



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

ACELERACIONES DE PISO EN ESTRUCTURAS CON SISTEMAS DE AISLAMIENTO DE BASE SUJETAS A TERREMOTOS

LUCIO FERNANDO SÁNCHEZ SARMIENTO

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería.

Profesor Supervisor:
DIEGO LÓPEZ-GARCÍA

Santiago de Chile, mayo 2010
© 2010, Lucio Fernando Sánchez Sarmiento



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

ACELERACIONES DE PISO EN ESTRUCTURAS CON SISTEMAS DE AISLAMIENTO DE BASE SUJETAS A TERREMOTOS

LUCIO FERNANDO SÁNCHEZ SARMIENTO

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

DIEGO LÓPEZ-GARCÍA

JOSÉ LUIS ALMAZÁN

MARCIAL BAEZA

LUCIANO CHIANG

Para completar las exigencias del grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería.

Santiago de Chile, mayo 2010

DEDICATORIA

A mi esposa

A mis padres y hermanos

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo del Gobierno de Chile a través de la Beca de Estudios de Magíster en Chile para Latinoamericanos otorgada por CONICYT.

Especial agradecimiento al profesor Diego López-García por la dirección de este trabajo. Poder contar con su tiempo ha sido un privilegio, sobre todo por su buena disposición en todo momento. Al profesor José Luis Almazán por el apoyo en los temas de modelación requeridos en mi trabajo.

A los profesores del Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica por los conocimientos transmitidos.

A todos mis compañeros de postgrado, muchos de ellos se han convertido más que en compañeros, en amigos. El estímulo mutuo ha servido para darnos ánimo y motivarnos para culminar satisfactoriamente nuestras investigaciones.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Criterios de Algunas Normas para el Diseño Sísmico de Elementos No Estructurales.....	6
1.3 Investigaciones Acerca de la Caracterización de la Respuesta de Aceleración de Piso en Estructuras con Sistemas de Aislación Sísmica de Base.....	11
1.4 Objetivos y Alcance	12
2. DESCRIPCIÓN Y MODELAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS CONSIDERADAS.....	14
2.1 Superestructura.....	16
2.2 Sistemas de Aislación Sísmica de Base	16
2.2.1 Modelación de los Sistemas de Aislación Lineal.....	19
2.2.2 Modelación de los Sistemas de Aislación No Lineal	25
3. DESCRIPCIÓN DE LAS EXCITACIONES SÍSMICAS	35
3.1 Excitaciones de Fuente Lejana.....	35
3.2 Excitaciones de Fuente Cercana.....	39

4. RESPUESTA DE ACELERACIÓN ABSOLUTA DE EDIFICIOS CON AISLACIÓN SÍSMICA DE BASE	45
4.1 Descripción del Procedimiento de Análisis	45
4.2 Descripción de Resultados	46
4.2.1 Aceleraciones de Piso en Estructuras con Sistemas Lineales de Aislación ...	51
4.2.1.1 Respuesta a la Excitación de Fuente Lejana	51
4.2.1.2 Respuesta a las Excitaciones de Fuente Cercana	55
4.2.2 Aceleraciones de Piso en Estructuras con Sistemas No Lineales de Aislación	65
4.2.2.1 Respuesta a la Excitación de Fuente Lejana	65
4.2.2.2 Respuesta a las Excitaciones de Fuente Cercana	71
4.2.3 Comparación entre las Respuestas de los Sistemas Lineales y No Lineales.	80
4.2.3.1 Aceleración Máxima de Piso	80
4.2.3.2 Espectro de Piso	80
5. EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO PARA ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES INDICADOS EN LAS NORMAS CHILENAS.....	100
5.1 Sistemas Lineales	100
5.1.1 Respuesta a la Excitación de Fuente Lejana	100
5.1.2 Respuesta a las Excitaciones de Fuente Cercana	106
5.2 Sistemas No Lineales	118
5.2.1 Respuesta a la Excitación de Fuente Lejana	118
5.2.2 Respuesta a las Excitaciones de Fuente Cercana	124
5.3 Discusión de resultados.....	134

6. ESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA DE ACELERACIÓN ABSOLUTA MEDIANTE PROCEDIMIENTOS APROXIMADOS.....	135
6.1 Estimación de la Aceleración Máxima de Piso (<i>PFA</i>).....	135
6.1.1 Sistemas Lineales.....	135
6.1.1.1 Estimación de la Aceleración Absoluta Máxima en el Nivel Base.....	136
6.1.1.2 Estimación de la Aceleración Absoluta Máxima en los pisos superiores	146
6.1.2 Sistemas No Lineales	147
6.1.2.1 Estimación de la Aceleración Absoluta Máxima en el Nivel Base.....	147
6.1.2.2 Estimación de la Aceleración Absoluta Máxima en los pisos superiores	150
6.2 Espectro de Piso	152
6.2.1 Sistemas Lineales.....	155
6.2.1.1 Respuesta a la Excitación de Fuente Lejana	155
6.2.1.2 Respuesta a las Excitaciones de Fuente Cercana	160
6.2.2 Sistemas No Lineales	168
6.2.2.1 Respuesta a la Excitación de Fuente Lejana	168
6.2.2.2 Respuesta a las Excitaciones de Fuente Cercana	172
7. SUMARIO Y CONCLUSIONES	181
REFERENCIAS	183

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Ejemplo de cuantificación de objetivos de desempeño para elementos no estructurales para un sitio de alta sismicidad. (Bertero & Bertero, 2002)	3
Tabla 2-1 Cargas aplicadas a las estructuras consideradas	14
Tabla 2-2 Períodos de las estructuras aisladas diseñadas para excitaciones de fuente Lejana.....	29
Tabla 2-3 Períodos de las estructuras aisladas diseñadas para excitaciones de fuente Cercana.....	29
Tabla 4-1 Desplazamientos del nivel base (excitación de fuente Lejana).	46
Tabla 4-2 Desplazamientos del nivel base (excitación de fuente Cercana I).....	47
Tabla 4-3 Desplazamientos del nivel base (excitación de fuente Cercana II).	47
Tabla 4-4 Desplazamientos de diseño obtenidos con el factor B_D empírico (excitación de fuente Lejana).....	50
Tabla 4-5 Desplazamientos de diseño obtenidos con el factor B_D empírico (excitación de fuente Cercana I).....	50
Tabla 4-6 Desplazamientos de diseño obtenidos con el factor B_D empírico (excitación de fuente Cercana II).....	50
Tabla 6-1 Sistemas lineales: Valores de la relación PFA/PGA en el nivel base.....	137
Tabla 6-2 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: Valores de la relación PFA/PGA en el nivel base.....	145
Tabla 6-3 Sistemas lineales sujetos a las excitaciones de fuente Cercana: Valores de la relación PFA/PGA en el nivel base.....	145
Tabla 6-4 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: Valores de la relación PFA/PGA en el nivel base.....	149
Tabla 6-5 Sistemas lineales sujetos a las excitaciones de fuente Cercana: Valores de la relación PFA/PGA en el nivel base.....	149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Factor de amplificación dinámica K_p para el diseño de elementos no estructurales indicado en la norma NCh433.	9
Figura 2-1 Grados de libertad de las estructuras consideradas.	15
Figura 2-2 Secciones de los marcos de análisis. a) marcos de 2 pisos; b) marco de 5 pisos; y c) marco de 8 pisos.	17
Figura 2-3 Sistema estructural aislado de 2 GDL.	20
Figura 2-4 Diagramas de cuerpo libre del sistema estructural indicado en la Figura 2-3.	20
Figura 2-5 Sistema estructural aislado de n GDL.	23
Figura 2-6 Diagramas de cuerpo libre de sistema estructural indicado en la Figura 2-5.	25
Figura 2-7 Vista esquemática de un FPS y diagrama de equilibrio.	27
Figura 2-8 Parámetros del diseño de los sistemas de aislación de base de las estructuras consideradas. Excitación de fuente Lejana.	30
Figura 2-9 Parámetros del diseño de los sistemas de aislación de base de las estructuras consideradas. a) Excitación de fuente Cercana I; b) Excitación de fuente Cercana II.	31
Figura 2-10 Estructuras diseñadas para las excitaciones de fuente Lejana: Formas modales. a) marco de 2 pisos; b) marco de 5 pisos; y c) marco de 8 pisos.	32
Figura 2-11 Estructuras diseñadas para las excitaciones de fuente Cercana I: Formas modales. a) marco de 2 pisos; b) marco de 5 pisos; y c) marco de 8 pisos.	33
Figura 2-12 Estructuras diseñadas para las excitaciones de fuente Cercana II: Formas modales. a) marco de 2 pisos; b) marco de 5 pisos; y c) marco de 8 pisos.	34
Figura 3-1 Función de modulación del tiempo $f_e(t)$ usada en este trabajo.	36
Figura 3-2 Función de densidad de potencia espectral del modelo de Kanai-Tajimi modificado usada en este trabajo.	37

Figura 3-3 Registro sintético número 250; a) registro de aceleración; y b) registro de velocidad.	38
Figura 3-4 Contenido de frecuencias promedio de las excitaciones de fuente Lejana. ...	39
Figura 3-5 Registro sintético de fuente Cercana I número 480; a) registro de aceleración; y b) registro de velocidad.....	41
Figura 3-6 Registro sintético de fuente Cercana II número 862; a) registro de aceleración; y b) registro de velocidad.....	42
Figura 3-7 Contenido de frecuencias promedio: a) excitaciones de fuente Cercana I; y b) excitaciones de fuente Cercana II.	43
Figura 3-8 Espectros de respuesta promedio de las excitaciones de fuente Lejana y Cercana. Amortiguamiento = 0.05.....	44
Figura 4-1 Valores del factor B_D : I) valores empíricos: II) valores promedio; a) Excitación de fuente Lejana; b) Excitación de fuente Cercana I; y c) Excitación de fuente Cercana II.....	49
Figura 4-2 Respuesta de la estructura de 2 pisos (sistema de aislación lineal) al registro sintético de fuente Lejana nro. 450: a) historia fuerza-deformación del sistema de aislación; b) espectro de piso del nivel base; y c) historia del desplazamiento del nivel base.....	51
Figura 4-3 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: ejemplos de espectros de piso (amortiguamiento=0.05).	52
Figura 4-4 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana (amortiguamiento=0.05).....	53
Figura 4-5 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: valores de la relación PFA/PGA	54
Figura 4-6 Respuesta de la estructura de 2 pisos (sistema de aislación lineal) al registro sintético de fuente Cercana I nro. 580: a) historia fuerza-deformación del sistema de aislación; b) espectro de piso del nivel base; y c) historia del desplazamiento del nivel base.....	55

Figura 4-7 Respuesta de la estructura de 2 pisos (sistema de aislación lineal) al registro sintético de fuente Cercana II nro. 872: a) historia fuerza–deformación del sistema de aislación; b) espectro de piso del nivel base; y c) historia del desplazamiento del nivel base.....	56
Figura 4-8 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I: ejemplos de espectros de piso (amortiguamiento=0.05).	58
Figura 4-9 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II: ejemplos de espectros de piso (amortiguamiento=0.05).	59
Figura 4-10 Ejemplos de valores de la desviación estándar de ordenadas espectrales de piso.	60
Figura 4-11 Ejemplos de funciones de densidad de probabilidad de ordenadas espectrales de piso (marco de 2 pisos, 2do. Piso); a) registros fuente Lejana; b) registros fuente Cercana I; y c) registros fuente Cercana II.....	61
Figura 4-12 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I (amortiguamiento=0.05).	62
Figura 4-13 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II (amortiguamiento=0.05).....	63
Figura 4-14 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana: valores de la relación PFA/PGA : a) excitaciones de fuente Cercana I; y b) excitaciones de fuente Cercana II.	64
Figura 4-15 Respuesta de la estructura de 2 pisos (sistema de aislación no lineal) al registro sintético de fuente Lejana nro. 935: a) historia fuerza–deformación del sistema de aislación; b) espectro de piso del nivel base; y c) historia del desplazamiento del nivel base.....	66
Figura 4-16 Respuesta de la estructura de 8 pisos (sistema de aislación no lineal) al registro sintético de fuente Lejana nro. 721: a) historia fuerza–deformación del sistema de aislación; b) espectro de piso del nivel base; y c) historia del desplazamiento del nivel base.....	67

Figura 4-17 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: ejemplos de espectros de piso (amortiguamiento=0.05).	69
Figura 4-18 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana (amortiguamiento=0.05).....	70
Figura 4-19 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: valores de la relación PFA/PGA	71
Figura 4-20 Respuesta de la estructura de 2 pisos (sistema de aislación no lineal) al registro sintético de fuente Cercana I nro. 935: a) historia fuerza-deformación del sistema de aislación; b) espectro de piso del nivel base; y c) historia del desplazamiento del nivel base.....	72
Figura 4-21 Respuesta de la estructura de 8 pisos (sistema de aislación no lineal) al registro sintético de fuente Cercana I nro. 721: a) historia fuerza-deformación del sistema de aislación; b) espectro de piso del nivel base; y c) historia del desplazamiento del nivel base.....	73
Figura 4-22 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I: ejemplos de espectros de piso (amortiguamiento=0.05).	75
Figura 4-23 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II: ejemplos de espectros de piso (amortiguamiento=0.05).	76
Figura 4-24 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I (amortiguamiento=0.05).	77
Figura 4-25 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II (amortiguamiento=0.05).....	78
Figura 4-26 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana: valores de la relación PFA/PGA : a) excitaciones de fuente Cercana I; y b) excitaciones de fuente Cercana II.	79
Figura 4-27 Sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: valores de la relación PFA/PGA	82
Figura 4-28 Sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I: valores de la relación PFA/PGA	83

Figura 4-29 Sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II: valores de la relación PFA/PGA	84
Figura 4-30 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana (amortiguamiento=0.05). Marco de 2 pisos.	85
Figura 4-31 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana (amortiguamiento=0.05). Marco de 5 pisos.	86
Figura 4-32 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana (amortiguamiento=0.05). Marco de 8 pisos.	87
Figura 4-33 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I (amortiguamiento=0.05). Marco de 2 pisos.	89
Figura 4-34 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I (amortiguamiento=0.05). Marco de 5 pisos.	90
Figura 4-35 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I (amortiguamiento=0.05). Marco de 8 pisos.	91
Figura 4-36 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II (amortiguamiento=0.05). Marco de 2 pisos.	93
Figura 4-37 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II (amortiguamiento=0.05). Marco de 5 pisos.	94
Figura 4-38 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II (amortiguamiento=0.05). Marco de 8 pisos.	95
Figura 4-39 Relación entre espectros de piso de sistemas no lineales y lineales (amortiguamiento=0.05). Excitaciones de fuente Lejana.	97
Figura 4-40 Relación entre espectros de piso de sistemas no lineales y lineales (amortiguamiento=0.05). Excitaciones de fuente Cercana I.	98
Figura 4-41 Relación entre espectros de piso de sistemas no lineales y lineales (amortiguamiento=0.05). Excitaciones de fuente Cercana II.	99
Figura 5-1 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: valores de la relación PFA/PGA : I) evaluación de la norma NCh2745; y II) evaluación del número de modos a considerar en el procedimiento AME de la norma NCh2745.	102

Figura 5-2 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.05).	103
Figura 5-3 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.05).	104
Figura 5-4 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.05).	105
Figura 5-5 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I: valores de la relación PFA/PGA : I) evaluación de la norma NCh2745; y II) evaluación del número de modos a considerar en el procedimiento AME de la norma NCh2745.....	108
Figura 5-6 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II: valores de la relación PFA/PGA : I) evaluación de la norma NCh2745; y II) evaluación del número de modos a considerar en el procedimiento AME de la norma NCh2745.....	109
Figura 5-7 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.05).	110
Figura 5-8 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.05).	111
Figura 5-9 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.05).	112
Figura 5-10 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.05).	114
Figura 5-11 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.05).	115
Figura 5-12 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.05).	116
Figura 5-13 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: valores de la relación PFA/PGA : evaluación de la norma NCh2745.....	119
Figura 5-14 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.05).	120

Figura 5-15 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.05).	121
Figura 5-16 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.05).	122
Figura 5-17 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I: valores de la relación PFA/PGA : evaluación de la norma NCh2745.	124
Figura 5-18 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II: valores de la relación PFA/PGA : evaluación de la norma NCh2745.	125
Figura 5-19 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.05).	126
Figura 5-20 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.05).	127
Figura 5-21 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.05).	128
Figura 5-22 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.05).	130
Figura 5-23 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.05).	131
Figura 5-24 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.05).	132
Figura 6-1 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: valores de la relación PFA/PGA	138
Figura 6-2 Sistemas lineales sujetos a las excitaciones de fuente Cercana: valores de la relación PFA/PGA ; a) fuente Cercana I; y b) fuente Cercana II.	138
Figura 6-3 Espectros de respuesta de pseudo-aceleración y aceleración máxima para varios valores del factor de amortiguamiento. Excitación de fuente Lejana nro. 725. ...	139
Figura 6-4 Factores que relacionan los valores de S_a con los valores de $a_{m\acute{a}x}$ en función del factor de amortiguamiento.	141

Figura 6-5 Valores del factor B_A : I) valores empíricos: II) valores promedio a) Excitación de fuente Lejana; b) Excitación de fuente Cercana I; y c) Excitación de fuente Cercana II.	143
Figura 6-6 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: amplificación empírica del valor del PFA del nivel base y propuesta.	146
Figura 6-7 Sistemas lineales sujetos a las excitaciones de fuente Cercana: amplificación empírica del valor del PFA del nivel base y propuesta. a) fuente Cercana I; y b) fuente Cercana II.	147
Figura 6-8 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: amplificación empírica del valor del PFA del nivel base y propuesta.	151
Figura 6-9 Sistemas no lineales sujetos a las excitaciones de fuente Cercana: amplificación empírica del valor del PFA del nivel base y propuesta. a) fuente Cercana I; y b) fuente Cercana II.	151
Figura 6-10 Factor de magnificación de la aceleración máxima de piso indicado en el procedimiento AFM-88.	153
Figura 6-11 Ejemplo de espectro de piso usando el procedimiento indicado en AFM-88.	154
Figura 6-12 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.02).	156
Figura 6-13 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.02).	157
Figura 6-14 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.02).	158
Figura 6-15 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.02).	160
Figura 6-16 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.02).	161
Figura 6-17 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.02).	162

Figura 6-18 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.02).	164
Figura 6-19 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.02).	165
Figura 6-20 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.02).	166
Figura 6-21 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.02).	168
Figura 6-22 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.02).	169
Figura 6-23 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.02).	170
Figura 6-24 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.02).....	172
Figura 6-25 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.02).....	173
Figura 6-26 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.02).....	174
Figura 6-27 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.02).	176
Figura 6-28 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.02).	177
Figura 6-29 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.02).	178

RESUMEN

El objetivo de este trabajo consiste en investigar las características de las aceleraciones de piso (aceleraciones máximas de piso y espectros de piso) en edificios equipados con aislación sísmica de base sometidos a la acción de terremotos. Las aceleraciones máximas de piso son necesarias para el análisis de la demanda sísmica en elementos no-estructurales “rígidos” y los espectros de piso son necesarios para el análisis de la demanda sísmica en elementos no-estructurales “flexibles”. Se consideran 3 modelos 2D de edificios de distintos números de pisos configurados en base a marcos de hormigón, y en cada uno de ellos se consideró: (a) un sistema de aislación sísmica compuesto por aisladores tipo péndulo de fricción (FPS); y (b) un sistema “ideal” de aislación sísmica. Las excitaciones sísmicas fueron modeladas como procesos aleatorios no-estacionarios, y se consideraron excitaciones sísmicas tanto de fuente lejana como impulsivas. Se encontró que en todos los casos el procedimiento aproximado para estimar aceleraciones máximas de piso indicados en la norma chilena proporciona resultados que son siempre menores que aquéllos obtenidos mediante análisis dinámico tiempo-historia, independientemente de si las fuerzas sísmicas efectivas son obtenidas mediante análisis estático o mediante análisis modal espectral. También se encontró que las características de los espectros de piso dependen en gran medida del tipo de sistema de aislación de base: la demanda sísmica en elementos no-estructurales relativamente flexibles es mucho menor en estructuras equipadas con aisladores histeréticos que en estructuras equipadas con aisladores “lineales”, y lo contrario ocurre con la demanda sísmica en elementos no-estructurales menos flexibles. Finalmente, se realiza una propuesta para estimar de mejor manera las aceleraciones máximas de piso, la cual se basa en la incorporación de un nuevo factor que toma en cuenta la relación entre los valores de la pseudo-aceleración y aceleración máxima para el caso en que el factor de amortiguamiento tiene valores relativamente altos. La estimación de tales aceleraciones proporciona en general valores conservativos de aceleración, los cuales son razonables para fines de diseño.

