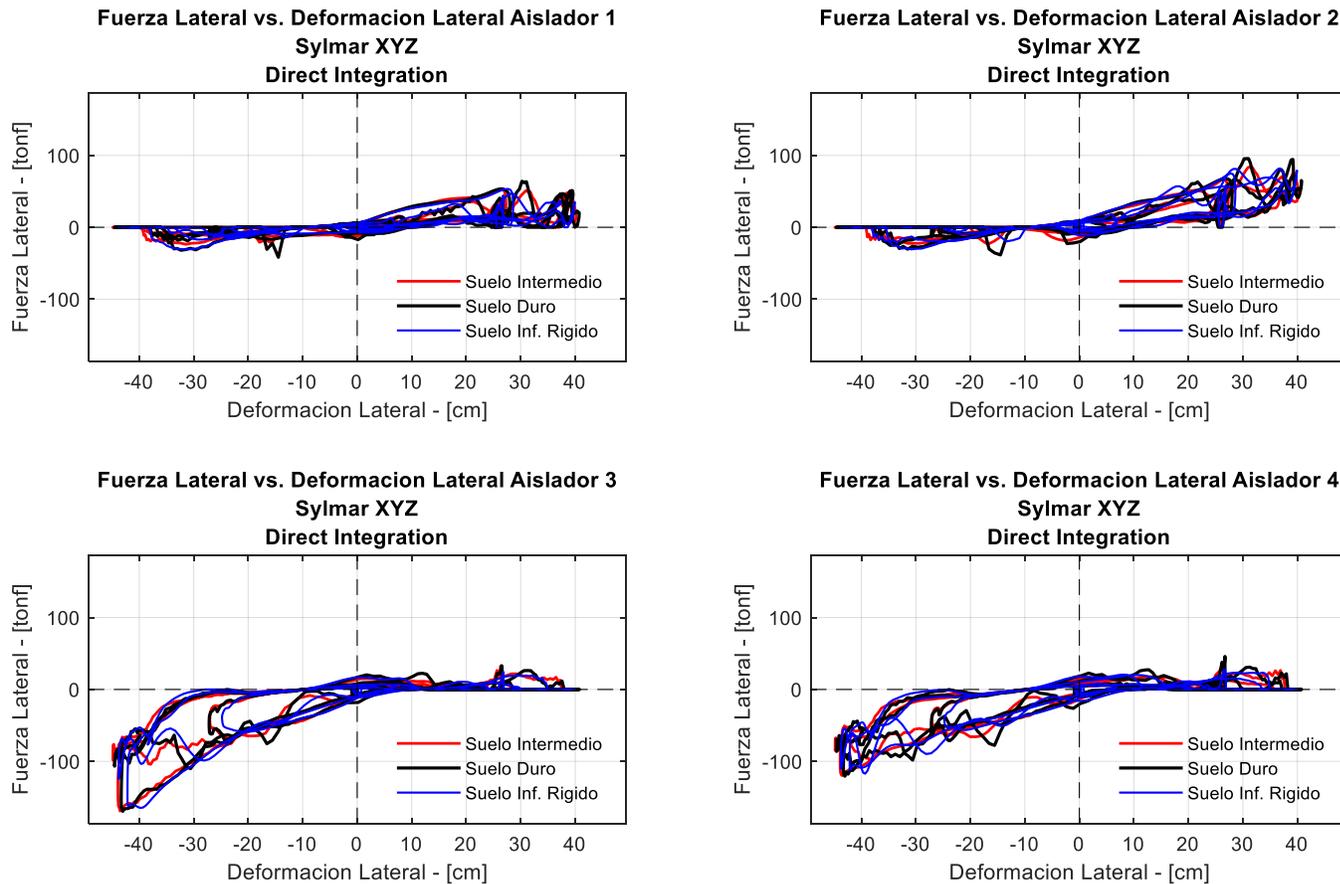
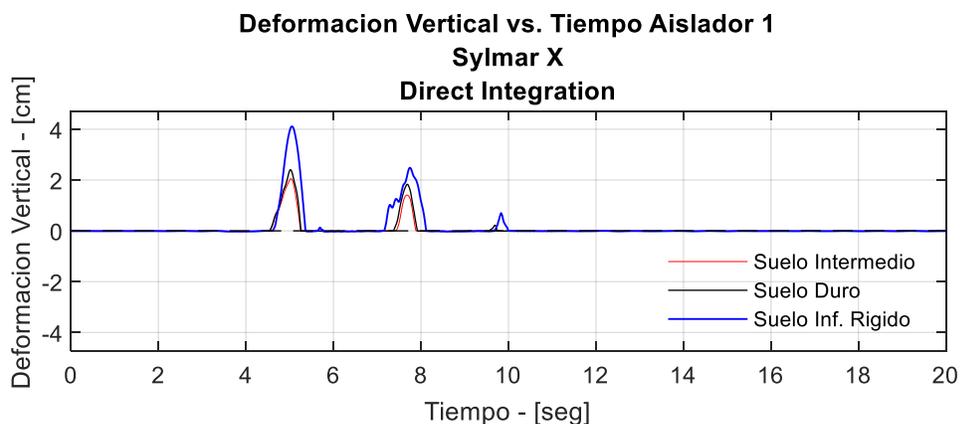
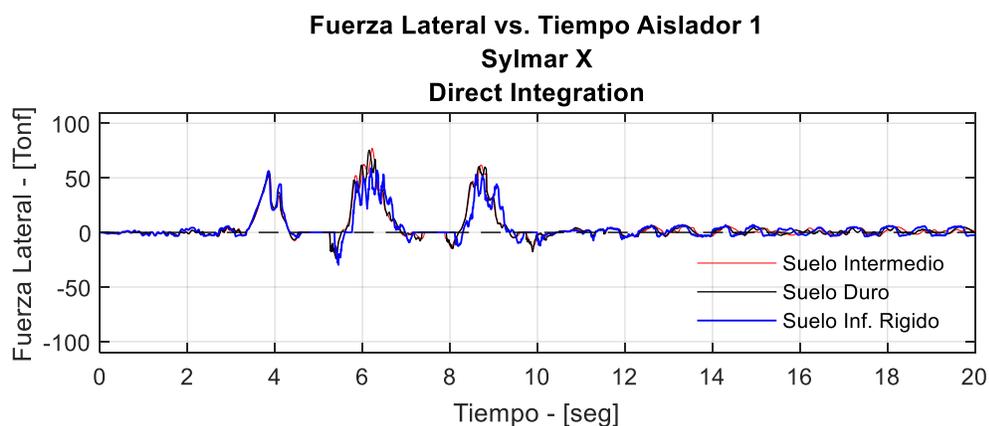


Figura 6-14 Diagrama de histéresis en dirección transversal para el registro de Sylmar Dir. (X-Y-Z).

La Figura 6-14 muestra los diagramas de histéresis al excitar los modelos en las tres componentes traslacionales, esta condición no presenta grandes diferencias en la demanda de fuerza y desplazamientos para este registro comparado con solo el acoplamiento (X-Y).

6.5.2 Fuerza axial y levantamiento

Ya que la fuerza lateral depende de la fuerza axial que el aislador soporte en dicho instante de tiempo, se presentarán las respuestas en el tiempo de las fuerzas axiales para observar de mejor manera este fenómeno, esto se hará para el registro de Sylmar solo en la dirección X. Luego se mostrarán tablas resumen en las que se denotarán las fuerzas de compresión máxima obtenida en cada modelo para cada registro y la deformación axial máxima positiva (tracción) la cual denotará el levantamiento del aislador observado en cuestión.