ABSTRACT

The aim of this work is to investigate the characteristics of floor accelerations (in terms of both peak floor accelerations and floor spectra) in multistory buildings equipped with seismic base isolation systems and subjected to earthquake actions. Peak floor accelerations are necessary for the seismic analysis of rigid nonstructural elements, and floor spectra are necessary for the seismic analysis of flexible nonstructural elements.

Three 2D models of concrete frame buildings having different number of stories are considered. In each model, two different base isolation systems are considered: (a) a friction pendulum system (FPS); (b) an “ideal” linear system. Seismic excitations were modeled as nonstationary stochastic processes, and both far-field and near-source excitations were considered. The response of the structural models to each seismic excitation was obtained by performing Monte Carlo simulation.

It was found that the approximate procedure to estimate peak floor accelerations indicated in the current Chilean code gives results that are always less than those obtained by time history analysis, regardless of whether the effective seismic forces are obtained by static analysis or by modal spectral analysis. It also was found that floor spectral characteristics depend on the type of isolation system: seismic demands on relatively flexible nonstructural elements are much less in structures equipped with hysteretic isolators than in those equipped with “linear” isolators, and the opposite occurs with seismic demands in less flexible nonstructural elements.

Finally, an approach to more reasonably estimate peak floor accelerations in base-isolated buildings is presented, for which an analytical expression was deduced to quantify the relationship between the pseudo-acceleration response and the absolute acceleration response in cases where the level of damping is relatively high. The proposed approach provides values of peak floor accelerations that are generally conservative, and more reasonable for design purposes than those provided by the current Chilean code.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El principal objetivo de los sistemas estructurales con aislación sísmica es minimizar el daño en la superestructura y sus contenidos durante un sismo. El fundamento de la aislación sísmica es reducir la frecuencia natural de vibración de un edificio a un valor menor que el contenido de frecuencias de mayor energía del movimiento sísmico, produciendo así un desacople entre el movimiento de la superestructura y el movimiento del suelo. Esta reducción en la frecuencia del sistema supone una baja rigidez lateral del sistema de aislación, la cual podría provocar importantes desplazamientos laterales en la superestructura. Por tanto, el sistema de aislación debe tener algún sistema de disipación de energía para controlar tales desplazamientos. Si el mecanismo de disipación de energía involucra comportamiento inelástico, éste será confiado al sistema de aislación, de manera que el comportamiento inelástico en elementos estructurales como medio de disipación de energía durante un sismo no sea requerido (Kelly & Tsai, 1985), como sí sucede en el diseño sísmico de estructuras convencionales.

La caracterización de la respuesta dinámica de aceleración de piso es de interés debido a que el comportamiento de los componentes no estructurales (equipamiento u otros contenidos) está directamente relacionado con las características de la aceleración en el piso en donde están ubicados. En estructuras convencionales se sabe que, en general, una amplificación de la aceleración del suelo ocurre en todos los niveles, y por tanto los componentes no estructurales ubicados en los distintos niveles de un edificio estarán sujetos a fuerzas significativas. En estructuras con aislamiento basal, se sabe que las aceleraciones en los distintos niveles son menores a las del suelo, pero su caracterización sólo se ha realizado de manera cualitativa.

Los elementos no estructurales están sujetos a esas amplificaciones o de-amplificaciones de la aceleración del suelo, y si los períodos naturales de dichos elementos son cercanos a aquéllos de la estructura soportante, los componentes no estructurales pueden experimentar un *peak* de aceleraciones mucho mayor que el *peak* de aceleraciones del piso donde están ubicados.

Se identifican entonces tres parámetros para la caracterización de la respuesta de aceleración de piso: el *PGA* (*peak ground acceleration*), que se define como la máxima aceleración absoluta del movimiento del suelo; el *PFA* (*peak floor acceleration*), que se define como la máxima aceleración absoluta en un nivel particular; y el *PCA* (*peak component acceleration*), definido como la aceleración máxima absoluta experimentada por un componente no estructural. Una manera de caracterizar la respuesta de los componentes no estructurales es a través de un espectro de piso; éste contiene los *PCA* de varios componentes lineales no estructurales de distinto período ubicados en un mismo nivel de la estructura y bajo idénticas condiciones de amortiguamiento.

Elementos no estructurales, componentes no estructurales o elementos secundarios son aquellos elementos adheridos a los pisos y paredes de edificios o instalaciones industriales que no son parte del sistema soportante de cargas del edificio o instalación industrial. Aunque no son parte del sistema principal, ellos pueden estar sujetos a grandes fuerzas sísmicas. En general, los elementos no estructurales pueden ser clasificados en tres categorías: (1) componentes arquitectónicos, (2) equipamiento mecánico y eléctrico, y (3) contenidos de edificios (Villaverde, 2004).

La experiencia en sismos anteriores ha mostrado que la falla en el equipamiento y los escombros provocados por la falla de objetos y volcamiento de mobiliario puede afectar de manera crítica el desempeño de instalaciones vitales tales como estaciones de policía, comandos de emergencia, instalaciones de comunicación, plantas de energía y hospitales, entre otros. Por ejemplo, durante el sismo de Northridge (1994), en el área de Los Ángeles, California, varios hospitales importantes debieron ser evacuados, no como

consecuencia de daños estructurales sino de fallas en las redes de agua y tanques de provisión de agua, de fallas en sistemas de emergencia de energía, sistemas de ventilación y aire acondicionado, y algunos rompimientos de ventanas (Villaverde, 1997b).

La práctica convencional de diseño sísmico de edificios consiste en estimar las acciones sísmicas únicamente para el diseño del sistema principal resistente. Pero la experiencia ha demostrado que los objetivos del diseño sísmico, a saber: evitar pérdidas humanas y reducir las pérdidas económicas, no pueden ser logrados a menos que las acciones sísmicas sean tomadas en cuenta también para el diseño de los elementos no estructurales. Más aún, la filosofía del diseño sísmico basado en desempeño reconoce la importancia de lograr un comportamiento adecuado en los elementos no estructurales durante un terremoto; así, los distintos niveles de desempeño han sido establecidos tanto para elementos estructurales como para no estructurales (ATC, 1996). En la Tabla 1-1 se indica un ejemplo de los criterios de aceptabilidad de daño para elementos no estructurales.

Tabla 1-1 Ejemplo de cuantificación de objetivos de desempeño para elementos no estructurales, sitio de alta sismicidad. (Bertero & Bertero, 2002)

Objetivo de Desempeño	Períodos de Retorno (años)	Daño en Contenidos (aceleración de piso)
Completamente Operacional	43	0.6 g
Operacional	75	0.9 g
Seguridad de Vida	475	1.2 g
Cercano al colapso	970	1.5 g

En consecuencia, un aspecto importante en el diseño sismo-resistente de edificaciones es la determinación de los objetivos de desempeño, el cumplimiento de los cuales requiere de una adecuada estimación de las demandas sísmicas en los componentes no estructurales.

Como se mencionó antes, los componentes no estructurales en edificios están sometidos a aceleraciones distintas a las aceleraciones del suelo. En general, la demanda sísmica en ellos depende de las características del movimiento del suelo (*PGA*), de la amplificación dinámica de este movimiento en una ubicación particular dentro del edificio en la cual el componente no estructural está adherido (*PFA*), y de la amplificación del movimiento del componente debido a la relación entre el período natural de éste y los períodos modales del edificio (*PCA*). Adicionalmente, se sabe que en estructuras convencionales, la respuesta de un componente no estructural puede ser afectada por el grado de no-linealidad del sistema soportante (Lin & Mahin, 1985); y que en estructuras con aislamiento sísmico esta no-linealidad de la superestructura no influye, en general, en la respuesta de los elementos no estructurales contenidos en ellas. Se ha demostrado que la probable no linealidad de la superestructura no tiene un impacto significativo en el espectro de piso de estructuras aisladas diseñadas de acuerdo con la filosofía de los códigos más modernos. El método de diseño de estructuras aisladas resulta en superestructuras con una demanda media de ductilidad igual a la unidad, para la cual una demanda significativa de ductilidad es improbable (Politopoulos & Khac Pham, 2008).

Varias investigaciones han tratado, desde hace varios años, de desarrollar métodos racionales para el análisis sísmico de elementos no estructurales. Algunos de estos métodos tienen fundamentos bastante empíricos, y otros están basados en los principios de la dinámica estructural (Villaverde, 1997b). Todas estas proposiciones han sido emitidas únicamente para estructuras convencionales.

Según Villaverde (2009), las investigaciones acerca de la caracterización de la excitación sísmica en elementos no estructurales pueden en general ser divididas en dos

grupos. Los métodos que pertenecen al primer grupo consideran que la masa del elemento no estructural es lo suficientemente importante como para afectar la respuesta estructural de todo el sistema, razón por la cual estos métodos están basados en el análisis del sistema combinado. Los métodos del segundo grupo, en cambio, asumen que la masa del elemento no estructural es muy pequeña en comparación con la masa del sistema estructural resistente, y en consecuencia la respuesta de éste último no se ve afectada por la presencia de los elementos no estructurales. Por esta razón, los métodos de este grupo están basados en el análisis de los dos sistemas por separado (i.e., se desprecia la interacción dinámica entre elementos no estructurales y su estructura soportante). Se sabe que los métodos del primer grupo son difíciles de aplicar y de poca eficiencia, puesto que: (a) el análisis resulta en sistemas con excesivo número de grados de libertad (GDL); (b) hay grandes diferencias en los valores de sus matrices de masa, rigidez y constantes de amortiguamiento; y (c) se trata de sistemas con amortiguamiento no clásico, puesto que el amortiguamiento del elemento no estructural puede ser sustancialmente distinto al de la estructura soportante. Tales características hacen que los métodos tradicionales de análisis sean costosos, imprecisos e ineficientes. Por ejemplo, un análisis modal presenta dificultades en el cálculo de las frecuencias y modos del sistema estructural combinado, y métodos de integración paso a paso se convierten en extraordinariamente sensibles al paso de integración. Por tanto, muchos de los métodos propuestos para el análisis de elementos no estructurales evitan el análisis del sistema combinado para salvar las dificultades mencionadas. Uno de los métodos del segundo grupo es el *método del espectro de respuesta de piso*, el cual se describe a continuación.

Método del Espectro de Respuesta de Piso.

También llamado *sistemas en cascada* o *espectro de respuesta dentro de la estructura*, es uno de los primeros métodos usados en el análisis de elementos no estructurales. En este método, la historia de aceleración en la ubicación del elemento no estructural debe ser obtenida mediante integración en el tiempo. El espectro de respuesta de esta historia

de aceleración es luego calculado para obtener el “espectro de respuesta de piso”, a partir del cual la demanda de aceleración en un componente no estructural de período fundamental conocido puede ser estimada.

En general, el espectro de respuesta en la base del elemento no estructural es diferente del espectro de respuesta del movimiento del suelo. Como las aceleraciones son distintas en cada nivel de una misma estructura, existirá un espectro de piso en cada ubicación de un elemento no estructural. El uso de una sola historia de aceleración de piso para el cálculo del espectro de piso no es aceptable para propósitos de diseño; en consecuencia, es necesario generar espectros de respuesta de piso para varias historias de aceleración del suelo y usar el promedio o una envolvente de ellos. El método ha probado ser preciso para elementos no estructurales con masas que son mucho menores que las masas de la estructura soportante (los errores pueden ser significativos cuando las relaciones de masa secundaria a primaria son mayores a 10^{-3}) y períodos fundamentales no muy cercanos a los períodos naturales de la estructura (Villaverde, 1997b). Aunque el método es racional y simple en concepto, rápidamente se reconoce que es impráctico para efectos de diseño. Por esta razón, se requieren expresiones sencillas que proporcionen una estimación razonable del *PFA* y *PCA* (ó bien del espectro de piso) sin realizar un análisis tiempo-historia.

1.2 Criterios de Algunas Normas para el Diseño Sísmico de Elementos No Estructurales.

Requerimientos para el diseño de componentes no estructurales han sido incluidos en las normativas norteamericanas desde 1937. Su enfoque no fue sustancialmente revisado hasta después del terremoto de Northridge (1994). Este terremoto causó el cierre del recientemente reconstruido Olive View Hospital; se registraron aceleraciones máximas de 0.82g en la base y 1.7g en el techo. Aunque el sistema estructural permaneció sin daño significativo, los daños en los sistemas contra incendios, redes de agua,

equipamiento eléctrico y mecánico hicieron necesaria la evacuación del edificio (ATC, 2008) .

Es así que en la edición del Uniform Building Code de 1997, la expresión para estimar la solicitación sísmica en elementos no estructurales fue modificada para reflejar la amplificación en altura de las aceleraciones de piso observada en edificios convencionales.

A continuación se hace una breve revisión del enfoque para estimación de las aceleraciones máximas de piso indicado por las normativas vigentes más conocidas. Las disposiciones de la normatividad Chilena también son revisadas.

NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450) (BSSC, 2004) y **Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures** (ASCE/SEI 7-05, 2007): en estos documentos (muy parecidos entre sí) se indica que en edificios convencionales los valores del *PFA* varían linealmente desde un valor igual al *PGA* en el nivel del suelo a un valor igual a tres veces el *PGA* en el nivel de techo. Esta indicación es válida para cualquier tipo de edificio, independiente de si el edificio se comporta lineal o no linealmente. Los valores del *PCA* se asumen igual al *PFA* multiplicado por un factor que toma en cuenta la posible amplificación de respuesta dinámica debido a la flexibilidad de los componentes no estructurales. Este factor de amplificación es igual a 1.0 para componentes no estructurales rígidos y 2.5 para componentes no estructurales flexibles. Estos valores están indicados en el documento referido a través de una lista de elementos no estructurales, por ello en realidad el diseñador no necesita evaluar la flexibilidad del componente no estructural. La fuerza obtenida una vez calculada la aceleración del piso, es afectada por un coeficiente de importancia y por un factor de reducción por inelasticidad del componente, pero este tópico no es abordado en este trabajo. Para el caso de elementos no estructurales situados en estructuras equipadas con sistemas de aislación sísmica de base, FEMA 450 y ASCE 7-05 recomiendan realizar un análisis

especial para determinar la demanda sísmica correspondiente, aunque también indican que tal análisis no es necesario si el elemento no estructural ha sido diseñado teniendo en cuenta la demanda sísmica indicada para elementos no estructurales contenidos en estructuras convencionales.

Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica NCh2745 (INN, 2003): Las disposiciones de esta norma exigen usar los procedimientos de la norma NCh433 para la estimación de la carga lateral en elementos no estructurales soportados por estructuras con sistemas de aislación basal.

Diseño Sísmico de Edificios NCh433Of.96 (INN, 1996): En esta norma (válida para edificios convencionales), la fuerza sísmica mínima de diseño para elementos no estructurales está dada por:

$$F = (F_k / P_k) K_p C_p K_d P_p \quad (1.1)$$

en donde F_k es la fuerza horizontal aplicada en el nivel k del edificio; P_k es el peso sísmico del nivel k , C_p es el coeficiente sísmico para elementos secundarios; K_d es el factor de desempeño asociado al comportamiento sísmico de elementos secundarios, P_p es el peso total del elemento no estructural, y K_p es un factor de amplificación dinámica que depende de la relación T_p/T^* , en donde T^* es el período con mayor masa traslacional de la estructura y T_p es el período del elemento no estructural (Figura 1-1).

En la Ecuación (1.1) los términos C_p y K_d están asociados al comportamiento sísmico del elemento no estructural. Puesto que el objetivo de este trabajo consiste en evaluar la respuesta de elementos no estructurales en general sin tener en cuenta las características particulares de las distintas clases de componentes y equipos, se considera que los valores de los términos C_p y K_d son iguales a la unidad. En consecuencia, la Ecuación (1.1) puede ser interpretada de la siguiente manera:

$$PCA[g] = \frac{F}{P_p} = \frac{F_k}{P_k} K_p \quad (1.2)$$

Dado $K_p = 1$ cuando $T_p = 0$ (Figura 1-1), la Ecuación 1-2 indica implícitamente que el cociente F_k/P_k es una estimación del valor del *PFA* en el piso k . Debido a que la fuerza F_k puede, a su vez, ser obtenida tanto para edificios que se comportan de manera elástica y lineal como para edificios que desarrollan deformaciones inelásticas, el procedimiento indicado en la norma NCh433 es válido tanto para éstos como para aquéllos.

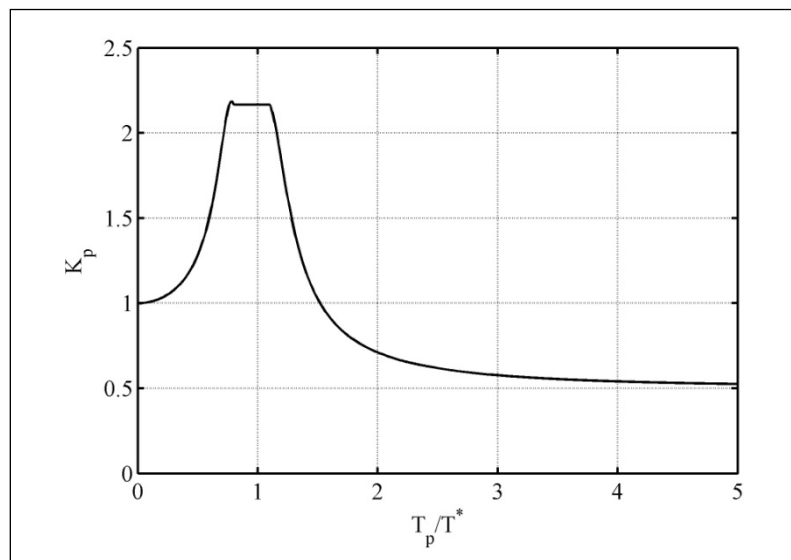


Figura 1-1 Factor de amplificación dinámica K_p para el diseño de elementos no estructurales indicado en la norma NCh433.

El procedimiento se asume independiente del valor del amortiguamiento del elemento no estructural, y es válido para el caso en que el peso del componente no estructural es menor que el 20% del peso sísmico del piso en que se encuentra ubicado (i.e., $P_p < 0.20 P_k$).

Diseño Sísmico de Estructuras e Instalaciones Industriales NCh2369 (INN, 2002): En esta norma (que no es aplicable a estructuras con aislación sísmica), la expresión para la estimación de la fuerza sísmica mínima de diseño para elementos no estructurales está dada por:

$$F_p = \frac{3.0a_p K_p}{R_p} P_p < P_p \quad (1.3)$$

donde a_p es la aceleración (como fracción de la gravedad) en el nivel de apoyo del elemento secundario o equipo que debe ser determinado mediante un análisis dinámico modal; R_p es un factor de modificación de respuesta del elemento secundario; P_p es el peso del elemento secundario; y K_p es el factor de amplificación dinámica para el diseño de elementos secundarios (idéntico al factor de igual nombre indicado en la norma NCh433). Si el valor del factor R_p es adoptado igual a la unidad (tal como se mencionó antes, este trabajo evalúa la respuesta de elementos no estructurales en general sin tener en cuenta las características particulares de cada uno de ellos), la Ecuación (1.3) puede ser interpretada de la siguiente manera:

$$PCA[g] = \frac{F_p}{P_p} = 3.0a_p K_p < 1.0 \quad (1.4)$$

en donde, naturalmente, $a_p = PFA$. Adicionalmente, la norma NCh2369 proporciona expresiones para el cálculo del valor del PFA y/o del PCA en función del período del elemento secundario para los siguientes casos: (1) el análisis modal no es realizado; y (2) para cuando no se conocen las características del edificio ni la ubicación del elemento secundario dentro del sistema estructural. Para el primer caso, se asume que las aceleraciones máximas de piso varían linealmente desde un valor igual al PGA en el nivel del suelo hasta un valor igual a cuatro veces el PGA en el nivel de techo. En este trabajo, interesa evaluar las estimaciones contenidas en esta norma para el caso en que se dispone de la información acerca de las propiedades dinámicas de la estructura y se conoce la ubicación particular del elemento secundario, por ello, únicamente las estimaciones que proporciona la Ecuación (1.3) serán examinadas.

1.3 Investigaciones Acerca de la Caracterización de la Respuesta de Aceleración de Piso en Estructuras con Sistemas de Aislación Sísmica de Base.

Extensivas simulaciones numéricas y experimentales indican que las deformaciones relativas generadas en la superestructura durante un movimiento sísmico son drásticamente reducidas con el uso de un apropiado sistema de aislación sísmica de base. También se sabe que ocurre una reducción de *peak* de aceleración transmitido a la superestructura. Fan y Ahmadi (1990) analizan el espectro de respuesta de piso de tres marcos con aislación basal de distintos tipos. Se describen, de manera cualitativa, las características de los espectros de piso generados por distintos sistemas de aislación basal; en todos los casos se reportan fuertes reducciones del *peak* del espectro de piso entre estructuras aisladas y de base fija, aunque para ciertas frecuencias se advierte una tendencia contraria. Kelly & Tsai (1985), analizaron un sistema aislado compuesto (estructura principal más un equipo ligero adherido al techo). Aunque el estudio de este tipo de sistemas no será abordado en el presente trabajo, las conclusiones siguen siendo válidas, esto es, que la aislación basal produce una reducción sustancial en la respuesta sísmica del equipamiento interno del edificio. Más recientemente, Politopoulos & Khac Pham (2008) realizan un estudio acerca de la sensibilidad de estructuras con aislamiento sísmico de base en cuanto a su probabilidad de falla y espectros de piso cuando existe una variabilidad de la excitación sísmica. Los resultados indican que, contrario a lo que ocurre en edificios convencionales (en los que el comportamiento no lineal tiene una significativa influencia en el espectro de piso), el espectro de piso en estructuras aisladas no se ve mayormente afectado por el comportamiento no lineal de la superestructura, pues como se mencionó antes, el método de diseño de estructuras aisladas resulta en superestructuras con una demanda media de ductilidad igual a la unidad.

En la literatura acerca del tema, no se encuentran investigaciones en cuanto a la evaluación cuantitativa de los valores del *PFA* ni de los espectros de piso en estructuras con aislación sísmica de base.

Por lo mencionado, cuando se aplican los procedimientos para el diseño de componentes no estructurales de edificios convencionales a edificios aislados, conforme lo prescribe la normativa NCh2745, errores significativos en la estimación de las solicitaciones sísmicas en elementos no estructurales dentro de estructuras aisladas podrían ocurrir.

1.4 Objetivos y Alcance

Con base en la discusión final de la sección anterior, se concluye que existe una necesidad de verificar la suposición dada en la norma NCh2745 en cuanto a la obtención de los valores del *PFA* y del espectro de piso para estructuras con aislación sísmica.

Basado en lo anterior, este trabajo forma parte de un programa de investigación que pretende desarrollar criterios relativamente simples para estimar, con fines de diseño, los valores del *PFA* y los espectros de piso usando solamente información acerca de la excitación del suelo y la obtenida mediante la aplicación de los métodos de análisis estático y modal espectral del edificio. En el caso particular de este trabajo, la investigación se centrará en el estudio de edificios con aislación sísmica de base. Se considerarán sistemas de aislación lineales (que pueden ser materializados de distintas maneras), y sistemas de aislación no lineales histeréticos (del tipo Péndulo Friccional o FPS). Trabajos paralelos estudiarán el caso de estructuras convencionales con distintos tipos de estructuraciones.

El trabajo presentado está limitado al estudio de marcos en dos dimensiones, los cuales son representativos de edificios que no son afectados de forma significativa por efectos de torsión.

La metodología de investigación planteada consiste primero en caracterizar la respuesta de aceleración de edificios aislados a través de una extensiva simulación numérica que considera distintos tipos de movimientos del suelo (campo cercano y lejano), edificios de distinto número de niveles (dos, cinco y ocho pisos) y tipo de comportamiento del sistema de aislación (lineal y no lineal).

Esta caracterización será usada para derivar empíricamente reglas sencillas para calcular aceleraciones de piso. Para ello, dos aproximaciones serán examinadas: (1) cálculo del valor del *PFA* mediante amplificación (o de-amplificación) del valor del *PGA*; y (2) evaluación de procedimientos alternativos para la estimación del espectro de piso mediante amplificación del valor del *PFA* por un factor dependiente de frecuencia.

En cuanto al *input* sísmico, tres conjuntos de mil registros sintéticos cada uno, representativos de un set de registros de fuente Lejana y dos de fuente Cercana fueron simulados. Tales registros sintéticos serán generados considerando que son realizaciones en el tiempo de un proceso aleatorio no estacionario.

El objetivo principal de este trabajo consiste en caracterizar la demanda sísmica en elementos no estructurales ubicados en estructuras equipadas con sistemas de aislación sísmica de base, para lo cual se analizará la relación entre las aceleraciones de piso y factores tales como las características del movimiento del suelo (excitaciones de fuente Cercana y Lejana) y los parámetros dinámicos relevantes: período fundamental del sistema estructural de soporte, período del elemento no estructural, ubicación del elemento no estructural dentro del edificio, y tipo de comportamiento del sistema de aislación de base (lineal o no lineal).

2. DESCRIPCIÓN Y MODELAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS CONSIDERADAS

En este estudio, tres marcos bidimensionales de hormigón armado de dos, cinco y ocho pisos equipados con sistemas de aislación sísmica de base, son considerados (Figura 2-2). Se asume que la masa en los diferentes pisos y en el nivel base es idéntica y proveniente de una estructuración de marcos cada cinco metros, proporcionando las cargas indicadas en la Tabla 2-1. El “nivel base” es el nivel de piso ubicado inmediatamente por encima del sistema de aislación.

Las matrices de rigidez, de masa y de amortiguamiento fueron ensambladas con la formulación de grados de libertad indicada en la Figura 2-1(c). Esta formulación permite un mejor modelamiento del amortiguamiento global, puesto que es posible considerar el amortiguamiento de la sub y superestructura por separado, siendo para esta última únicamente el amortiguamiento de tipo clásico (Villaverde, 2009), puesto que las matrices de rigidez y amortiguamiento correspondientes no están acopladas.

Tabla 2-1 Cargas aplicadas a las estructuras consideradas

Cargas:	
D =	600 kg/m ² : incluye pesos propios, terminados y otros
L =	250 kg/m ²
Peso sísmico:	
W = D + 1.25L =	662.5 kg/m ²
	3.3125 t/m : carga uniforme en vigas

El diseño de los sistemas estructurales se realizó bajo la Normativa Chilena Oficial de Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica NCh2745 (INN, 2003).

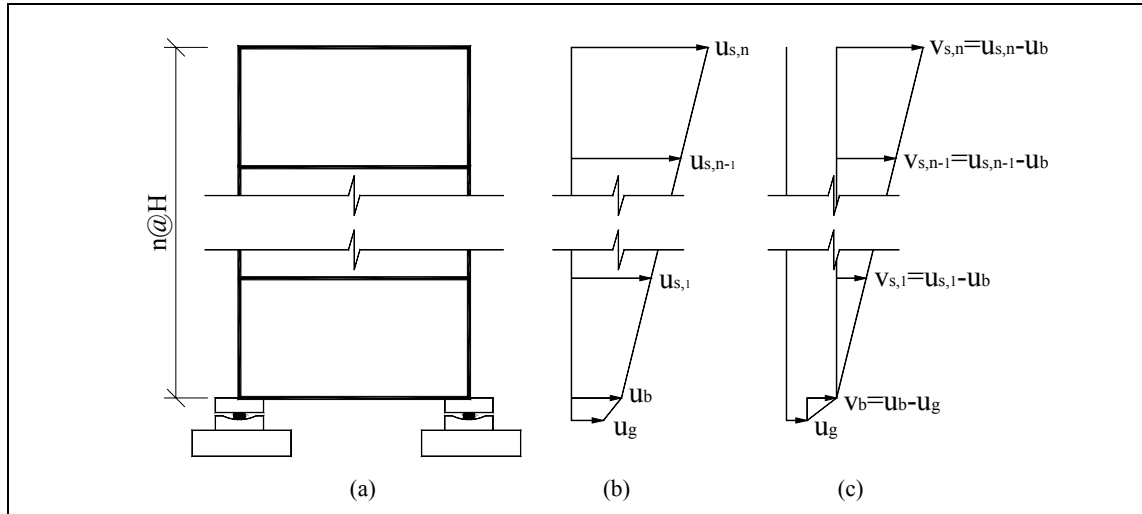


Figura 2-1 Grados de libertad de las estructuras consideradas.

El espectro utilizado para el diseño de la superestructura es el espectro promedio de los espectros correspondientes a cada uno de los registros sintéticos de fuente Lejana. Cuando los registros de fuente Cercana son aplicados a las estructuras, se mantiene la superestructura antes diseñada y un sistema de aislación particular es diseñado para cada grupo de tales registros, y para ello se usó el espectro promedio de los espectros correspondientes a cada uno de los registros sintéticos de fuente Cercana. Es decir, la superestructura en todos los casos es la misma para cada marco, independientemente del tipo de registros aplicados.

Modelos con comportamiento lineal y no lineal son considerados. Como se discutió en el Capítulo 1, la probable no linealidad de la superestructura no tiene un impacto significativo en el espectro de piso de estructuras aisladas (Politopoulos & Khac Pham, 2008). Por ello, en este trabajo se ha considerado que la superestructura es linealmente elástica. Un factor de reducción de $R_I = 1.0$ para el corte transmitido a la superestructura es consistente con aquello.

2.1 Superestructura

Un valor del módulo de elasticidad del hormigón igual a $2.00 \cdot 10^5 \text{ kg/cm}^2$ es adoptado. Las secciones transversales de vigas y columnas son obtenidas luego de satisfacer los siguientes criterios: (1) requerimientos de rigidez lateral de los marcos para cumplir con los desplazamientos laterales relativos de entrepiso permitidos; (2) relación entre el período fundamental de la estructura aislada y de base fija; y (3) homogeneidad en el diseño.

Cada estructura fue modelada con elementos barra bidimensionales de tres GDL por nodo. Las secciones de hormigón armado efectivas conforme las recomendaciones de la literatura fueron consideradas (Paulay & Piestley, 1992), en lugar de secciones transversales completas. Se usó el siguiente criterio: (a) para elementos en flexo-compresión: si $P \geq 0.5 f'_c A_c$: $I_e = 0.8 I_g$; si $P = 0.2 f'_c A_c$: $I_e = 0.6 I_g$; y si $P = -0.05 f'_c A_c$: $I_e = 0.4 I_g$; y (b) para elementos en flexión: $I_e = 0.5 I_g$; donde P es la carga axial, A_c el área de la sección transversal, I_e la inercia efectiva e I_g la inercia completa del miembro estructural.

Para efectos de análisis, diafragmas de piso fueron adoptados en cada nivel, con lo cual las matrices de rigidez fueron condensadas a los GDL laterales únicamente, conforme a las técnicas de condensación estática (Chopra, 1995). El amortiguamiento de la superestructura se adopta igual al 5% del crítico. En la Figura 2-2 se muestran las secciones de vigas y columnas de los marcos considerados en este estudio.

2.2 Sistemas de Aislación Sísmica de Base

Para el sistema de aislación basal, dos tipos de sistemas son considerados: (1) sistemas no lineales de aislación basal del tipo FPS, y (2) sistemas de aislación lineales, los cuales pueden ser materializados de diferentes maneras.

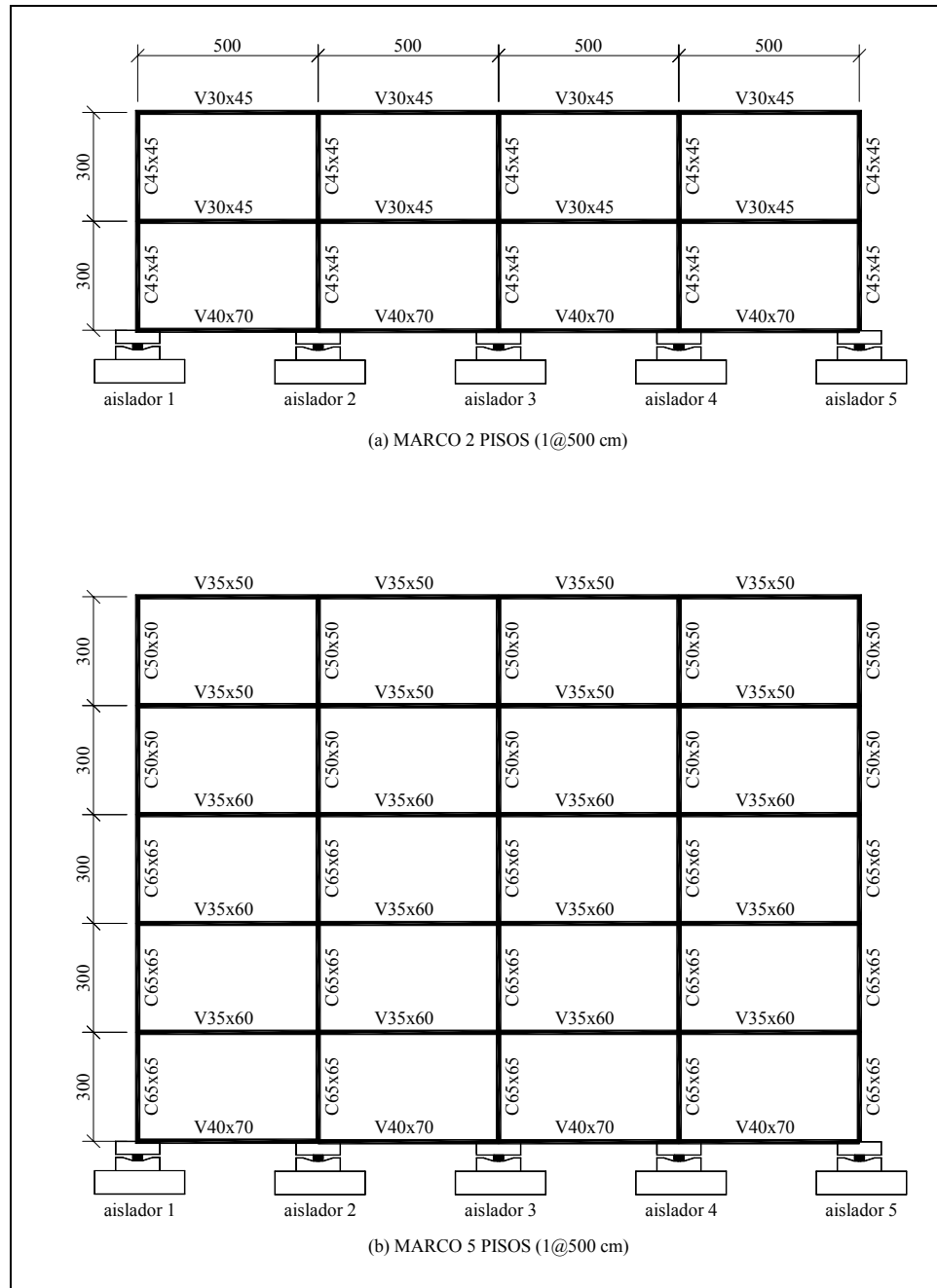


Figura 2-2 Secciones de los marcos de análisis. a) marcos de 2 pisos; b) marco de 5 pisos; y c) marco de 8 pisos.