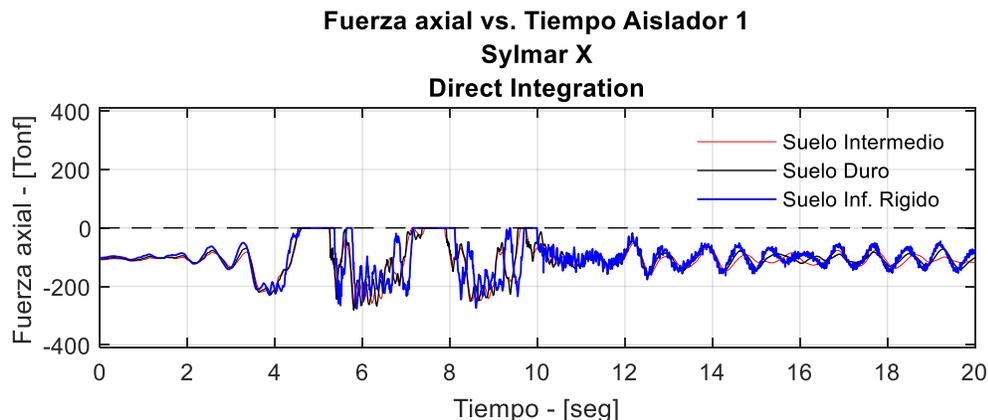
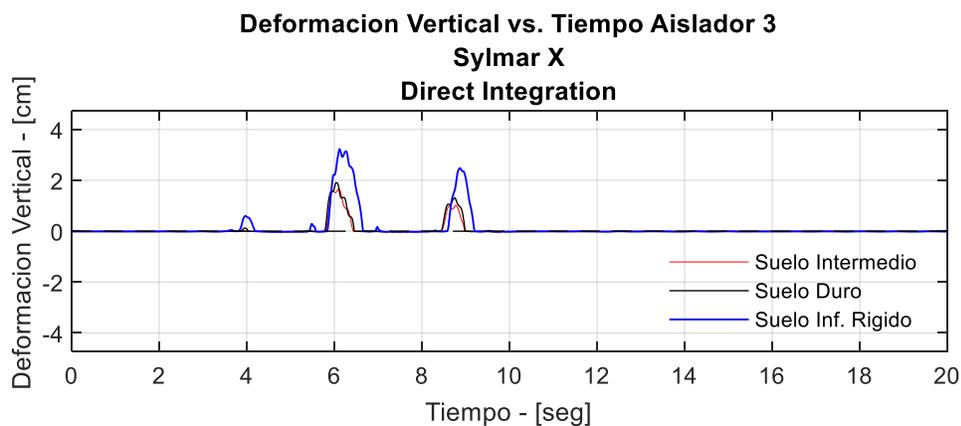
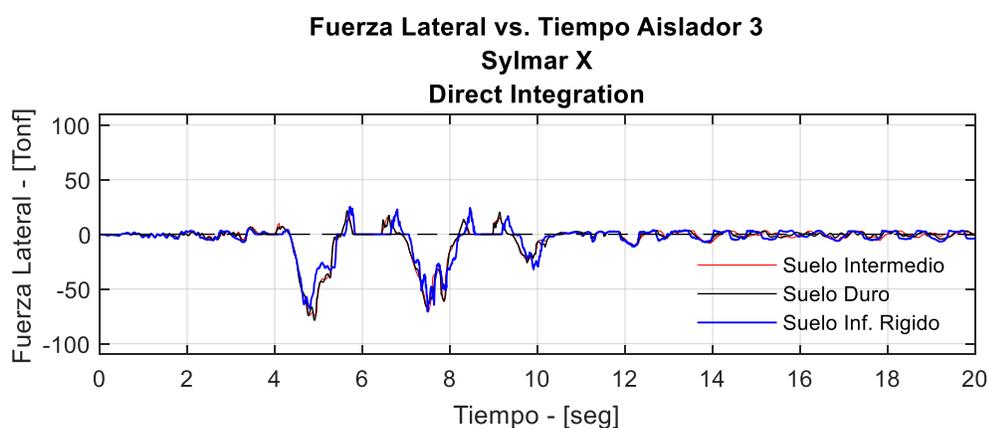


Figura 6-15 Respuesta en el tiempo lateral y axial para el registro de Sylmar, Aislador 1.

La Figura 6-15 presenta la respuesta del aislador 1 para el registro de Sylmar en el tiempo. Se muestran estas figuras colocadas una encima de la otra y en la misma escala con el fin de comprender lo que está sucediendo en dicho aislador. Se aprecia que la fuerza axial en el aislador se mantiene de manera relativamente constante hasta alrededor de 0 a 2 segundos donde la fuerza comienza a oscilar con mayor amplitud hasta que entre el segundo 2 y 4 se muestra un aumento significativo de la fuerza axial soportada por el aislador en ese mismo instante experimenta aumento de demanda en las fuerzas de corte, esto sucede porque el eje paralelo a este aislador experimentó levantamiento y gran parte del peso del edificio se transmitió al eje (B) donde se encuentra el aislador (1). Si se observa detenidamente la fuerza axial entre los segundos 0 y 4 se puede ver que el aumento es del doble de la fuerza axial inicial lo que hace sentido de que se haya levantado todo el eje (A) y todo el peso del edificio quede sostenido por el eje (B). Entre los segundos 4 y 6 el aislador experimenta levantamiento ahora enviando el peso del edificio al eje (A), donde se observa algo importante y es que el levantamiento experimentado para el modelo de suelo rígido es mayor que los

modelos de suelo flexible. Al momento en el que aislador vuelve a comprimirse las fuerzas axiales se crecen abruptamente a más de dos veces la fuerza axial inicial por carga gravitacional y en consecuencia las fuerzas laterales se incrementan.

A continuación, se presenta el aislador (3) para observar las fuerzas del lado del eje (A) para el registro de Sylmar en dirección X.



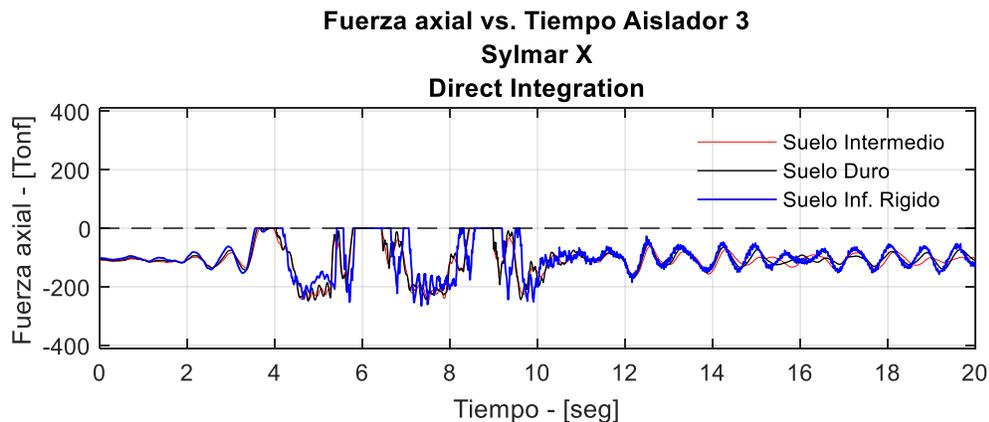


Figura 6-16 Respuesta en el tiempo lateral y axial para el registro de Sylmar (X), Aislador 3.