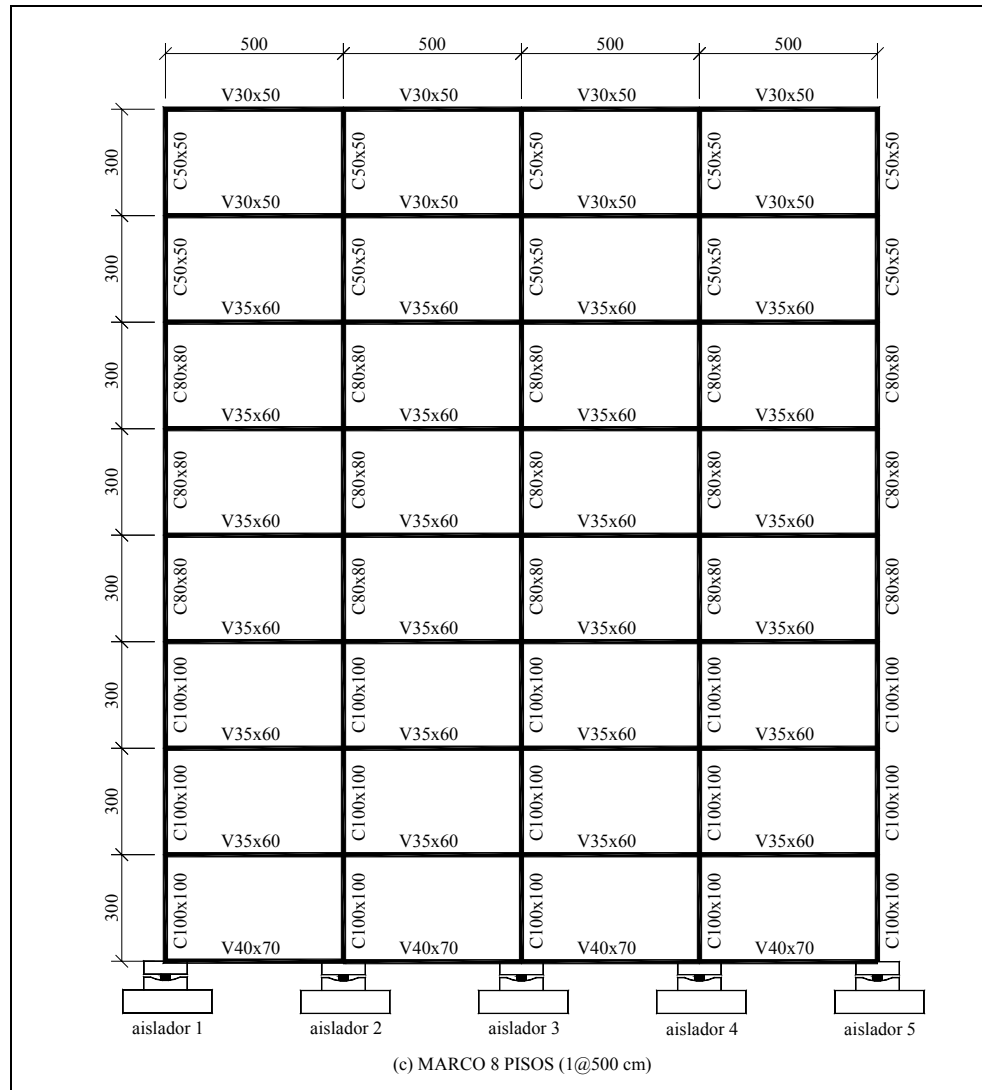


Figura 2-2 (continuación)

En adelante, los edificios que tienen sistemas lineales de aislación se referirán simplemente como “sistemas lineales”; y los edificios que tienen sistemas no lineales de aislación se denominarán “sistemas no lineales”. Debe notarse entonces, que las características de linealidad o no linealidad de los edificios se refieren a las características del sistema de aislación considerado.

2.2.1 Modelación de los Sistemas de Aislación Lineal

Las propiedades del sistema lineal de aislamiento fueron adoptadas iguales a las propiedades lineales equivalentes de los sistemas de aislamiento no lineales (FPS) (Figura 2-8 y Figura 2-9). La definición de los parámetros lineales equivalentes es la indicada en la norma NCh2745. Los parámetros de interés son la rigidez efectiva de sistema de aislamiento al desplazamiento de Diseño (K_D) y la razón de amortiguamiento efectivo correspondiente (β_{ef}).

Para la deducción de las ecuaciones de movimiento del sistema lineal, se considera inicialmente el sistema estructural aislado mostrado en la Figura 2-3. El sistema posee 2 GDL y se asume que la superestructura y el sistema de aislamiento tienen características de amortiguamiento viscoso. La masa m_b representa la masa del nivel inmediatamente superior al sistema de aislamiento (denominado nivel base); y k_b y c_b su rigidez y constante de amortiguamiento, respectivamente. Los términos m_s , k_s y c_s representan la masa, rigidez y constante de amortiguamiento de un modelo de base fija de la superestructura, respectivamente. Estos valores se suponen constantes en el tiempo y las fuerzas de amortiguamiento del sistema se suponen de tipo viscoso, es decir se asume que el sistema es lineal. Por otro lado, u_s es el desplazamiento absoluto de la masa de la superestructura, u_b el desplazamiento absoluto del nivel base, y u_g el desplazamiento del suelo.

El equilibrio en cada masa impone (Figura 2-4):

para la masa m_b :

$$k_s (u_s - u_b) + c_s (\dot{u}_s - \dot{u}_b) - k_b (u_b - u_g) - c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_g) - m_b \cdot \ddot{u}_b = 0 \quad (2.1)$$

para la masa m_s :

$$-k_s (u_s - u_b) - c_s (\dot{u}_s - \dot{u}_b) - m_s \cdot \ddot{u}_s = 0 \quad (2.2)$$

Reemplazando (2.2) en (2.1), se tiene:

$$-k_b(u_b - u_g) - c_b(\dot{u}_b - \dot{u}_g) = m_b \cdot \ddot{u}_b + m_s \cdot \ddot{u}_s \quad (2.3)$$

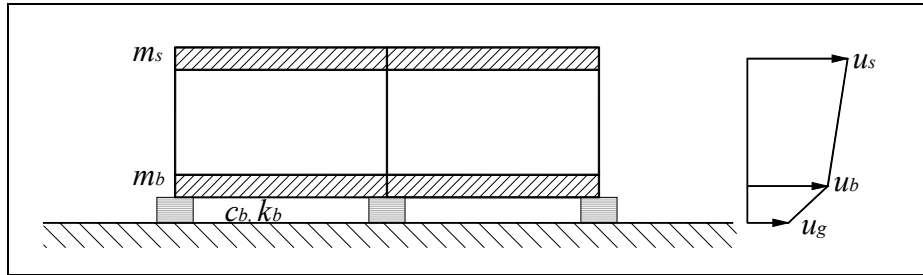


Figura 2-3 Sistema estructural aislado de 2 GDL.

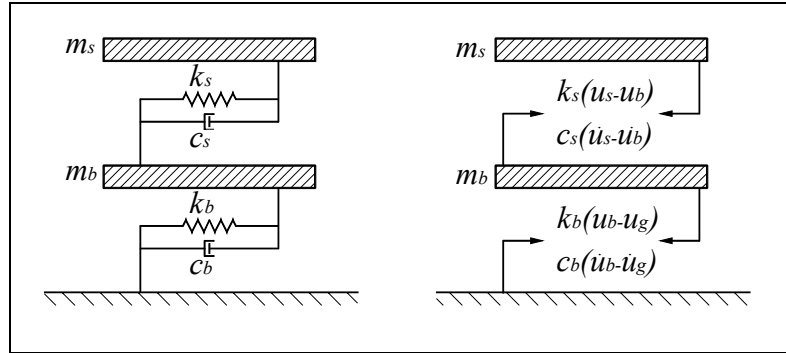


Figura 2-4 Diagramas de cuerpo libre del sistema estructural indicado en la Figura 2-3.

Se define el desplazamiento de la masa de la superestructura respecto al sistema de aislación como:

$$v_s = u_s - u_b \quad (2.4)$$

y el desplazamiento del nivel base respecto al suelo se define como:

$$v_b = u_b - u_g \quad (2.5)$$

Reemplazando (2.4) y (2.5) en (2.2) y (2.3), respectivamente, se tiene:

$$-k_s (v_s) - c_s (\dot{v}_s) = m_s (\ddot{v}_s + \ddot{u}_b) = m_s (\ddot{v}_s + \ddot{v}_b + \ddot{u}_g) \quad (2.6)$$

$$-k_b (v_b) - c_b (\dot{v}_b) = m_b (\ddot{v}_b + \ddot{u}_g) + m_s (\ddot{v}_s + \ddot{v}_b + \ddot{u}_g) \quad (2.7)$$

Agrupando y ordenando:

$$m_s \ddot{v}_s + m_s \ddot{v}_b + k_s (v_s) + c_s (\dot{v}_s) = -m_s \ddot{u}_g \quad (2.8)$$

$$(m_b + m_s) \ddot{v}_b + m_s \ddot{v}_s + k_b (v_b) + c_b (\dot{v}_b) = -(m_b + m_s) \ddot{u}_g \quad (2.9)$$

Matricialmente, las ecuaciones (2.8) y (2.9) se pueden escribir como:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} (m_b + m_s) & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix}}_M \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{v}_b \\ \ddot{v}_s \end{bmatrix}}_{\ddot{v}} + \underbrace{\begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{v}_b \\ \dot{v}_s \end{bmatrix}}_{\dot{v}} + \underbrace{\begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix}}_K \underbrace{\begin{bmatrix} v_b \\ v_s \end{bmatrix}}_v = - \underbrace{\begin{bmatrix} (m_b + m_s) & m_s \\ m_s & m_s \end{bmatrix}}_M \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_r \ddot{u}_g \quad (2.10)$$

Se puede escribir:

$$M\ddot{v} + C\dot{v} + Kv = -Mr\ddot{u}_g \quad (2.11)$$

Se debe notar que en la Ecuación (2.10) (Villaverde, 2009): (1) si la superestructura es rígida $(v_s = u_s - u_b = 0)$, la primera ecuación queda:

$(m_b + m_s) \ddot{v}_b + k_b (v_b) + c_b (\dot{v}_b) = -(m_b + m_s) \ddot{u}_g$, que describe el movimiento del sistema aislado con toda la masa actuando sobre él; y (2) si el sistema de aislación fuera perfectamente rígido $(v_b = u_b - u_g = 0)$, es decir que la estructura estuviera directamente

apoyada sobre el suelo, la segunda ecuación queda: $m_s \ddot{v}_s + k_s (v_s) + c_s (\dot{v}_s) = -m_s \ddot{u}_g$, que es la ecuación clásica de estructuras apoyadas directamente sobre el suelo.

Se considera ahora el sistema estructural aislado de n pisos mostrado en la Figura 2-5. Sean $[M]$, $[C]$ y $[K]$ sus matrices de masa, amortiguamiento y rigidez del sistema considerado como de base fija, respectivamente; k_b y c_b la rigidez y constante de amortiguamiento del sistema de aislación, respectivamente; y m_b la masa del nivel base. u_i son los desplazamientos absolutos de las masas de los pisos i de la superestructura, u_b los desplazamientos absolutos del nivel base y u_g el desplazamiento del suelo. Las expresiones antes deducidas siguen siendo válidas, con la salvedad de que ahora $\{v_s\} = \{v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n\}^T$ es un vector que contiene los desplazamientos de los n pisos de la superestructura relativos al sistema de aislación (Ecuación (2.4)), y $\{r\}$ el vector de influencia que acopla los GDL del sistema de base fija con el movimiento del sistema de aislación. El diagrama de cuerpo libre de la masa asociada al sistema de aislación se indica en la Figura 2-6.

Con referencia a la Figura 2-6 (b), la ecuación de movimiento de masa asociada al sistema de aislación es:

$$-k_b (u_b - u_g) - c_b (\dot{u}_b - \dot{u}_g) - \sum m_i \ddot{u}_i = m_b \ddot{u}_b \quad (2.12)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (2.4) y (2.5), se puede escribir:

$$-k_b v_b - c_b \dot{v}_b - \sum m_i (\ddot{v}_i + \ddot{v}_b + \ddot{u}_g) = m_b (\ddot{v}_b + \ddot{u}_g) \quad (2.13)$$

Reordenando se tiene:

$$(m_b + \sum m_i) \ddot{v}_b + \sum m_i \ddot{v}_i + k_b v_b + c_b \dot{v}_b = -(\sum m_i + m_b) \ddot{u}_g \quad (2.14)$$

Denominando a la masa total como: $m = m_b + \sum m_i = m_b + \{r\}^T M \{r\}$, en que M es la matriz de masa de la estructura de base fija; y el término $\sum m_i$ indica la sumatoria de todas las masas de la superestructura que se puede escribir como $\{r\}^T M \{r\}$. Se tiene entonces:

$$\left(m_b + \{r\}^T M \{r\} \right) \ddot{v}_b + \{r\}^T M \{r\} \ddot{v}_i + k_b v_b + c_b \dot{v}_b = -m \ddot{u}_g \quad (2.15)$$

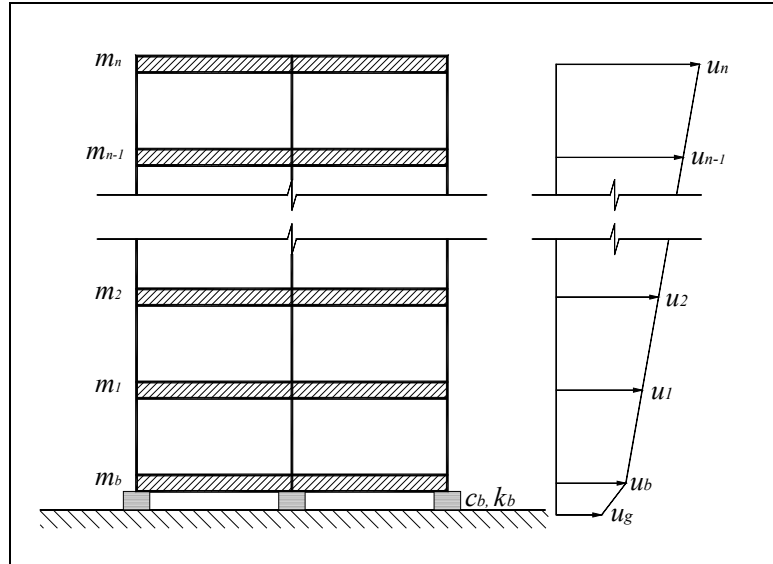


Figura 2-5 Sistema estructural aislado de n GDL.

La ecuación de movimiento de un sistema estructural de base fija es:

$$[M] \{r\} (\ddot{v} + \ddot{u}_g) + [C] \{\dot{v}\} + [K] \{v\} = 0 \quad (2.16)$$

Por analogía con la Ecuación (2.16), la ecuación de movimiento de la superestructura aislada cuando los desplazamientos son referidos al nivel de aislación puede ser escrita como:

$$[M]\{\ddot{r}\}(\ddot{v} + \ddot{v}_b + \ddot{u}_g) + [C]\{\dot{v}\} + [K]\{v\} = 0 \quad (2.17)$$

Matricialmente las ecuaciones (2.15) y (2.17) se pueden escribir:

$$\begin{aligned} & \underbrace{\begin{bmatrix} m_b + \{r\}^T [M]\{r\} & \{r\}^T [M] \\ [M]\{r\} & [M] \end{bmatrix}}_{M_c} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{v}_b \\ \{\ddot{v}\} \end{bmatrix}}_{\{\ddot{v}\}_c} + \underbrace{\begin{bmatrix} c_b & 0 \\ 0 & [C] \end{bmatrix}}_{C_c} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{v}_b \\ \{\dot{v}\} \end{bmatrix}}_{\{\dot{v}\}_c} + \underbrace{\begin{bmatrix} k_b & 0 \\ 0 & [K] \end{bmatrix}}_{K_c} \underbrace{\begin{bmatrix} v_b \\ \{v\} \end{bmatrix}}_{\{v\}_c} = \\ & = - \underbrace{\begin{bmatrix} m_b + \{r\}^T [M]\{r\} \\ [M]\{r\} \end{bmatrix}}_{M_c} \ddot{u}_g = - \underbrace{\begin{bmatrix} m_b + \{r\}^T [M]\{r\} & \{r\}^T [M] \\ [M]\{r\} & [M] \end{bmatrix}}_{M_c} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ \{0\} \end{bmatrix}}_{\{r\}_c} \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (2.18)$$

Por tanto, la ecuación de movimiento a resolver es:

$$M_c \{\ddot{v}\}_c + C_c \{\dot{v}\}_c + K_c \{v\}_c = -M_c \{r\}_c \ddot{u}_g \quad (2.19)$$

En la Ecuación (2.18), k_b es la rigidez al desplazamiento de diseño del sistema de aislación (denominada K_D en los parámetros lineales equivalentes indicados en las Figuras 2-8 y 2-9), y $c_b = 2\xi\omega m$, en donde $\xi = \beta_{eff}$ (β_{eff} es el factor de amortiguamiento efectivo también indicado en las Figuras 2-8 y 2-9).

La ventaja del sistema de coordenadas usado en el planteamiento del equilibrio es que permite la separación entre el amortiguamiento del sistema de aislación y el amortiguamiento de la superestructura. Esto supone un mejor modelamiento del amortiguamiento no clásico, mediante la definición de un amortiguamiento del sistema de aislación (que puede tener valores relativamente altos) y el de la superestructura que puede asumirse como clásico.

2.2.2 Modelación de los Sistemas de Aislación No Lineal

Como se mencionó antes, en este estudio, los sistemas de aislamiento no lineal considerados son del tipo FPS. El diseño de estos sistemas fue realizado conforme la norma NCh2745 y los parámetros de diseño obtenidos son los indicados en la Figura 2-8 y en la Figura 2-9. En estas figuras se muestran los parámetros de diseño y máximos, así como los valores del factor amortiguamiento efectivo logrados en el diseño.

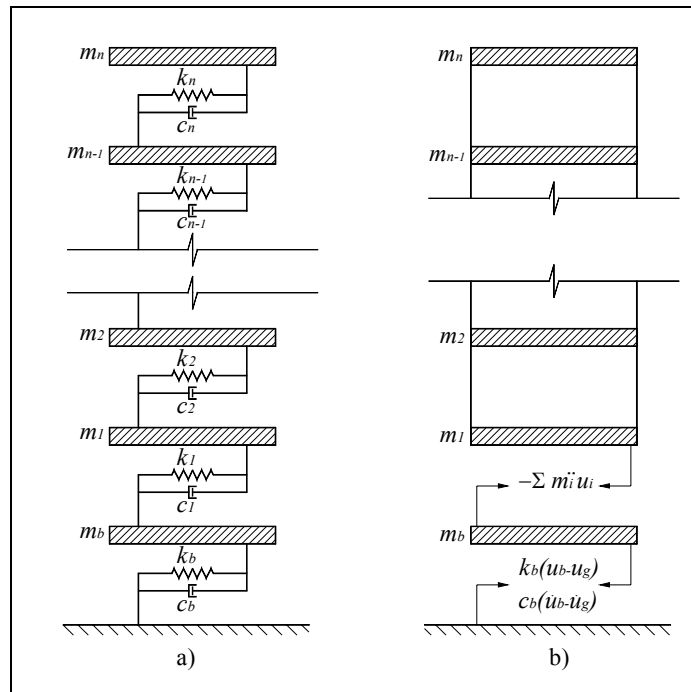


Figura 2-6 Diagramas de cuerpo libre de sistema estructural indicado en la Figura 2-5.

Relación Fuerza-Deformación del FPS

Un aspecto importante en la formulación de las ecuaciones de movimiento de los sistemas aislados con FPS es la relación constitutiva fuerza-deformación de los aisladores. Los diferentes niveles de complejidad involucrados en la formulación de esta

relación están relacionados con la precisión obtenida con el modelo (Almazán, De la Llera, & Inaudi, 1998).