La Figura 6-16 muestra precisamente que en el segundo 4 se experimentó un levantamiento en el eje (B) lo que hizo que el aislador (1) en el eje (A) recibiera el peso de que este estaba soportando, luego entre los segundos 4 y 6 se vio que en el aislador (1) se levantó apreciablemente todo el peso de la estructura cayó sobre el eje (B) con una carga axial similar lo que también incrementa las fuerzas laterales. Por otra parte, se observa que el levantamiento para este caso fue mayor en el modelo con la base del aislador empotrada y significativamente menor en los aisladores con base flexible y que las fuerzas axiales varían con mayor frecuencia que los que tienen base flexible.

Este análisis se realizó para todos los registros y modelos, a continuación, se presentan los resultados de las fuerzas axiales máximas de compresión y las deformaciones axiales máximas positivas (tracción en los aisladores) que representan el levantamiento máximo sufrido en el aislador.

Tabla 6-2 Fuerzas axiales y deformaciones máximas en los aisladores para el registro de Sylmar.

Modelos	Fuerza Axial Tonf				Deformación Axial cm			
	Aislador 1	Aislador 2	Aislador 3	Aislador 4	Aislador 1	Aislador 2	Aislador 3	Aislador 4
Registro Sylmar - Integración Directa Dir. X								
Suelo I	276	308.8	250.5	279.8	2.051	1.982	1.66	1.597
Suelo II	280.9	310.9	248.7	284.7	2.408	2.348	1.914	1.871
Empotrado	276.4	372.6	265.6	353.3	4.109	4.287	3.233	3.35
Registro Sylmar - Integración Directa Dir. XY								
Suelo I	220.1	256.7	448.1	319.5	1.633	1.75	2.789	2.218
Suelo II	277.8	297.4	486.8	326.1	2.304	2.467	2.892	2.57
Empotrado	299.4	348.5	498.7	321	2.83	2.933	2.875	2.552
Registro Sylmar - Integración Directa Dir. XYZ								
Suelo I	293.3	369.7	486.5	352	1.774	2.056	2.803	2.42
Suelo II	338	407.2	500.3	467.7	2.053	2.324	2.852	2.589
Empotrado	296.9	443.6	513.6	366.6	2.544	2.654	2.621	2.35

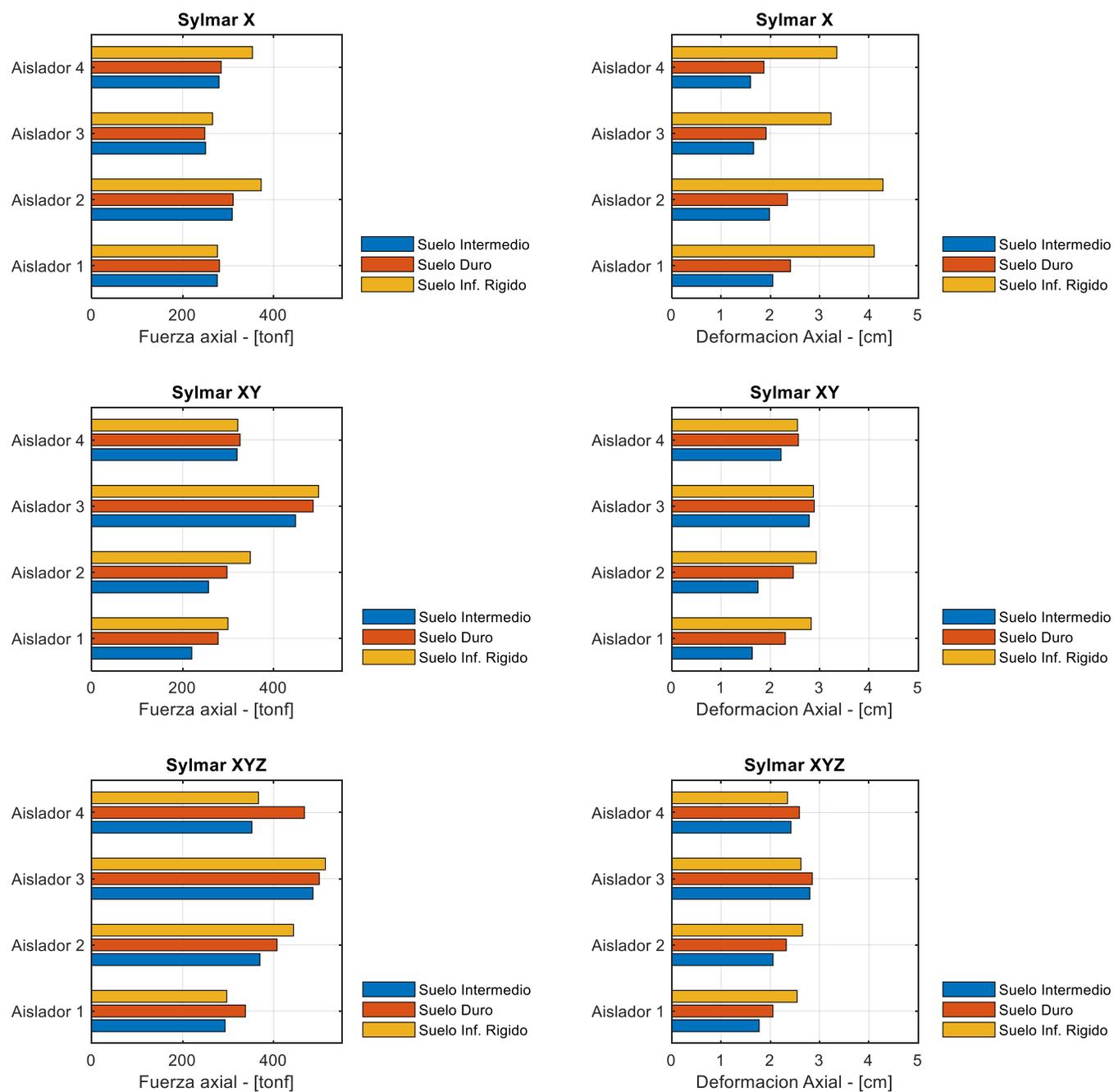


Figura 6-17 Representación gráfica de las fuerzas axiales máximas y levantamiento máximo del registro de Sylmar.

En el registro de Sylmar dentro del análisis (X) se aprecian levantamientos importantes de 4.109 cm, 4.287cm, 3.233cm y 3.35cm en los aisladores (1-4) respectivamente dichos levantamientos fueron disminuidos a medida que el modelo utilizado representaba un suelo más flexible, en especial en el caso de los aisladores (3-4) donde se presentaron reducciones comparado con el modelo empotrado de hasta un 53.77%. La fuerza axial también muestra un comportamiento similar a las deformaciones salvo en el aislador (1) del modelo del suelo II en el que la demanda de fuerza axial es ligeramente más alta que el modelo de base empotrada con una diferencia de 1.63%. Al acoplar la excitación en ambas direcciones horizontales (XY) se resalta rápidamente que el levantamiento es disminuido para los aisladores (1-4) del modelo de base empotrada con reducciones de hasta 31.58% con respecto a las obtenidas en el análisis (X). Se presentan reducciones en los aisladores comparadas con el modelo empotrado de hasta un 42.30% aunque en el modelo de suelo II para los aisladores (3-4) existen levantamientos superiores al modelo de base empotrada con diferencias pequeñas de 0.59% y 0.71% respectivamente. Las cargas axiales en este análisis son reducidas a medida que la base del suelo es más flexible, salvo en el aislador (4) el cual presenta una demanda de fuerza axial en un 1.59% mayor que en el modelo de base empotrada. Al acoplar las aceleraciones en (XYZ) los levantamientos de los aisladores (1-2) se redujeron en los modelos de suelo flexible comparados con el modelo de base empotrada, sin embargo, en los aisladores (3-4) para el modelo del suelo I estos levantamientos aumentaron en el orden de 7% y 2% comparados con el modelo de base empotrada. La demanda de fuerzas axiales en este caso presenta aumentos sustanciales especialmente en los aisladores (2-3) comparados con el análisis (XY), además en el

modelo del suelo II se obtuvieron incrementos en los aisladores (1) y (4) comparados con el modelo de base empotrada de 13.84% y 27.58% respectivamente, aunque en los demás casos se presenta una reducción de la demanda de fuerza axial a medida que el suelo se flexibiliza.

Tabla 6-3 Fuerzas axiales y deformaciones máximas en los aisladores para el registro de Newhall.

Modelos	Fuerza Axial Tonf				Deformación Axial cm			
	Aislador 1	Aislador 2	Aislador 3	Aislador 4	Aislador 1	Aislador 2	Aislador 3	Aislador 4
Registro Newhall - Integración Directa Dir. X								
Suelo I	256.8	288.7	280.9	315	1.272	1.224	0.2544	0.2035
Suelo II	263.7	304.1	294.7	343.2	1.167	1.11	0.3636	0.3151
Empotrado	284.2	346.6	296	408.7	1.806	1.875	0.8293	0.8626
Registro Newhall - Integración Directa Dir. XY								
Suelo I	241.4	238.5	295.5	264	1.087	0.7247	0.1327	0.01886
Suelo II	226	281.7	342	324.3	0.9569	0.8874	0.4308	0.2615
Empotrado	227.6	306.8	360.6	345	1.021	0.8951	0.5361	0.3969
Registro Newhall - Integración Directa Dir. XYZ								
Suelo I	360.5	387	340.7	338.9	1.232	0.9832	0.9327	0.869
Suelo II	330.2	373.6	405.3	409.3	1.612	1.509	1.144	0.9841
Empotrado	283.5	377.9	416.4	463.3	1.407	1.353	1.078	0.9505

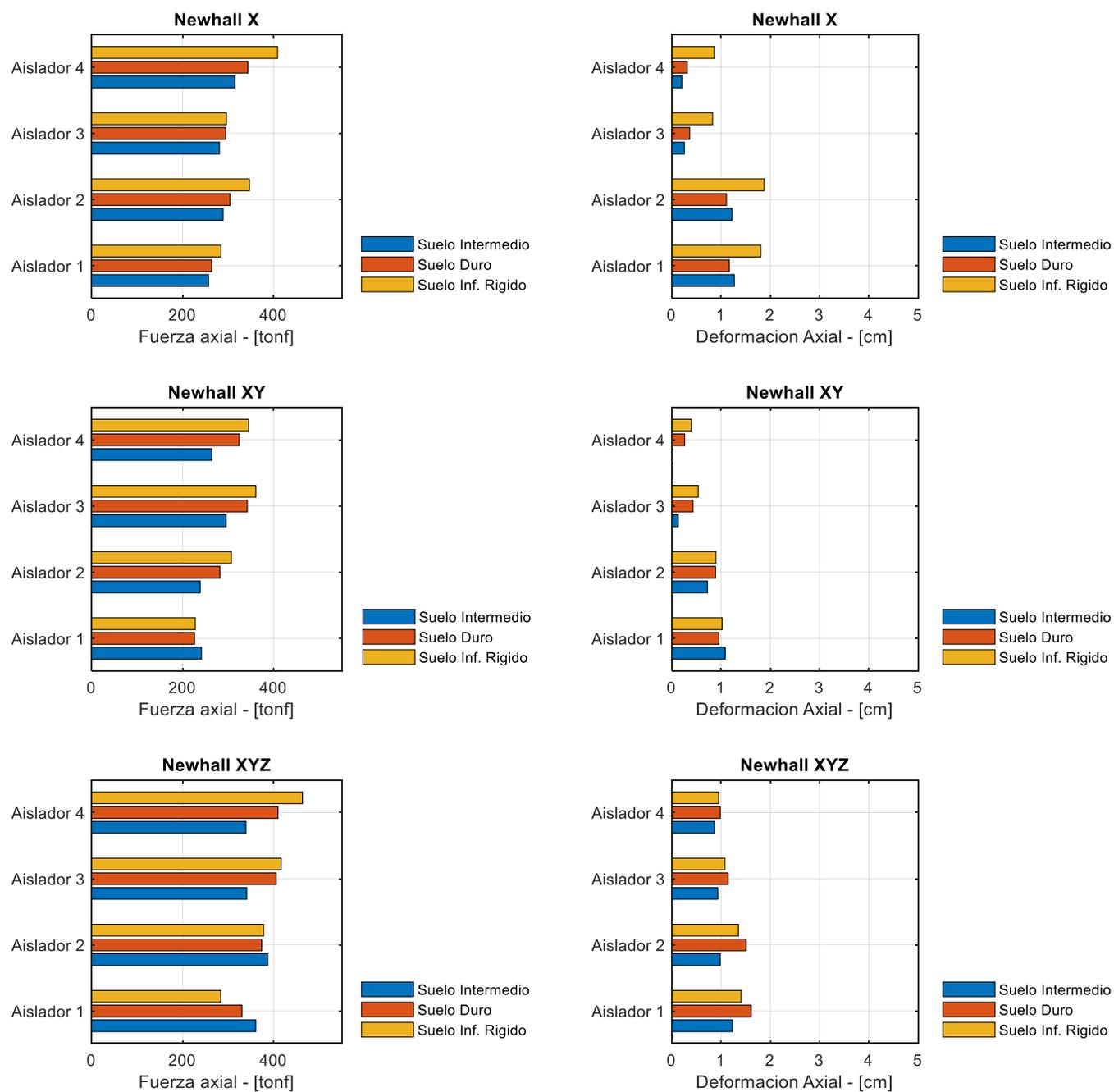


Figura 6-18 Representación gráfica de las fuerzas axiales máximas y levantamiento máximo del registro de Newhall.

Para el registro de Newhall en el análisis (X) se aprecian levantamientos importantes en los aisladores (1-2) de 1.806 cm y 1.875 cm respectivamente, se observa que a diferencia del registro de Sylmar no se cumple que cuando el suelo es más flexible los levantamientos se reducen para estos aisladores, pero para los aisladores (3-4) si se cumple. Observando las fuerzas en este mismo análisis se ve que estas si son reducidas a medida que el suelo se flexibiliza.

El levantamiento del análisis (XY) es menor en los aisladores (1-2) que en el análisis (X) y también fue menor en el caso de base empotrada para los aisladores (3-4), pero se observa que en el suelo II el levantamiento del aislador (3) es un poco mayor por una diferencia de un 19.6%. En la demanda de fuerza axial se presentan al igual que en el análisis (X) reducciones a medida que el suelo se hace más flexible.

En el análisis (XYZ) el levantamiento aumentó en todos los aisladores comparado con el análisis (XY), presentándose mayor demanda en el modelo del suelo II. Por otra parte, también se observa que la fuerza axial en los aisladores (1-2) para el modelo del suelo I es mayor que las del suelo II y el modelo de base empotrada empotrado.