Para el modelamiento de la no linealidad del sistema de aislación se consideró únicamente la producida por la fricción. La no linealidad geométrica dada por las condiciones de apoyo del aislador no fue considerada.

La relación fuerza-deformación de los aisladores es adoptada bajo la suposición de deformaciones pequeñas y válidas para sistemas en una dimensión. La relación fuerza deformación resulta del planteamiento del equilibrio del aislador (Figura 2-7 (b)) (Villaverde, 2009)(Christopoulos & Filiatrault, 2008).

La fuerza no lineal restauradora en el aislador está dada por:

$$F_{NL} = \mu \cdot W \operatorname{sgn}(\dot{u}) + \frac{W}{R} \cdot u \quad (2.20)$$

donde W es el peso de la estructura actuando sobre el aislador; u la deformación lateral del FPS relativo al suelo y $\dot{u}$ su velocidad; R es el radio de la superficie esférica; μ es el coeficiente de fricción, y $\operatorname{sgn}(\dot{u})$ es la función signo de la velocidad (1 ó -1 según la dirección de la velocidad). La Ecuación (2.20) es derivada asumiendo que el ángulo θ de la Figura 2-7 (b) es pequeño, y por tanto $\cos(\theta) = 1$ y $\tan(\theta) = 0$. Naturalmente, tal aproximación es válida sólo cuando la componente vertical del movimiento del suelo es ignorada (Almazán, De la Llera, & Inaudi, 1998).

Los resultados presentados en este estudio consideran un coeficiente de fricción μ_s dependiente de velocidad y presión propuesto por Constantinou, Mokha, & Reinhorn (1990). La expresión es la siguiente:

$$\mu_s = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \cdot e^{-a\|\dot{u}\|} \quad (2.21)$$

en donde $\mu_{\max}$ es el coeficiente de fricción a velocidades altas de deslizamiento; $\mu_{\min}$ es el coeficiente de fricción a velocidades bajas de deslizamiento; a es una constante para una presión de apoyo y condiciones de interface dadas; y $\dot{u}$ es la velocidad de deslizamiento. Los factores: $\mu_{\min} = 0.03$, $\mu_{\max} = 0.07$, y $a = 0.20\text{s/cm}$ fueron adoptados en el análisis.

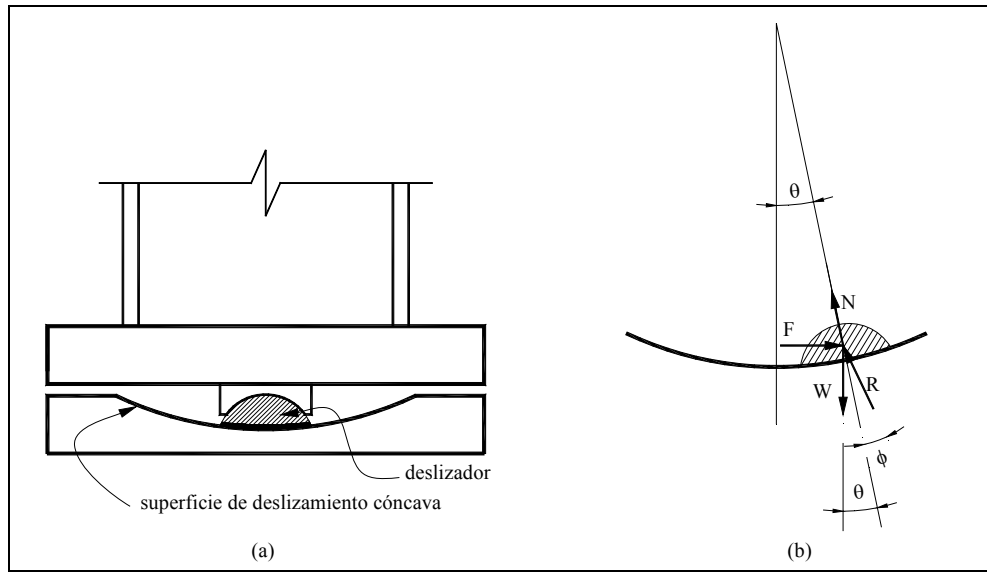


Figura 2-7 Vista esquemática de un FPS y diagrama de equilibrio.

Se requiere evaluar el peso sobre cada aislador en cada instante, y para ello es necesario calcular la reacción en cada apoyo en cada instante de tiempo. El procedimiento utilizado requiere la subdivisión de la matriz de rigidez como se indica a continuación:

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} \\ K_{ba} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \\ R \end{bmatrix} - AEP \quad (2.22)$$

en que el subíndice a hace referencia a los GDL laterales y b a los restantes GDL, u son los desplazamientos, P las cargas nodales asociadas a los GDL a , R las reacciones en los

GDL b , y AEP las acciones de empotramiento perfecto. Lógicamente, los desplazamientos u se calculan con:

$$u = K_{aa}^{-1} \cdot (P - AEP) \quad (2.23)$$

y las reacciones se determinan con la siguiente expresión:

$$R = K_{ba} \cdot u + AEP \quad (2.24)$$

Entonces, conocida la historia no lineal de las reacciones de los apoyos y la historia de velocidades es posible evaluar la Ecuación (2.20).

La formulación desarrollada en la Sección 2.2.1 sigue siendo válida para sistemas no lineales, pero con la incorporación del término f_{NL} que contiene las fuerzas no lineales producidas por el sistema de aislación. Ahora, las fuerzas viscosas y elásticas del sistema de aislación son proporcionadas directamente de la historia no lineal fuerza-deformación de los aisladores. La Ecuación (2.18) queda:

$$\begin{aligned} & \underbrace{\begin{bmatrix} m_b + \{r\}^T [M] \{r\} & \{r\}^T [M] \\ [M] \{r\} & [M] \end{bmatrix}}_{M_c} \underbrace{\begin{bmatrix} \ddot{v}_b \\ \{\ddot{v}\} \end{bmatrix}}_{\{\ddot{v}\}_c} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & [C] \end{bmatrix}}_{C_c} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{v}_b \\ \{\dot{v}\} \end{bmatrix}}_{\{\dot{v}\}_c} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & [K] \end{bmatrix}}_{K_c} \underbrace{\begin{bmatrix} v_b \\ \{v\} \end{bmatrix}}_{\{v\}_c} + \underbrace{\begin{bmatrix} f_{NL} \\ \{0\} \end{bmatrix}}_{FNL} = \\ & = \underbrace{\begin{bmatrix} m_b + \{r\}^T [M] \{r\} & \{r\}^T [M] \\ [M] \{r\} & m_s \end{bmatrix}}_{M_c} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ \{0\} \end{bmatrix}}_{\{r\}_c} \ddot{u}_g \end{aligned} \quad (2.25)$$

en donde el término f_{NL} evalúa la fuerza no lineal en los aisladores mediante la Ecuación (2.20).

En la Figura 2-8 y en la Figura 2-9 se muestran los parámetros de diseño del sistema de aislación obtenidos para las tres estructuras y los tipos de excitaciones sísmicas consideradas en este. La norma NCh2745 define dos desplazamientos: el de diseño (D_D) y el máximo (D_M); es por esto que en estas figuras se indican dos valores de la rigidez y

período efectivos: (1) los asociados a D_D ; y (2) los asociados a D_M . El D_D está relacionado con el sismo de diseño que tiene, como mínimo el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años; y el D_M está asociado al nivel máximo del movimiento del suelo que tiene una probabilidad de excedencia de 10% en un período de 100 años. En la norma se usan los parámetros asociados al D_D o D_M según el tipo de elemento (sub ó superestructura) que se pretenda diseñar.

Tabla 2-2 Períodos de las estructuras aisladas diseñadas para excitaciones de fuente Lejana.

	modo 1	modo 2	modo 3
marco de 2 pisos	1.44 seg	0.29 seg	0.11 seg
marco de 5 pisos	1.50 seg	0.29 seg	0.14 seg
marco de 8 pisos	1.55 seg	0.30 seg	0.15 seg

Tabla 2-3 Períodos de las estructuras aisladas diseñadas para excitaciones de fuente Cercana.

	Fuente Cercana I		
	modo 1	modo 2	modo 3
marco de 2 pisos	2.18 seg	0.29 seg	0.11 seg
marco de 5 pisos	2.08 seg	0.30 seg	0.14 seg
marco de 8 pisos	2.09 seg	0.30 seg	0.15 seg

	Fuente Cercana II		
marco de 2 pisos	2.54 seg	0.29 seg	0.11 seg
marco de 5 pisos	2.44 seg	0.30 seg	0.14 seg
marco de 8 pisos	2.45 seg	0.30 seg	0.15 seg

Un análisis modal espectral conforme lo indica la norma NCh2745 (INN, 2003) fue realizado. Como se mencionó en la sección 2.2.1, los parámetros de rigidez y factor de

amortiguamiento de los sistemas lineales de aislación son idénticos a los parámetros efectivos de los sistemas no lineales (Figura 2-8 y Figura 2-9), y por ello, los resultados del análisis modal de los sistemas lineales y no lineales son idénticos. De este análisis, los períodos modales de las estructuras aisladas se indican en la Tabla 2-2 y en la Tabla 2-3. En la Figura 2-10 a Figura 2-12 se muestran las formas modales de las estructuras aisladas sujetas a las excitaciones de fuente Lejana y Cercana.

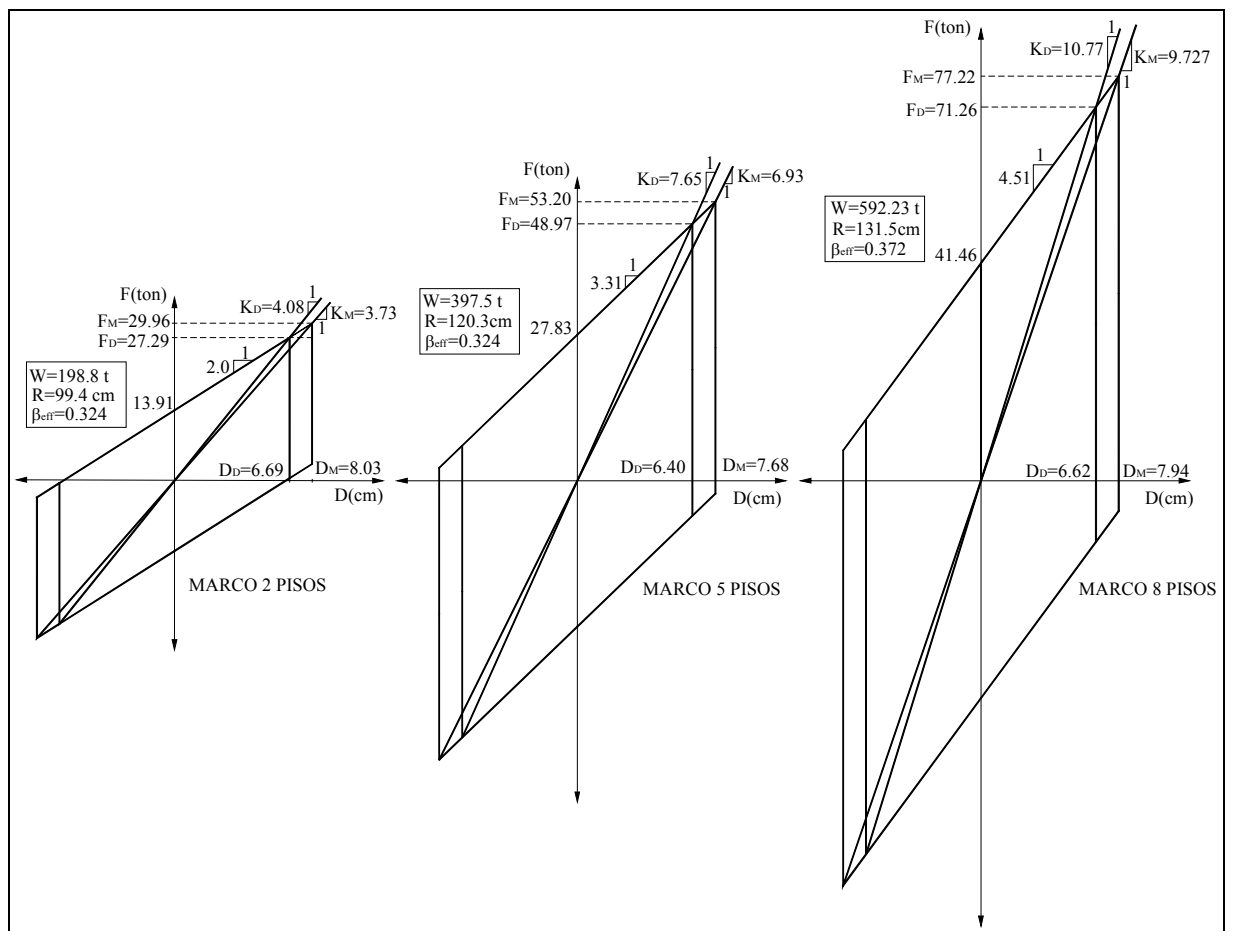


Figura 2-8 Parámetros del diseño de los sistemas de aislación de base de las estructuras consideradas. Excitación de fuente Lejana.

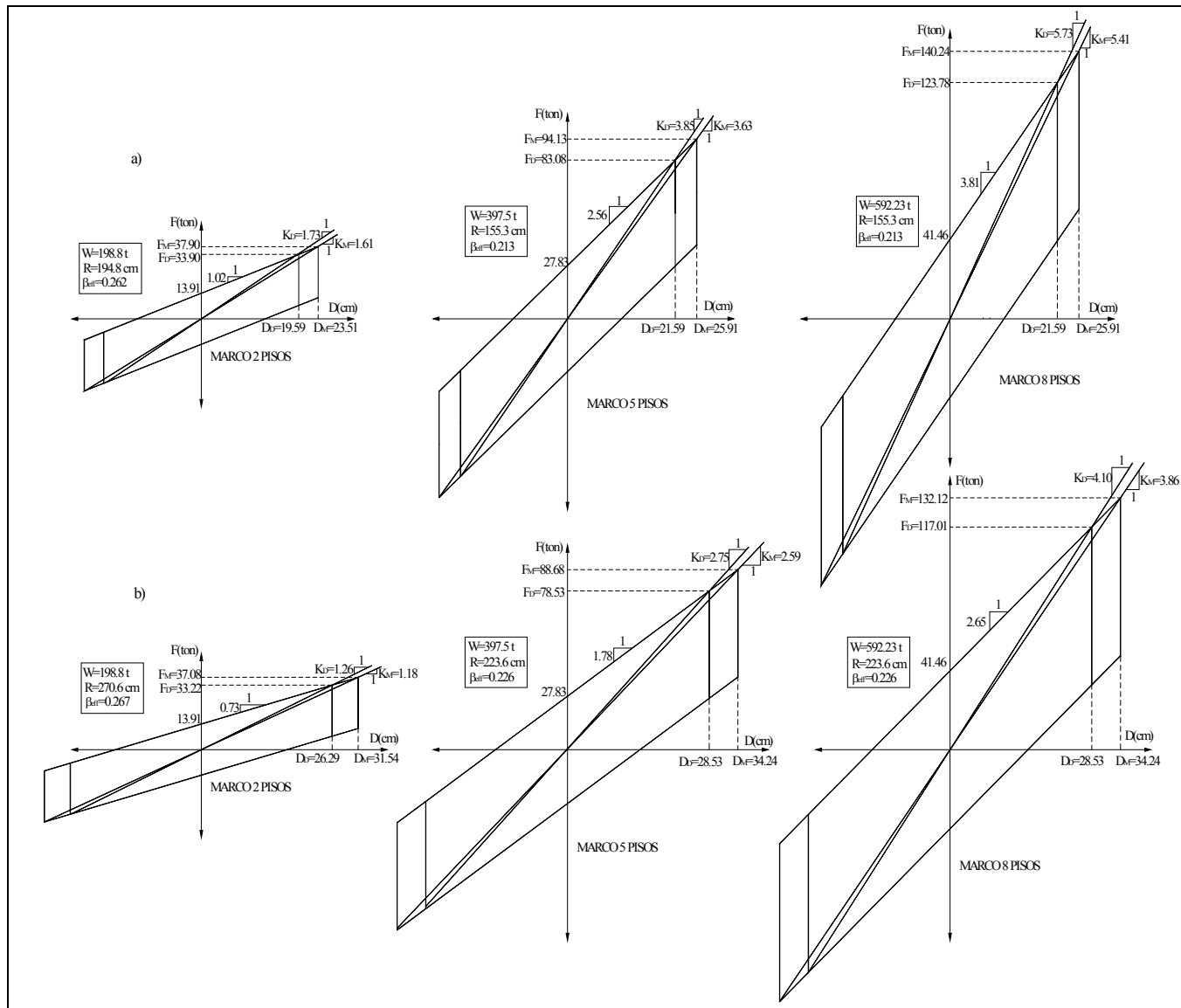


Figura 2-9 Parámetros del diseño de los sistemas de aislación de base de las estructuras consideradas. a) Excitación de fuente Cercana I; b) Excitación de fuente Cercana II.

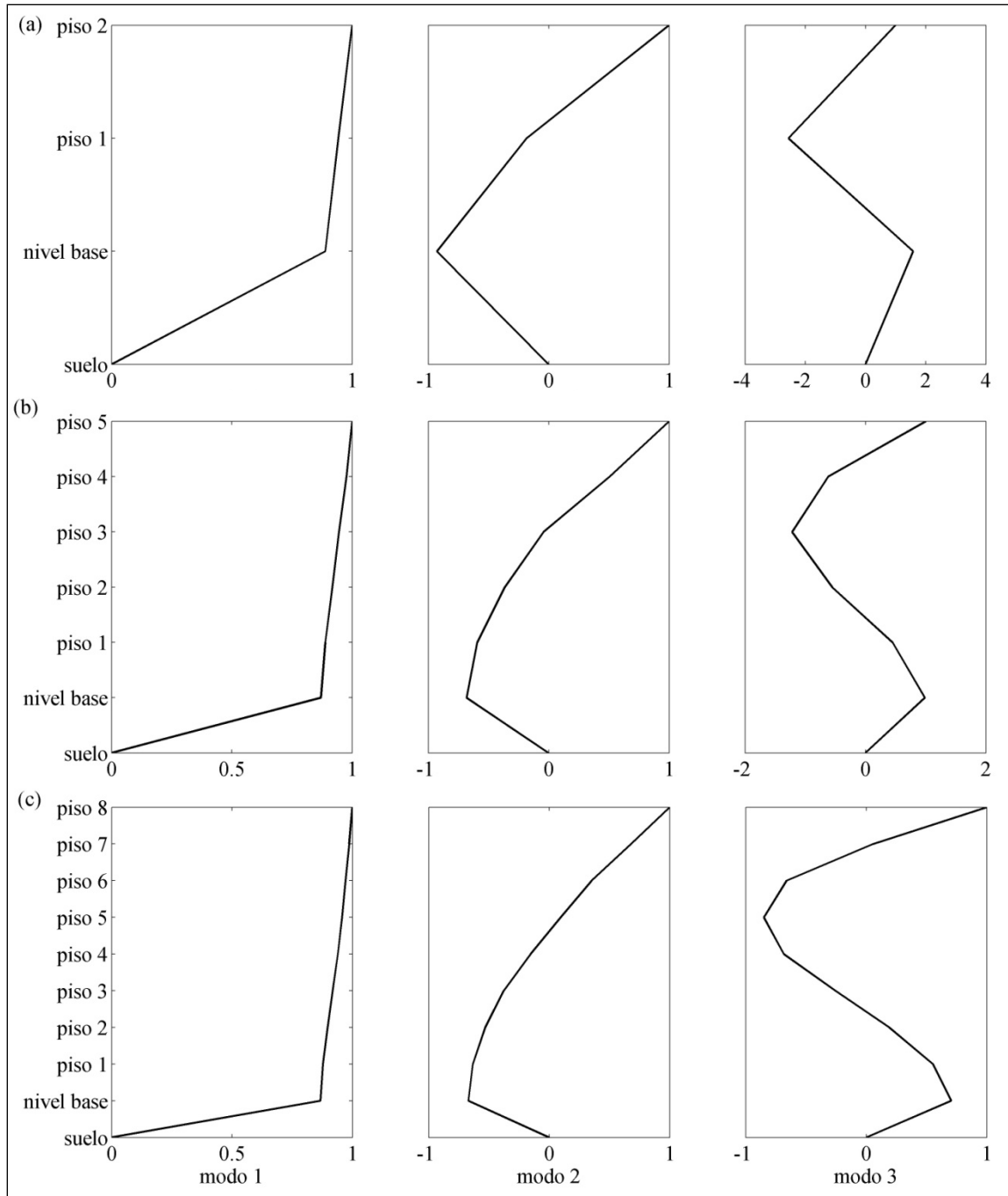


Figura 2-10 Estructuras diseñadas para las excitaciones de fuente Lejana: Formas modales. a) marco de 2 pisos; b) marco de 5 pisos; y c) marco de 8 pisos.

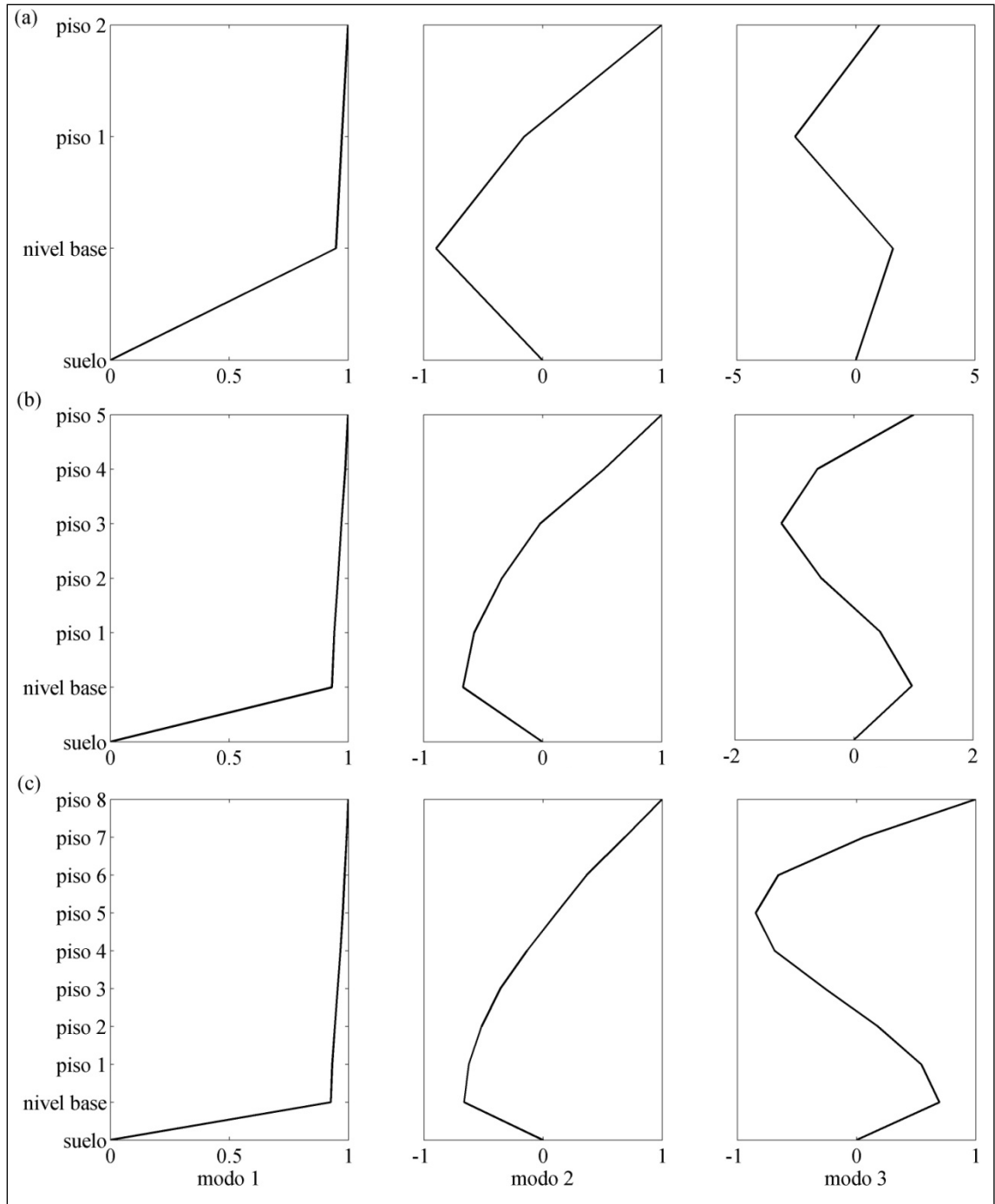


Figura 2-11 Estructuras diseñadas para las excitaciones de fuente Cercana I: Formas modales. a) marco de 2 pisos; b) marco de 5 pisos; y c) marco de 8 pisos.

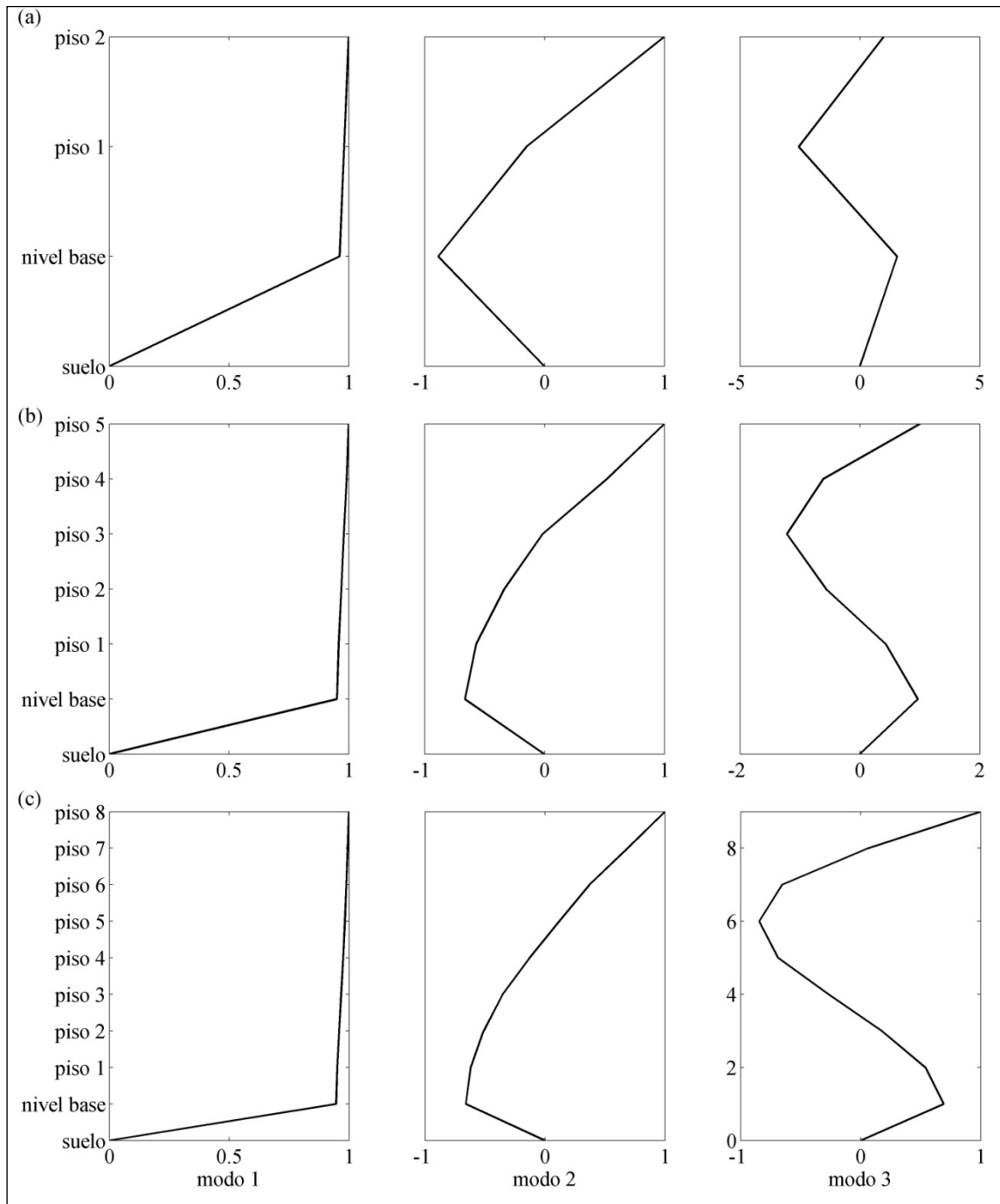


Figura 2-12 Estructuras diseñadas para las excitaciones de fuente Cercana II: Formas modales. a) marco de 2 pisos; b) marco de 5 pisos; y c) marco de 8 pisos.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS EXCITACIONES SÍSMICAS

En este estudio, tres conjuntos de mil registros sintéticos cada uno fueron generados. El primer grupo corresponde a registros representativos de sismos de fuente Lejana. El segundo y tercer grupo corresponden a registros representativos de movimientos sísmicos de fuente Cercana, también conocidos como impulsivos. Los registros del segundo y tercer grupo se denominan sismos de fuente Cercana I y fuente Cercana II, respectivamente.

3.1 Excitaciones de Fuente Lejana

Estas excitaciones son modeladas como un proceso aleatorio no estacionario, en el que la evolución de la función de densidad de potencia espectral está dada por:

$$S_{\ddot{u}_g}(t, \omega) = [f_e(t)]^2 S_g(\omega) \quad (3.1)$$

donde $S_g(\omega)$ es una función de densidad de potencia espectral estacionaria y $f_e(t)$ es una función de modulación del tiempo, la cual describe la evolución en el tiempo de la densidad de potencia espectral. Para esta última, la siguiente expresión es adoptada:

$$f_e(t) = a t^b e^{-c t} \quad (3.2)$$

donde:

$$a = \left(\frac{e}{\varepsilon T_D} \right)^b \quad (3.3)$$

$$b = - \frac{\varepsilon \ln \eta}{1 + \varepsilon (\ln \varepsilon - 1)} \quad (3.4)$$

$$c = \frac{b}{\varepsilon T_D} \quad (3.5)$$

en que T_D es el tiempo de duración del registro, y η y ε son constantes del modelo. Los valores: $T_D = 30 \text{seg}$, $\eta = 0.05$ y $\varepsilon = 0.20$ fueron adoptados en este estudio. Con estos parámetros la forma de la función $f_e(t)$ se indica en la Figura 3-1.

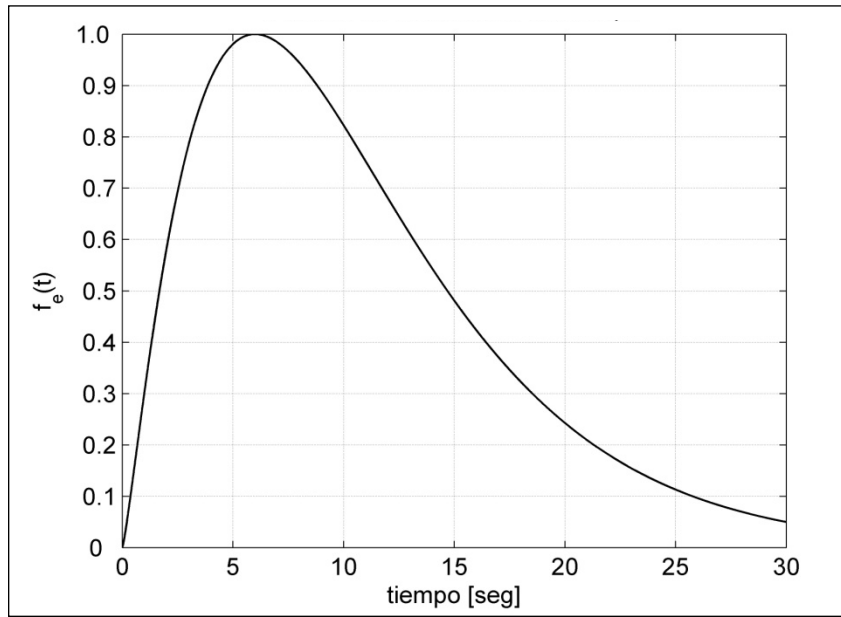


Figura 3-1 Función de modulación del tiempo $f_e(t)$ usada en este trabajo.

Por otro lado, la función de densidad de potencia espectral $S_g(\omega)$ está definida por el modelo de Kanai-Tajimi modificado, también conocido como modelo de Clough y Penzien (Clough & Penzien, 2003) y cuya expresión se indica en la Ecuación (3.6).

$$S_g(\omega) = \left[\frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_f^2 \omega^2 \omega_f^2} \right] \left[\frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega^2 \omega_g^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega^2 \omega_g^2} \right] S_0 \quad (3.6)$$

donde S_0 es un factor de intensidad de la excitación, ω_g y ξ_g son la frecuencia y amortiguamiento de un filtro que caracteriza básicamente al suelo (conocido como filtro de Kanai-Tajimi), y ω_f y ξ_f determinan la caída de la densidad espectral hacia un valor nulo en la zona de muy bajas frecuencias. Los valores $\omega_g = 12.5 \text{ rad/seg}$, $\xi_g = 0.60$, $\omega_f = 2 \text{ rad/seg}$, $\xi_f = 0.70$ y $S_0 = 200 \text{ cm}^2/\text{seg}^3$ fueron adoptados para el modelo. Con ellos, la forma de la función de densidad de potencia espectral se puede observar en la Figura 3-2.

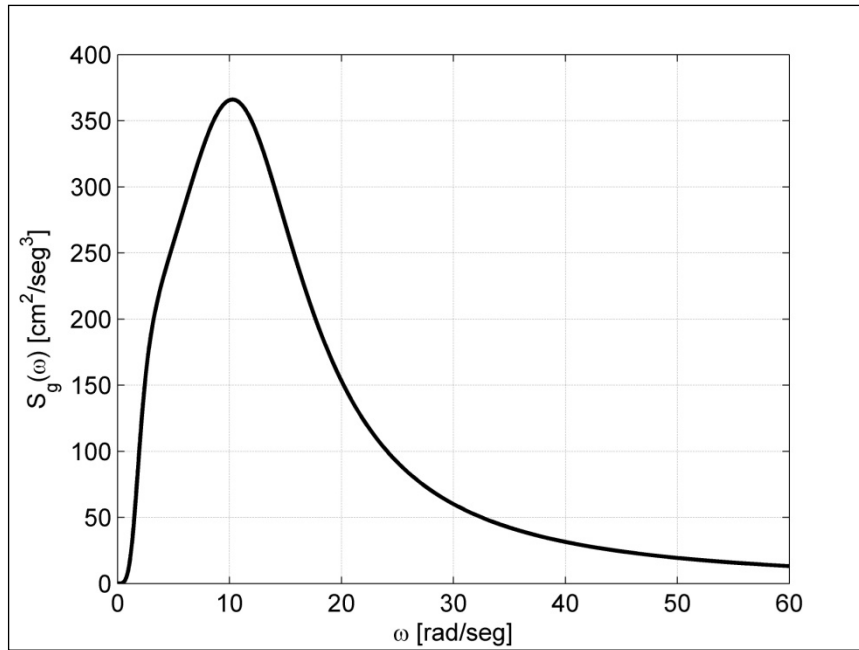


Figura 3-2 Función de densidad de potencia espectral del modelo de Kanai-Tajimi modificado usada en este trabajo.

En la Figura 3-2, la frecuencia dominante se alcanza en 10.27 rad/seg, que corresponde a un período de 0.61 seg.

Un intervalo adicional de 8 segundos de aceleración nula fue considerado luego del término de cada registro generado, esto con el fin de considerar el caso de vibración libre cuando el análisis en el tiempo sea realizado.

Como ilustración, en la Figura 3-3 se muestra un ejemplo de un registro sintético de fuente Lejana generado.

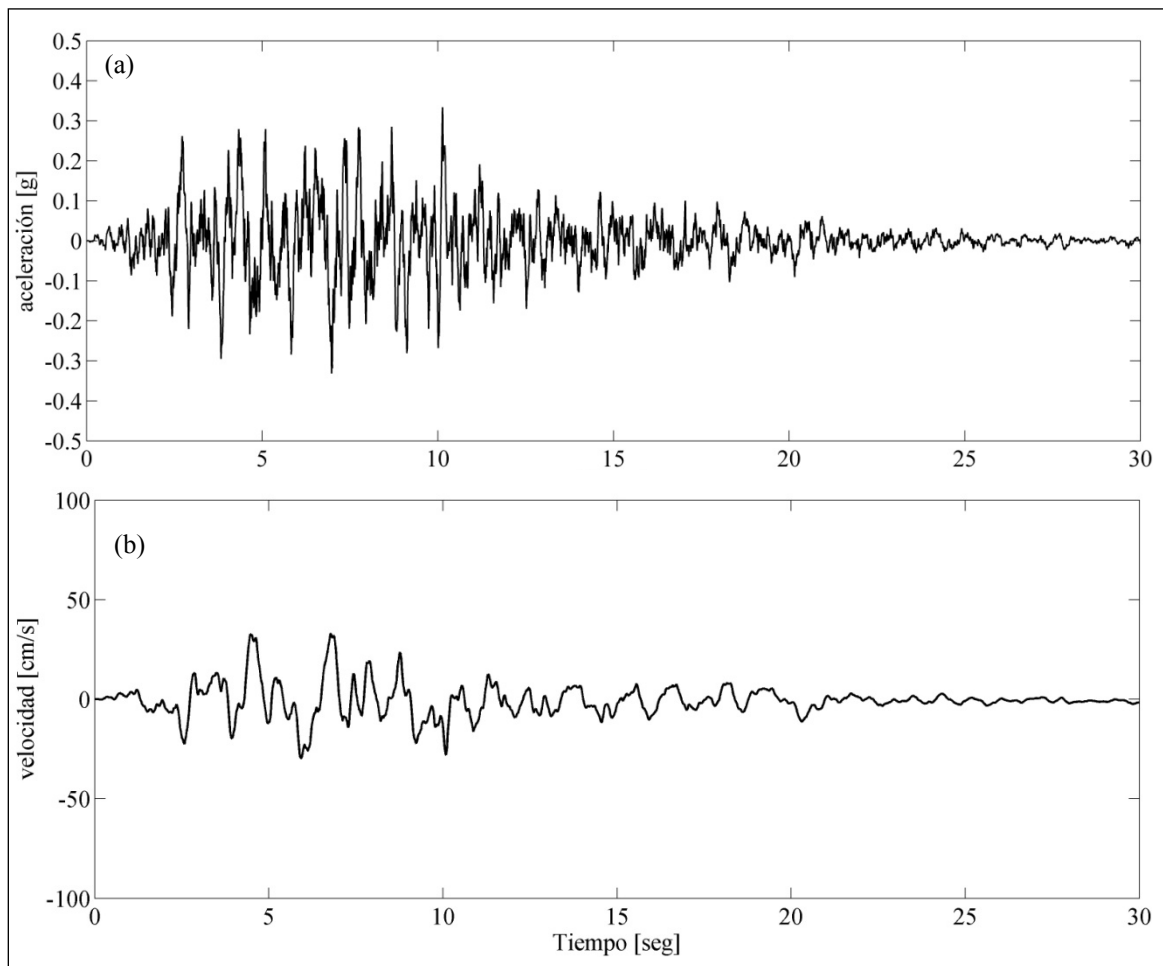


Figura 3-3 Registro sintético número 250; a) historia de aceleración; y b) historia de velocidad.