Tabla 6-4 Fuerzas axiales y deformaciones máximas en los aisladores para el registro de Lucerne.

Modelos	Fuerza Axial Tonf				Deformación Axial cm			
	Aislador 1	Aislador 2	Aislador 3	Aislador 4	Aislador 1	Aislador 2	Aislador 3	Aislador 4
Registro Lucerne - Integración Directa Dir. X								
Suelo I	251.5	279.9	204.1	228.4	0.02453	0.02	1.702	1.636
Suelo II	247.9	282.7	206.6	236.8	0.02418	0.0202	1.745	1.681
Empotrado	240.70	322.50	248.30	312.90	0.4428	0.419	3.067	3.188
Registro Lucerne - Integración Directa Dir. XY								
Suelo I	269	266.1	191.8	205.3	0.02623	0.01901	1.129	1.149
Suelo II	270.6	279.4	217.1	245	0.04814	0.01997	1.673	1.656
Empotrado	259.20	280.10	229.00	285.40	0.1633	0.08266	1.838	1.832
Registro Lucerne - Integración Directa Dir. XYZ								
Suelo I	297.4	311.6	245.9	272.6	0.1085	0.07149	1.436	1.434
Suelo II	326.4	343.3	286.4	342.6	0.3795	0.2678	1.688	1.703
Empotrado	326.30	383.40	256.90	328.60	0.3331	0.2597	1.924	1.917

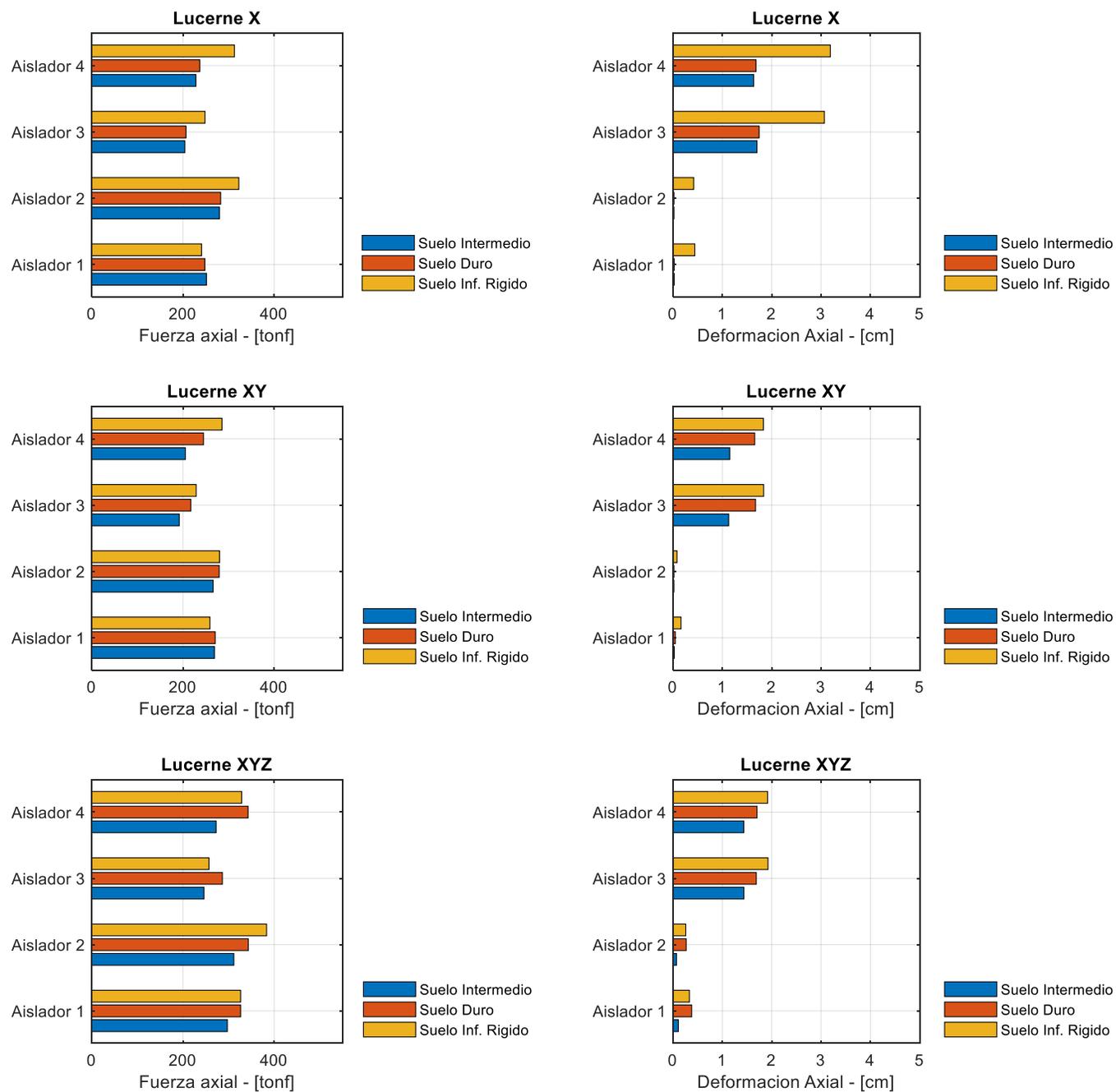


Figura 6-19 Representación gráfica de las fuerzas axiales máximas y levantamiento máximo del registro de Lucerne.

El registro de Lucerne en el análisis (X) presentó levantamientos máximos de hasta 3.18 cm en los aisladores (3-4) los cuales son comparables con los obtenidos en el registro de Sylmar, y levantamientos relativamente pequeños en los aisladores (1-2), estos se redujeron mientras más la base se flexibilizaba salvo el aislador (1) el cual es mayor que el del suelo II en un 1.44%. En el mismo análisis las fuerzas se redujeron en los modelos más con base flexibles salvo también el aislador (1) el cual presenta incrementos de un 3% para el suelo II y un 4.5% en el suelo I. En el análisis (XY) se observa que los levantamientos de los aisladores (3-4) para el modelo de base empotrada son menores en un 40% y un 42% respectivamente en comparación con el resultado obtenido en el análisis (X), sin embargo, los modelos de base flexible se presentan reducciones mientras más flexible es la base. En las fuerzas al igual que el pasado análisis se ven reducciones salvo en el aislador (1) que en el modelo del suelo II presenta un aumento de demanda de fuerza axial de un 4.40% en el suelo II y 3.78% en el suelo I. En el análisis (XYZ) llama a la atención que las deformaciones aumentaron significativamente en los aisladores (1-2) en el orden de 250% - 1469% con respecto al análisis (X). Las fuerzas axiales de los modelos de base flexible presentaron en el análisis (XYZ) aumentos respecto al modelo de base empotrada, tal es el caso de los aisladores (1-3-4) los cuales incrementaron un 0.03%, 11.48% y 4.26% respectivamente en el modelo de suelo II; y reducciones en el caso del suelo I del orden de 4% - 19%.

Tabla 6-5 Fuerzas axiales y deformaciones máximas en los aisladores para el registro de JMA.

Modelos	Fuerza Axial Tonf				Deformación Axial cm			
	Aislador 1	Aislador 2	Aislador 3	Aislador 4	Aislador 1	Aislador 2	Aislador 3	Aislador 4
Registro JMA - Integración Directa Dir. X								
Suelo I	233.4	262.6	229.7	258	0.08959	0.01876	0.1466	0.08094
Suelo II	231.2	269.1	237.6	269.8	0.2669	0.1996	0.117	0.05437
Empotrado	242.50	298.50	233.20	301.10	0.4944	0.4833	0.4587	0.4384
Registro JMA - Integración Directa Dir. XY								
Suelo I	255.8	239.1	264	247.4	0.4882	0.1006	0.02575	0.01767
Suelo II	273.8	262.5	283.6	268	0.4733	0.1881	0.02766	0.01915
Empotrado	282.40	278.00	275.80	270.90	0.3577	0.08895	0.1077	0.02018
Registro JMA - Integración Directa Dir. XYZ								
Suelo I	319	320.6	273.4	263.5	0.7047	0.4168	0.05631	0.03778
Suelo II	333	344.1	286.2	295.6	0.7387	0.4918	0.1241	0.09165
Empotrado	345.80	388.50	304.60	355.60	0.7006	0.4831	0.1851	0.2346

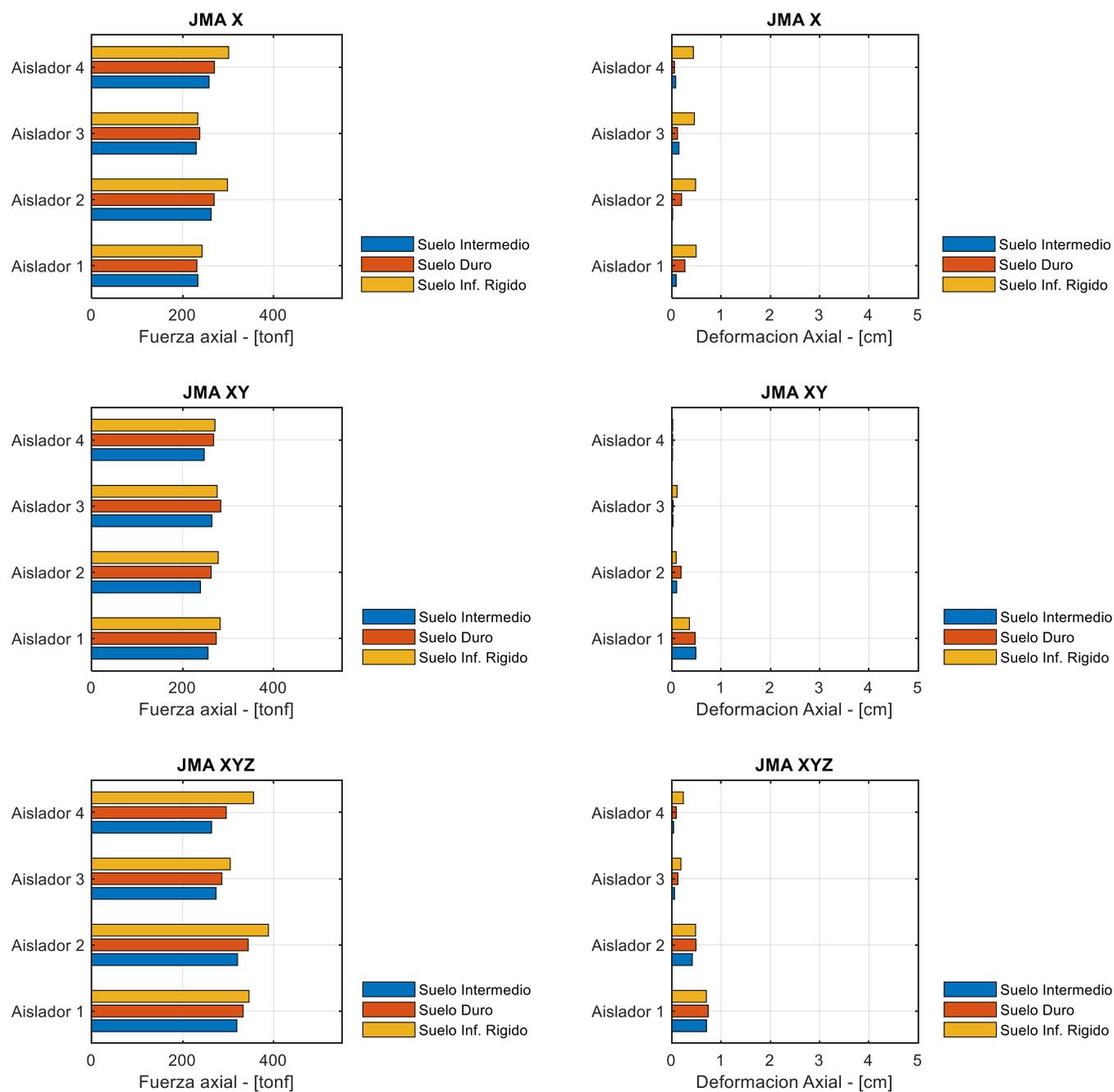


Figura 6-20 Representación gráfica de las fuerzas axiales máximas y levantamiento máximo del registro de JMA.

Para el registro de JMA se observa que en el análisis (X) los levantamientos fueron reducidos importantemente en el orden del 40-90% en comparación con el modelo con la base empotrada, las fuerzas axiales en este mismo análisis resultaron ser menores a medida que la base era más flexible al igual que en registro de Sylmar. En el análisis (XY) se observa que en los aisladores (1-2) el levantamiento fue mayor en los sistemas de base flexible que el de base empotrada y respecto a las fuerzas axiales máximas se observaron reducciones de un 1% - 14% salvo el aislador (3) el cual presentó un aumento de un 2.8%. Dentro del análisis (XYZ) se observan de igual forma que en los aisladores (1-2) las deformaciones son ligeramente mayores a la de base empotrada en el modelo del suelo II, pero en el modelo del suelo I son reducidas estas deformaciones en general salvo el aislador I que supera al modelo de base empotrada por un 0.59%, en las fuerzas axiales se muestra que a medida que el suelo se flexibilizaba las fuerzas axiales también se redujeron.

6.6 Comentarios respecto al análisis modal no lineal

Todos estos análisis también fueron realizados a través del análisis modal no lineal o conocido también como FNA que sus siglas en inglés significan Fast Nonlinear Analysis o Análisis no lineal rápido. Este análisis resuelve la ecuación del movimiento haciendo una reducción de orden a partir de las propiedades modales de la estructura lineal (Wilson, 1995). Sin embargo, al hacer uso de este método de análisis no se obtuvieron resultados comparables con los desarrollados por el de integración directa. Se presentarán los resultados obtenidos para el registro de Sylmar solo en la dirección (X):