En la Figura 3-4 se muestra el módulo de la transformada de Fourier promedio de todas las realizaciones de fuente Lejana. Esta gráfica permite visualizar el contenido de

frecuencias promedio de los registros. El *peak* se alcanza para una frecuencia de 9.34 rad/seg. Lógicamente es un valor muy cercano al *peak* alcanzado en la función de densidad de potencia espectral usada en este trabajo.

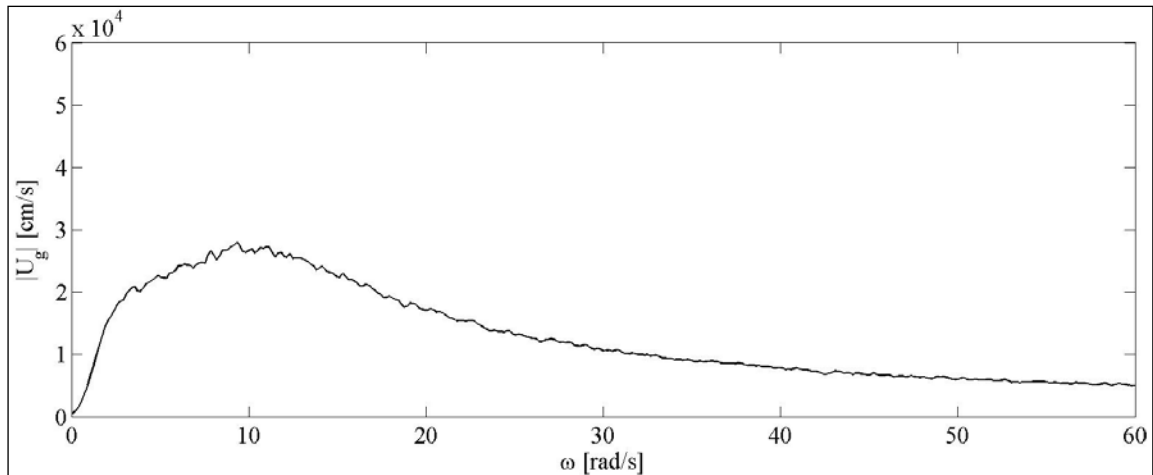


Figura 3-4 Contenido de frecuencias promedio de las excitaciones de fuente Lejana.

Los registros de fuente Lejana generados tienen un valor del *PGA* promedio igual a 363.26 cm/s^2 .

3.2 Excitaciones de Fuente Cercana

Los devastadores efectos de los sismos de carácter impulsivo, tales como Northridge, California (1994), Kobe, Japón (1995), Izmit, Turkía (1999), entre otros, y la obtención de registros sísmicos de ellos, hicieron que los sismos de fuente Cercana o impulsivos empiecen a ser caracterizados y considerados en el diseño sísmico de estructuras.

Se sabe que los registros de tipo impulsivo tienen su principal contenido de frecuencias en valores relativamente bajos, provocando así cierta susceptibilidad de daño en estructuras de período largo. En este contexto, resulta interesante evaluar las características de la respuesta de aceleración de piso en estructuras aisladas sometidas a inputs sísmicos de tipo impulsivos característicos de sismos de fuente Cercana.

Jangid y Kelly (2001) estudiaron el efecto del amortiguamiento en el desempeño de estructuras con distintos tipos de sistemas de aislación basal sometidas a registros sísmicos de fuente Cercana. El estudio indica que los sistemas de aislación de base logran un buen desempeño ante este tipo de sismos y que existe un valor del amortiguamiento del sistema de aislación para el cual las aceleraciones en la superestructura alcanzan un valor mínimo, por tanto, variaciones en tal amortiguamiento podrían causar un incremento en las aceleraciones de piso. Aunque este no es un aspecto abordado en el presente trabajo, interesa caracterizar, de manera cualitativa los efectos de la respuesta de aceleración de piso de estructuras aisladas bajo la acción de terremotos de fuente Cercana.

En este estudio, los registros sintéticos de fuente Cercana son generados a partir del procedimiento indicado por Mavroeidis y Papageorgiou (2003). Dos tipos de registros de campo cercano son considerados: fuente Cercana I y fuente Cercana II; para los primeros, un pulso en la historia de velocidad de forma de media senoide es usado, y para los segundos, un impulso de velocidad de forma sinusoidal completa es considerado. El valor de la amplitud del pulso de velocidad fue adoptado igual a 100 cm/seg. Mil registros para cada tipo fueron generados.

Como ilustración, en la Figura 3-5 y en la Figura 3-6 se muestra un ejemplo de un registro impulsivo de cada fuente generado con el procedimiento indicado.

Se mencionó que una de las características principales de los sismos impulsivos es que tienen sus principales contenidos de frecuencias en períodos relativamente largos, entonces es interesante conocer el contenido de frecuencias de mayor energía de los registros generados. En la Figura 3-7 se muestran los promedios de los módulos de la transformada de Fourier de los mil registros de fuente Cercana (I y II) generados. Este módulo permite visualizar los contenidos de frecuencias de la excitación sísmica. En esta figura se observa que para los registros de fuente Cercana I, el principal contenido de frecuencias se alcanza en $\omega=4.88\text{rad/seg}$, equivalente a un período de 1.29 seg, y

para la fuente Cercana II se alcanza en $\omega=4.05rad/seg$, correspondiente a un período de 1.55 seg. Se confirma de esta manera que el principal contenido de frecuencia de este tipo de registros ocurre en períodos relativamente largos, en comparación con los registros de fuente Lejana generados, en los que el principal contenido de frecuencias ocurre en 0.67 seg (Figura 3-4).

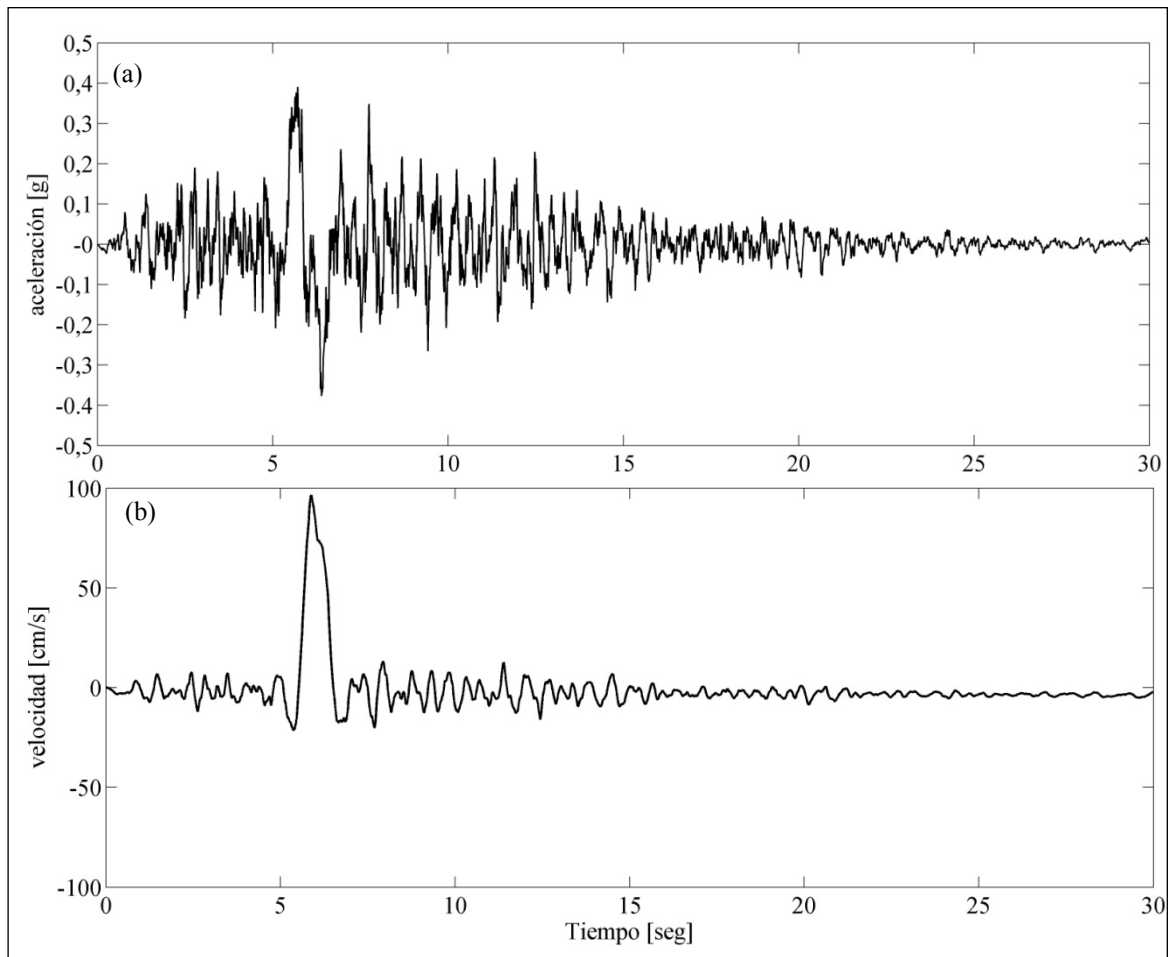


Figura 3-5 Registro sintético de fuente Cercana I número 480; a) historia de aceleración; y b) historia de velocidad

Comparando la Figura 3-4 y Figura 3-7 se puede observar que los registros de fuente Cercana tienen un *peak* mejor definido comparado con los registros de fuente Lejana. Esto hace prever que cuando los espectros de piso sean generados para las historias de

aceleración de las excitaciones de fuente Cercana, un *peak* local en períodos de aproximadamente 1.29s y 1.55s para fuente Cercana I y II respectivamente, pueden ocurrir.

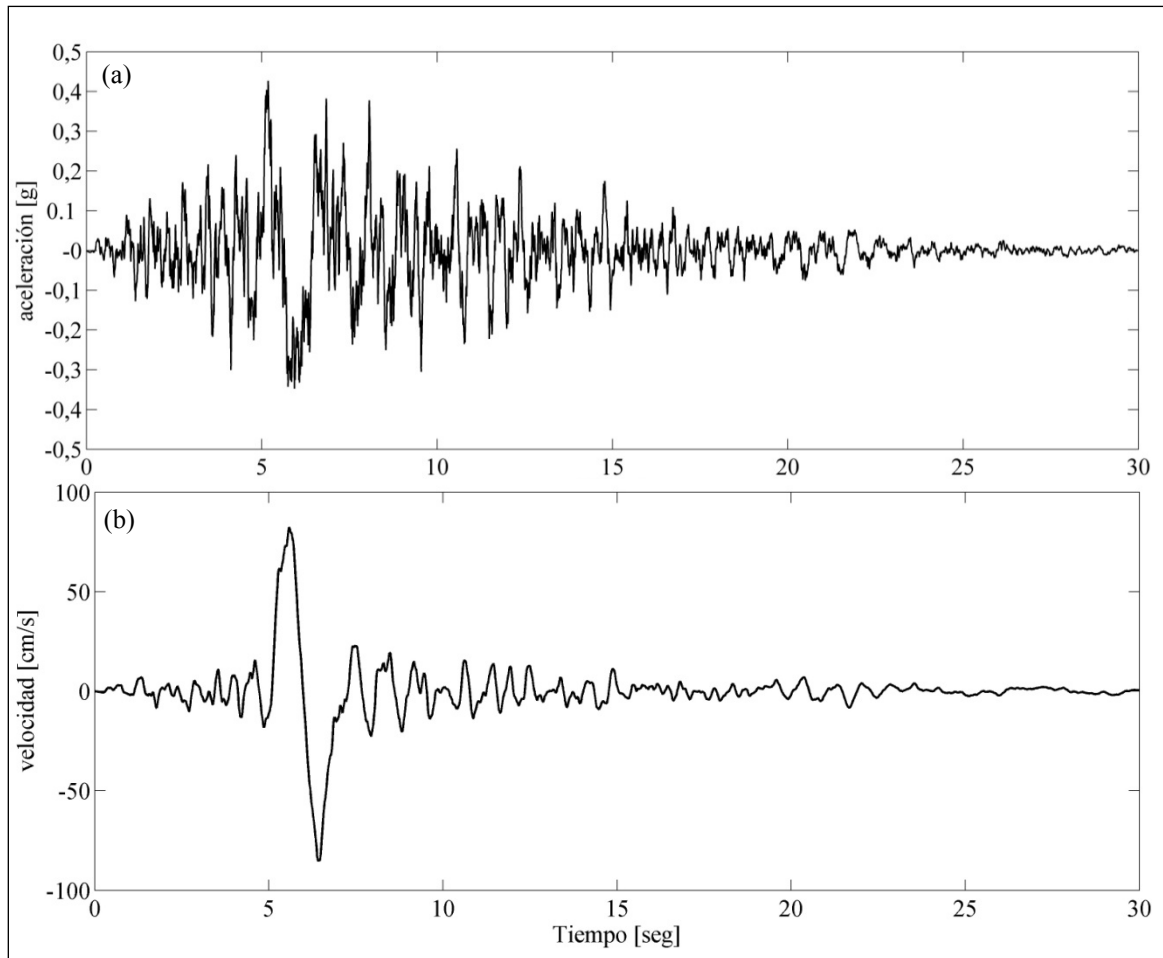


Figura 3-6 Registro sintético de fuente Cercana II número 862; a) historia de aceleración; y b) historia de velocidad

Finalmente, valores del *PGA* iguales a 467.12 cm/s^2 y 489.92 cm/s^2 se obtuvieron como promedio de los registros de fuente Cercana I y fuente Cercana II, respectivamente.

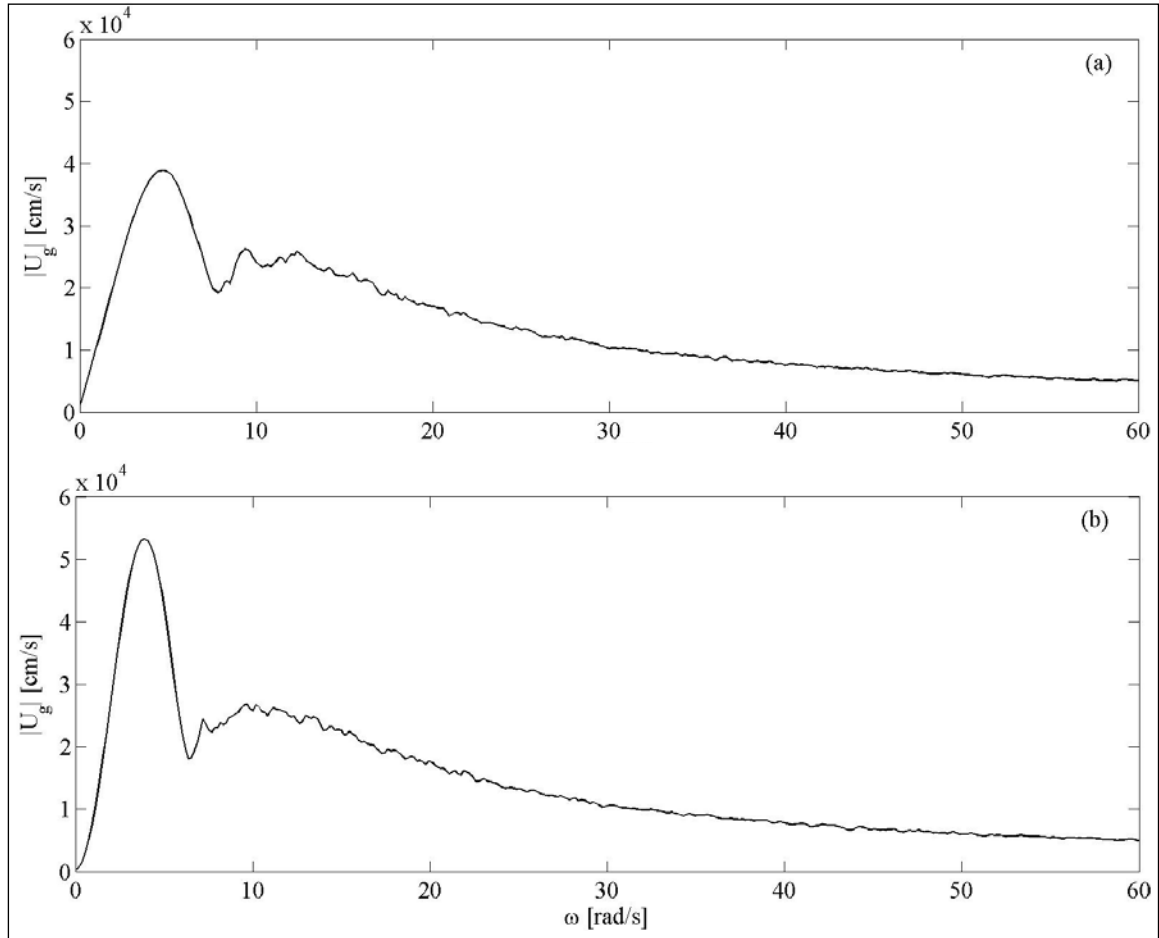


Figura 3-7 Contenido de frecuencias promedio: a) excitaciones de fuente Cercana I; y b) excitaciones de fuente Cercana II.

En la Figura 3-8 se muestran los espectros de respuesta de pseudo-aceleración promedio para todos los registros generados en este capítulo.