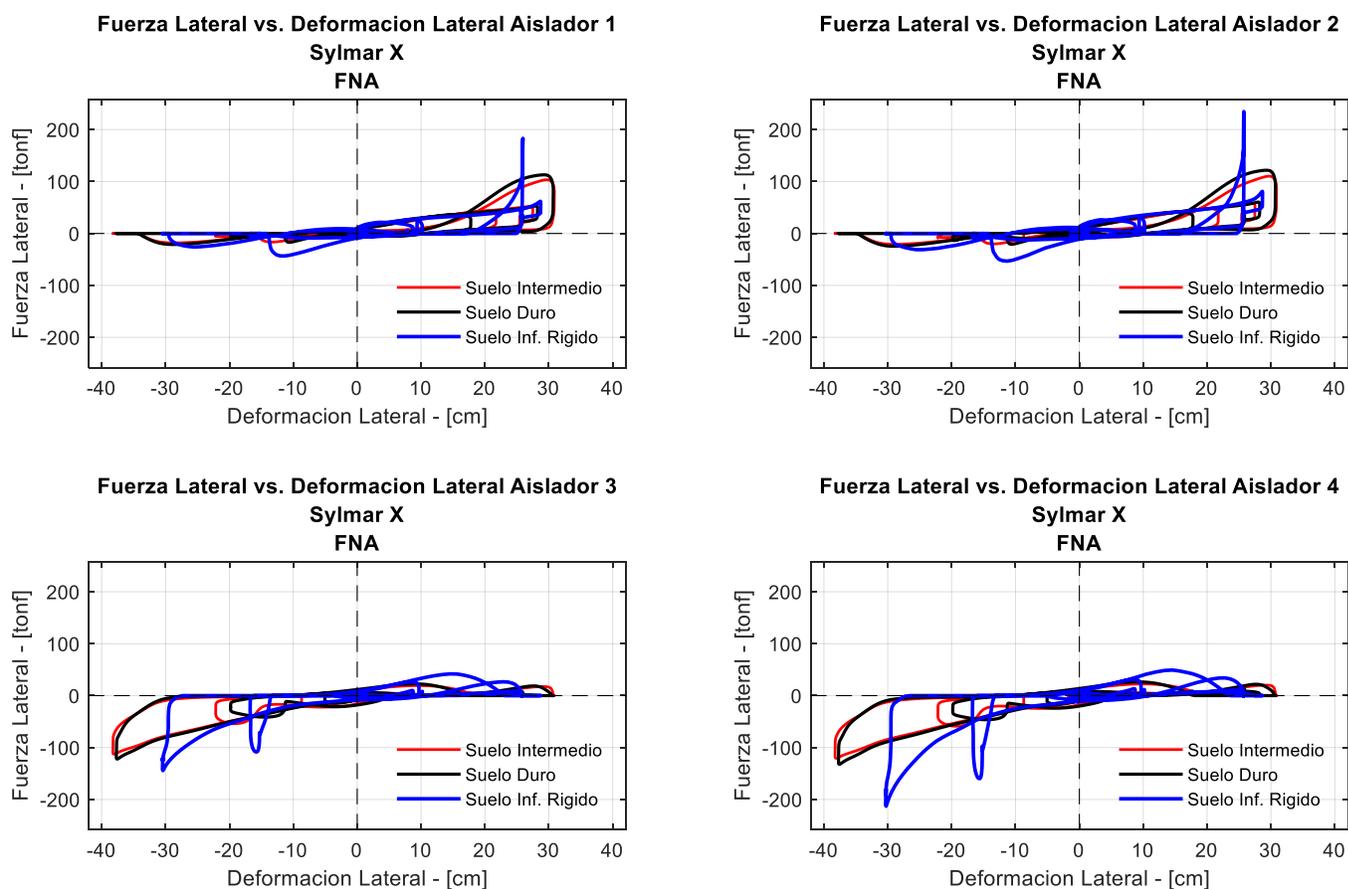


Figura 6-21 Diagrama de histéresis en dirección transversal para el registro de Sylmar Dir. (X) con análisis FNA.

Al comparar las respuestas de los aisladores del análisis FNA con el análisis de integración directa mostrado en la Figura 6-12, se observan algunas diferencias importantes. Una de estas es la demanda de desplazamiento es claramente menor donde para el modelo de suelo I la deformación máxima es de 38.26 cm, para el modelo de suelo II es de 37.71 cm y el de base empotrada es de 33.49 cm. Por otro lado, la respuesta parece mantener un amortiguamiento que no se presenta en la respuesta dada en los análisis de integración directa ya la variación de la fuerza de corte que varía en

función a la fricción y la fuerza axial en dicho instante está muy atenuada, aun estos teniendo la misma solución de amortiguamiento modal mostrado en la Figura 4-6.

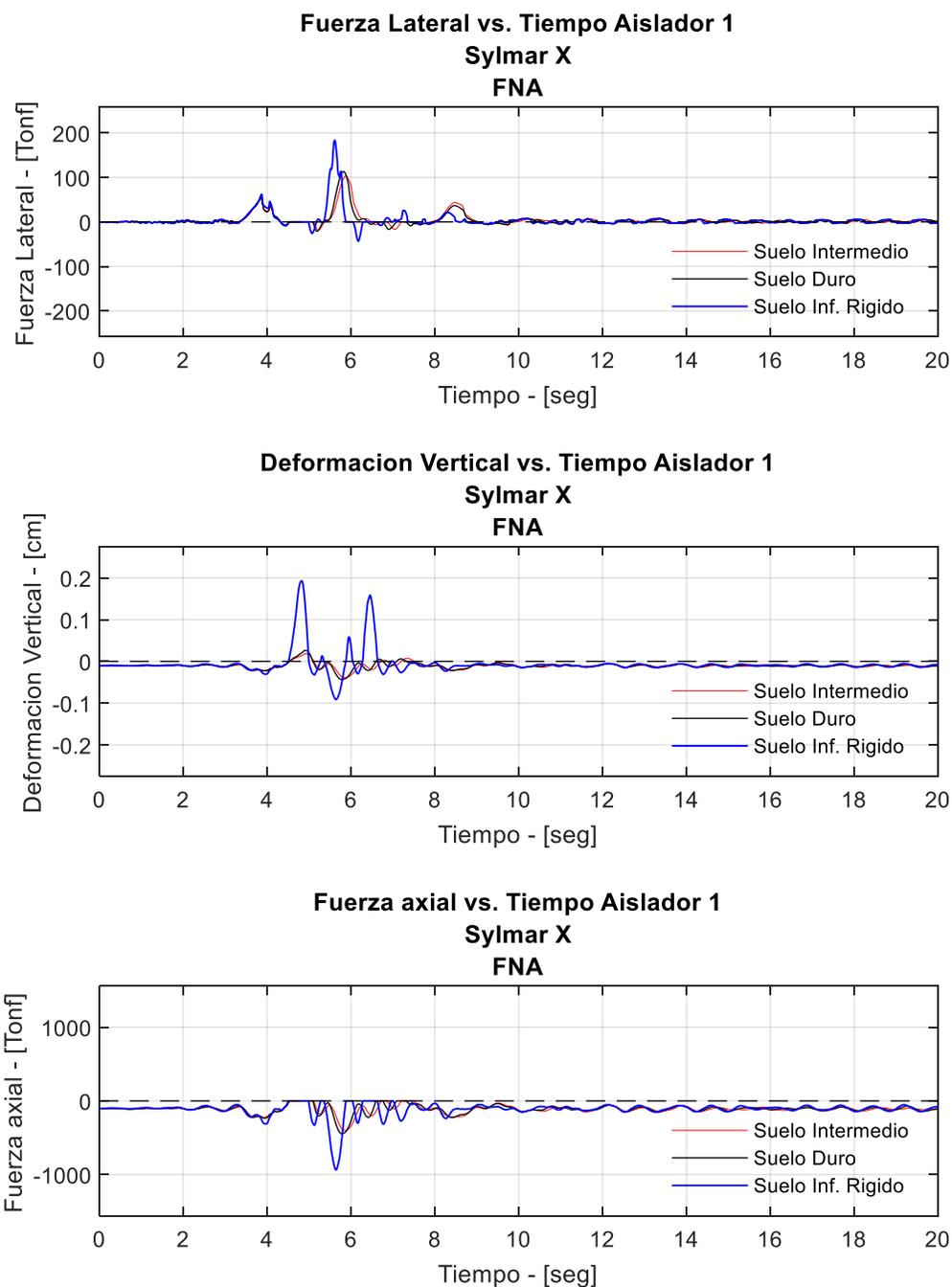


Figura 6-22 Respuesta en el tiempo lateral y axial para el registro de Sylmar (X), Aislador 1 con análisis FNA.

En la demanda de fuerzas axiales se muestra que entre los segundos 4 y 6 donde se presencia el levantamiento del eje (A), como se había observado en el análisis de integración directa, aparecen fuerzas desproporcionadas de 937 tonf en el modelo de base empotrada y fuerzas entre los 420 – 450 tonf en los demás modelos de base flexible, lo que no hace mucho sentido porque se debería de esperarse el doble de la fuerza axial gravitacional inicial, como se mostró en el análisis de integración directa. También los niveles de levantamiento son muy pequeños en comparación a los de 2 cm – 4 cm obtenidos en la pasada metodología de análisis.

Este tipo de resultados fueron similares para todos los modelos y para todos los registros mencionados, de manera que no se tomaron en cuenta los resultados del FNA ya que para sistemas como este presentó un nivel de error muy significativo.

7. CONCLUSIONES

Según los análisis realizados y los resultados obtenidos y descritos en los capítulos anteriores, se pueden concluir los siguientes puntos a partir de los objetivos planteados al principio de este documento.

De manera global se concluye que en el apartado de drift de entrepiso:

Los modelos de interacción suelo estructura pueden afectar de manera significativa los efectos del fenómeno de levantamiento en los drifts de entrepiso de una estructura aislada con FPS, ya que se verificó que para el caso de estudio la demanda de drift en los registros eran menores en los modelos de interacción suelo estructura que en el de suelo infinitamente rígido cuando se hacía solo un análisis en la dirección X. Sin embargo, se destacó la importancia de utilizar los registros acoplados en las direcciones XYZ ya que los drifts resultaron relativamente similares para todos los modelos según su respectivo registro. También se mostró que cuando los levantamientos son importantes en el orden de los 2 – 4 cm en la mayoría de los aisladores se tienden a producir drift de entrepiso muy grandes como lo fue en el caso del registro de Sylmar, Newhall y Lucerne, lo cual quita todo el propósito de aislar la estructura ya que, precisamente las estructuras se aíslan para reducir los drift de entrepiso.

En las aceleraciones de techo se observó que para estos sistemas fue muy importante acoplar el efecto del registro en la dirección Z ya que esto incremento la demanda de aceleraciones laterales sustancialmente. Además, se observó que la estructura permanecía con bajas aceleraciones de techo hasta que la estructura experimentaba levantamiento e impactaba en la base donde se generaban aceleraciones laterales

importantes a la hora de preocuparse por los elementos no estructurales. Por otro lado, en este campo se vio que las respuestas de aceleración máximas podrían tener una repercusión importante ya que como se vio con el modelo del Suelo I y Suelo II para los registros de Sylmar y Newhall en los análisis XYZ presentaron aceleraciones máximas mayores que las del modelo del suelo infinitamente rígido.

En el corte basal máximo se resaltó que los modelos de interacción suelo estructura generaron relativamente cortes máximos similares para los análisis (X y XY), sin embargo, en los análisis (XYZ) se mostró que el modelo de suelo infinitamente rígido desarrollo mayor corte basal y este se disminuyó a medida que el suelo era más flexible, con excepción del registro de Newhall en el que se presentaron cortes basales mayores en los modelos de base flexible que en el modelo de suelo infinitamente rígido. En adición a esto, se concluye que al igual que con las aceleraciones de techo, el corte basal está relacionado a las aceleraciones verticales ya que se observó un aumento sustancial de estos cortes máximos al acoplar (XYZ) en todos los registros.

En las respuestas locales se puede concluir que:

Se comprobó que en términos de demanda de desplazamiento lateral y de fuerza de corte el fenómeno de levantamiento es un factor muy importante para ser tomado en cuenta, ya que como fue descrito las fuerzas de corte dependen intrínsecamente de la fuerza axial de compresión que el aislador este soportando. Al este aislador levantarse, se descarga y no genera fuerzas laterales, lo que también afecta a la disipación de energía del sistema de aislamiento. La interacción suelo estructura no presenta un efecto decisivo en la demanda de desplazamiento y fuerza lateral, sin embargo, ayuda

a reducir las oscilaciones de alta frecuencia producidas por el impacto luego de un levantamiento.

En los niveles de levantamiento se observó que el acoplar las direcciones XY de los registros redujo el levantamiento para los modelos de suelo infinitamente rígido, y en los modelos de interacción suelo estructura estos niveles levantamiento se aumentaron a los algunos aisladores, como fue por ejemplo en el registro de Sylmar, sin embargo, se redujeron en los registros de Newhall, Lucerne y JMA.

También se destacó que la demanda de levantamiento afecta a la demanda de fuerzas axiales de manera importante y que la consideración de la interacción suelo estructura podría ser un factor decisivo a momento de realizar un diseño de aisladores de este tipo ya que se mostró que la demanda de fuerza axial se reducía con la flexibilidad del suelo, salvo en algunos casos donde se aumentaba de manera importante con respecto al del suelo de base empotrada como lo es el caso del registro de Sylmar el aislador (2) en el modelo del suelo duro.

En fin, se concluye que el fenómeno del levantamiento cuando alcanza niveles importantes de 2-4 cm puede llevar a la estructura a situaciones que son perjudiciales y se recomienda que cuando esto suceda se proponga otro tipo de sistema de aislamiento sísmico.

8. BIBLIOGRAFIA

- Aguiar, R., Almazan, J. L., Dechent, P., Suarez, V., Espe, C., & Fillup. (2008). *Aisladores de base elastomericos y FPS*. Quito: Centro de Investigaciones Cientifica (Ceinci), Escuela Politecnica del Ejercito.
- Almazan, J. L. (2019, Noviembre 25). Tarea No.5: Dinamica de Estructuras 2019. Santiago, Region Metropolitana, Chile: Pontificia Universidad Catolica de Chile.
- Briseghella, B., Zordan, T., Liu, T., Mazzarolo, E.. (2013). Friction Pendulum System as a Retrofit Technique for Existing Reinforced Concrete Building. *Structural Engineering International*, 219-224.
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering 4th edition*. Berkeley: Prentice Hall International.
- Computers and Structures Inc. (1999). *Link - SUNY Buffalo seven-story building with friction pendulum Isolators - Verification Notes*. Berkeley: Computers and Structures Inc.
- Computers and Structures Inc. (1999). *CSI analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge*. Berkely, California.
- Computers and Structures Inc. (1999). *SAP2000: Integrated finite element analysis and design of structures*. Berkeley, California.
- IGP. (2019, Octubre). *Instituto Geofísico del Perú*. Retrieved from <http://www.igp.gob.pe>.
- Kelly, J., & Naeim, F. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures*. Berkeley: John Wiley & Sons, Inc.
- Nagarajaiah, S., Reinhorn, M., Constantinou, M. C. (1991). *3-D Basis: Nonlinear Dynamic Analysis of Three-Dimensional Base Isolated Structures: Part II, Technical Report NCEER-91-0005*. Buffalo: National Center for Earthquake Engineering Research.
- Panayiotis C., R. (2009). Study on the Effect of Uplift-Restraint on the Seismic Response of Base-Isolated Structures. *Journal of Structural Engineering*, 1462-1471.
- Wilson, E. (1995). *Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures*. Berkeley: Computers and Structures Inc.