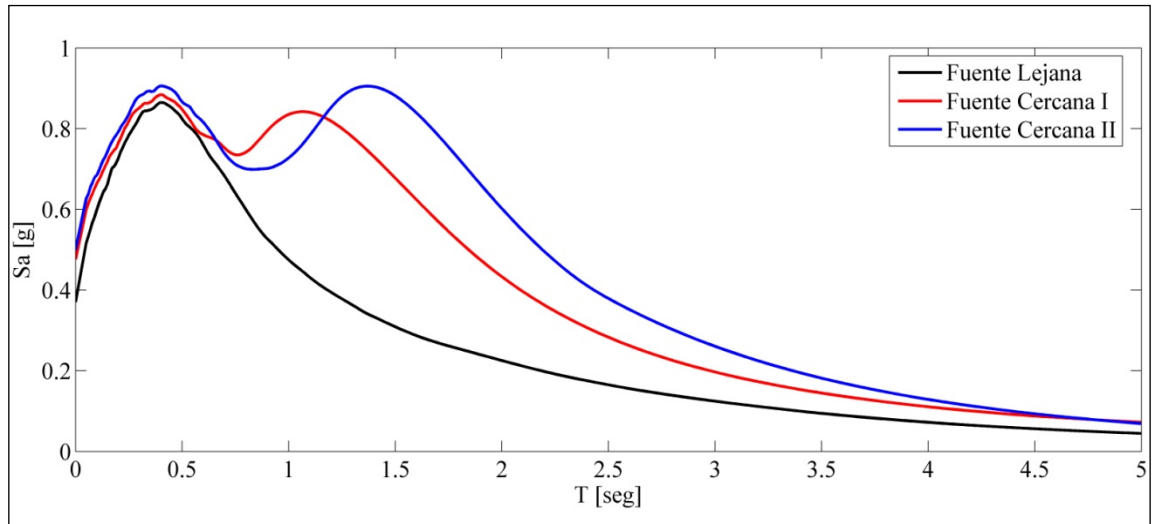


Figura 3-8 Espectros de respuesta promedio de las excitaciones de fuente Lejana y Cercana. Amortiguamiento = 0.05.

4. RESPUESTA DE ACELERACIÓN ABSOLUTA DE EDIFICIOS CON AISLACIÓN SÍSMICA DE BASE

En este capítulo, el procedimiento denominado Método de Espectro de Respuesta de Piso, descrito brevemente en la Sección 1.1, es utilizado para caracterizar la respuesta de aceleración absoluta en los sistemas estructurales descritos en el Capítulo 2. El procedimiento asume que la masa del elemento no estructural es lo suficientemente pequeña como para que no se produzca interacción dinámica entre el elemento no estructural y la estructura soportante. De esta manera, es posible analizar los dos sistemas (el sistema soportante y el elemento no estructural) de forma independiente.

4.1 Descripción del Procedimiento de Análisis

El Método del Espectro de Respuesta de Piso supone la realización de un análisis tiempo historia (lineal o no lineal según corresponda) para obtener las historias de las aceleraciones de piso en la estructura soportante. Conocidas estas historias, es posible evaluar el valor del *PFA* en cada piso de la estructura. Si se asume que los elementos no estructurales pueden ser modelados como sistemas de 1 GDL, es posible también caracterizar, mediante un espectro de piso, la amplificación o de-amplificación de las aceleraciones en tales elementos en función de su período fundamental y nivel de amortiguamiento.

En este estudio, los tres conjuntos de mil registros sintéticos generados en el Capítulo 3 fueron aplicados a todos los sistemas estructurales descritos en el Capítulo 2. La respuesta de cada sistema estructural a todos los registros sintéticos fue evaluada mediante análisis tiempo historia. La respuesta de interés en este estudio es la respuesta de aceleración absoluta en cada piso de cada sistema estructural. En total, se realizaron 18000 análisis tiempo historia, y se obtuvieron 324000 historias de aceleraciones de piso. Se consideró que el valor de la respuesta de cada sistema estructural a cada

excitación sísmica es el valor promedio de los valores obtenidos para cada registro sintético.

Aunque se trata de un proceso que demanda gran esfuerzo computacional, es una tarea necesaria para caracterizar de manera apropiada las demandas de aceleración en los elementos no estructurales contenidos en estructuras con aislación sísmica de base.

Para la integración de las ecuaciones de equilibrio dinámico de los sistemas estructurales (ecuaciones (2.19) y (2.25)) se usó la formulación de espacio estado descrita en Inaudi & De la Llera (1992). Para la solución de la ecuación diferencial de primer orden que involucra el método se usó el integrador *ode15s* de MATLAB (The MathWorks, 2004).

4.2 Descripción de Resultados

En la Tabla 4-1 a la Tabla 4-3 se muestran los desplazamientos laterales del nivel base, tanto los de diseño (D_D) como los obtenidos del análisis tiempo historia.

Para las excitaciones de fuente Lejana (Tabla 4-1), se observa una relativa buena correlación entre los valores del desplazamiento de diseño y los obtenidos a partir de las simulaciones numéricas

Tabla 4-1 Desplazamientos del nivel base (excitación de fuente Lejana).

	marco de 2 pisos	marco de 5 pisos	marco de 8 pisos
Diseño (D_D)	6.61 cm	6.40 cm	6.62 cm
Análisis tiempo historia (Sistemas Lineales)	7.23 cm	7.00 cm	7.15 cm
Análisis tiempo historia (Sistemas no lineales)	7.48 cm	7.61 cm	7.68 cm

Tabla 4-2 Desplazamientos del nivel base (excitación de fuente Cercana I).

	marco de 2 pisos	marco de 5 pisos	marco de 8 pisos
Diseño (D_D)	19.59 cm	21.59 cm	21.59 cm
Análisis tiempo historia (Sistemas Lineales)	25.36 cm	28.00 cm	27.95 cm
Análisis tiempo historia (Sistemas no lineales)	28.86 cm	31.01 cm	31.00 cm

Tabla 4-3 Desplazamientos del nivel base (excitación de fuente Cercana II).

	marco de 2 pisos	marco de 5 pisos	marco de 8 pisos
Diseño (D_D)	26.29 cm	28.53 cm	28.53 cm
Análisis tiempo historia (Sistemas Lineales)	39.27 cm	41.29 cm	41.26 cm
Análisis tiempo historia (Sistemas no lineales)	47.48 cm	47.73 cm	47.73 cm

En contraste, en la Tabla 4-2 y en la Tabla 4-3 se observan diferencias importantes entre los valores del desplazamiento de diseño y los valores obtenidos del análisis tiempo historia. Las diferencias alcanzan, en promedio, valores de 30% y 46% para las excitaciones de fuente Cercana I y fuente Cercana II, respectivamente. En ambos casos, el diseño subestima los desplazamientos indicados por el análisis tiempo historia.

En la Figura 4-1 se muestra la relación entre las ordenadas del espectro de respuesta de la excitación (5% de amortiguamiento) y las ordenadas espectrales correspondientes a otros valores de amortiguamiento. Esta relación se denomina B_D en la norma NCh2745. En la Figura 4-1 (I) se muestran los valores empíricos de B_D en función del valor del período natural. En la Figura 4-1 (II) se muestran los valores promedio de B_D considerando el rango de períodos comprendido entre 0.5 seg y 5.0 seg, y los valores de B_D proporcionados por la norma NCh2745. En la Figura 4-1 (I) se observa claramente

que el valor del factor B_D es dependiente no solamente del nivel de amortiguamiento sino también del período. En el caso de los registros de fuente Lejana (Figura 4-1 (I-a)) la norma NCh2745 proporciona una estimación razonable del valor empírico de dicho factor. En el caso de los registros de fuente Cercana (Figura 4-1 (b) y (c)), errores importantes pueden ocurrir en la estimación del factor B_D cuando las expresiones de la norma referida son aplicadas. En todos los casos, las estimaciones del coeficiente B_D para rangos de amortiguamiento típicos de sistemas de aislación (5% a 40%) subestiman los desplazamientos de diseño.

En la Tabla 4-4 a Tabla 4-6 se muestran valores del desplazamiento de diseño (D_D) calculados teniendo en cuenta los valores empíricos de B_D . En estas tablas, C_D es el coeficiente sísmico de desplazamiento de diseño correspondiente a un amortiguamiento de 0.05. Comparando los valores del desplazamiento de diseño re-calculados (Tabla 4-5 y Tabla 4-6) con los valores obtenidos del análisis tiempo historia (Tabla 4-2 y Tabla 4-3), se observa que son muy similares. De esta manera se justifica claramente el origen de la discrepancia entre los valores de desplazamiento de diseño calculados según lo indicado en la norma NCh2745 y los obtenidos del análisis tiempo historia. Está claro que cuando registros de tipo impulsivos son considerados en el análisis y diseño estructural, valores del parámetro B_D específicos para tales registros son necesarios para estimar de manera razonable el valor de D_D .

En el resto de esta sección, las aceleraciones de piso obtenidas de los análisis tiempo historia se presentan según el tipo de comportamiento del sistema estructural (lineal o no lineal) y según el tipo de excitación (de fuente Lejana o fuente Cercana). Todos los espectros de piso fueron calculados considerando un amortiguamiento igual a 0.05.

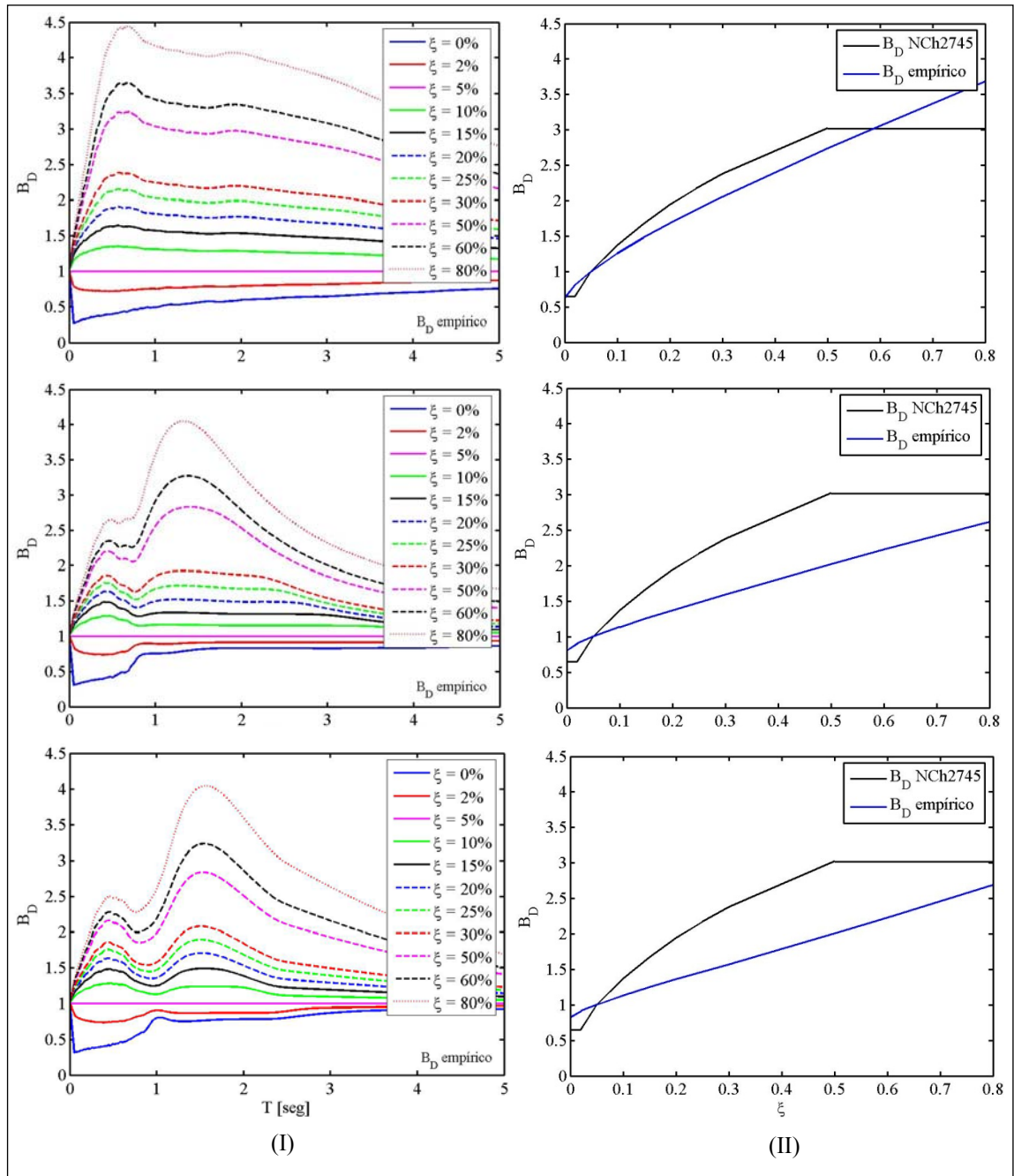


Figura 4-1 Valores del factor B_D : I) valores empíricos: II) valores promedio; a) Excitación de fuente Lejana; b) Excitación de fuente Cercana I; y c) Excitación de fuente Cercana II.

Tabla 4-4 Desplazamientos de diseño obtenidos con el factor B_D empírico (excitación de fuente Lejana).

	marco de 2 pisos	marco de 5 pisos	marco de 8 pisos
$Sa (\xi = 0.05; T=T_D)$	0.334 g	0.322 g	0.312 g
$Sa (\xi=\beta_{eff}; T=T_D)$	0.150 g	0.132 g	0.127 g
$B_{D, \text{empírico}}$	2.23	2.44	2.46
$B_{D, \text{NCh2745}}$	2.46	2.59	2.61
$D_D = C_D/B_{D, \text{empírico}}$	7.27 cm	6.79 cm	7.03 cm

Tabla 4-5 Desplazamientos de diseño obtenidos con el factor B_D empírico (excitación de fuente Cercana I).

	marco de 2 pisos	marco de 5 pisos	marco de 8 pisos
$Sa (\xi = 0.05; T=T_D)$	0.379 g	0.418 g	0.418 g
$Sa (\xi=\beta_{eff}; T=T_D)$	0.221 g	0.272 g	0.272 g
$B_{D, \text{empírico}}$	1.72	1.54	1.54
$B_{D, \text{NCh2745}}$	2.22	2.00	2.00
$D_D = C_D/B_{D, \text{empírico}}$	25.35 cm	28.12 cm	28.12 cm

Tabla 4-6 Desplazamientos de diseño obtenidos con el factor B_D empírico (excitación de fuente Cercana II).

	marco de 2 pisos	marco de 5 pisos	marco de 8 pisos
$Sa (\xi = 0.05; T=T_D)$	0.373 g	0.407 g	0.407 g
$Sa (\xi=\beta_{eff}; T=T_D)$	0.249 g	0.287 g	0.287 g
$B_{D, \text{empírico}}$	1.50	1.42	1.42
$B_{D, \text{NCh2745}}$	2.24	2.06	2.06
$D_D = C_D/B_{D, \text{empírico}}$	39.34 cm	41.45 cm	41.45 cm

4.2.1 Aceleraciones de Piso en Estructuras con Sistemas Lineales de Aislación

4.2.1.1 Respuesta a la Excitación de Fuente Lejana

A fines ilustrativos, en la Figura 4-2 puede observarse la respuesta de la estructura de 2 pisos a una realización de la excitación de fuente Lejana, y en la Figura 4-3 pueden observarse ejemplos de espectros de piso.

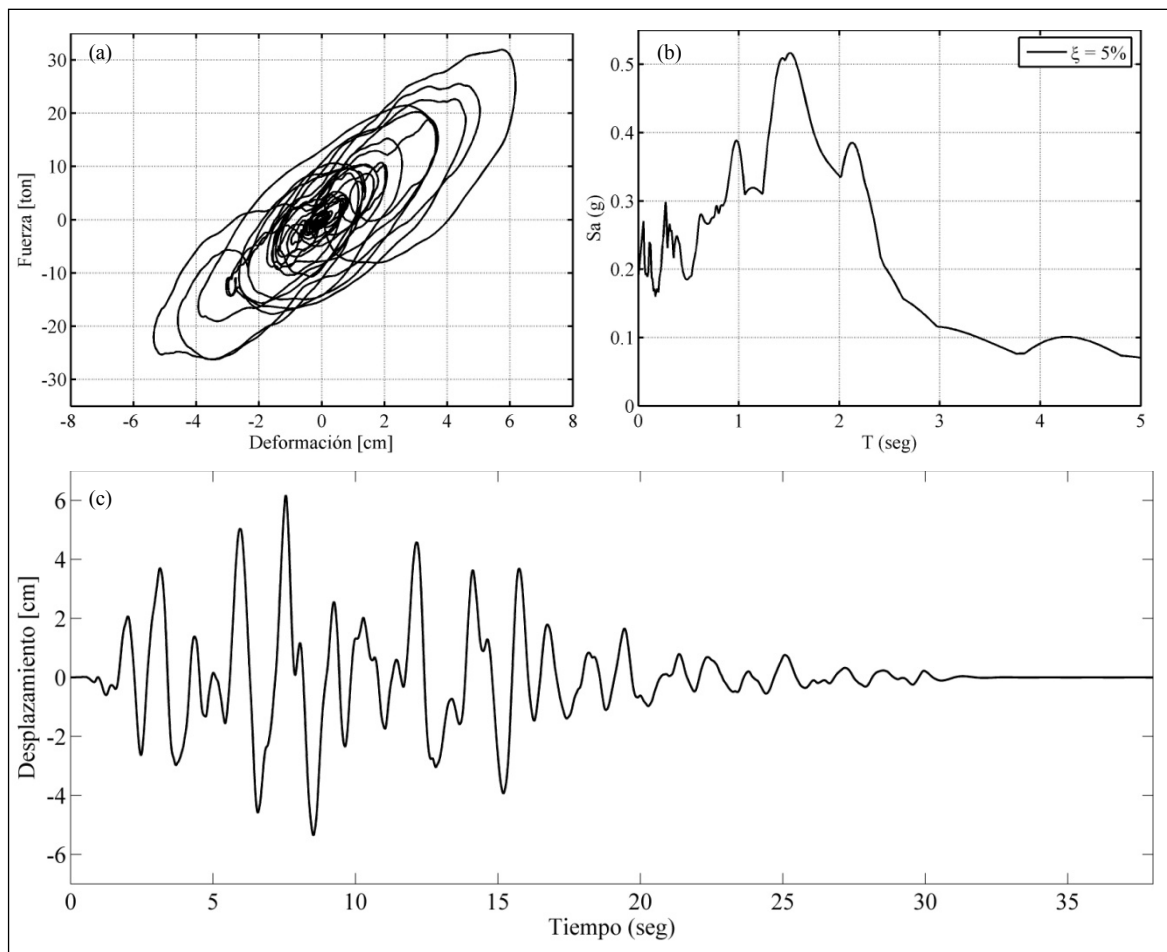


Figura 4-2 Respuesta de la estructura de 2 pisos (sistema de aislación lineal) al registro sintético de fuente Lejana nro. 450: a) historia fuerza–deformación del sistema de aislación; b) espectro de piso del nivel base; y c) historia del desplazamiento del nivel base.

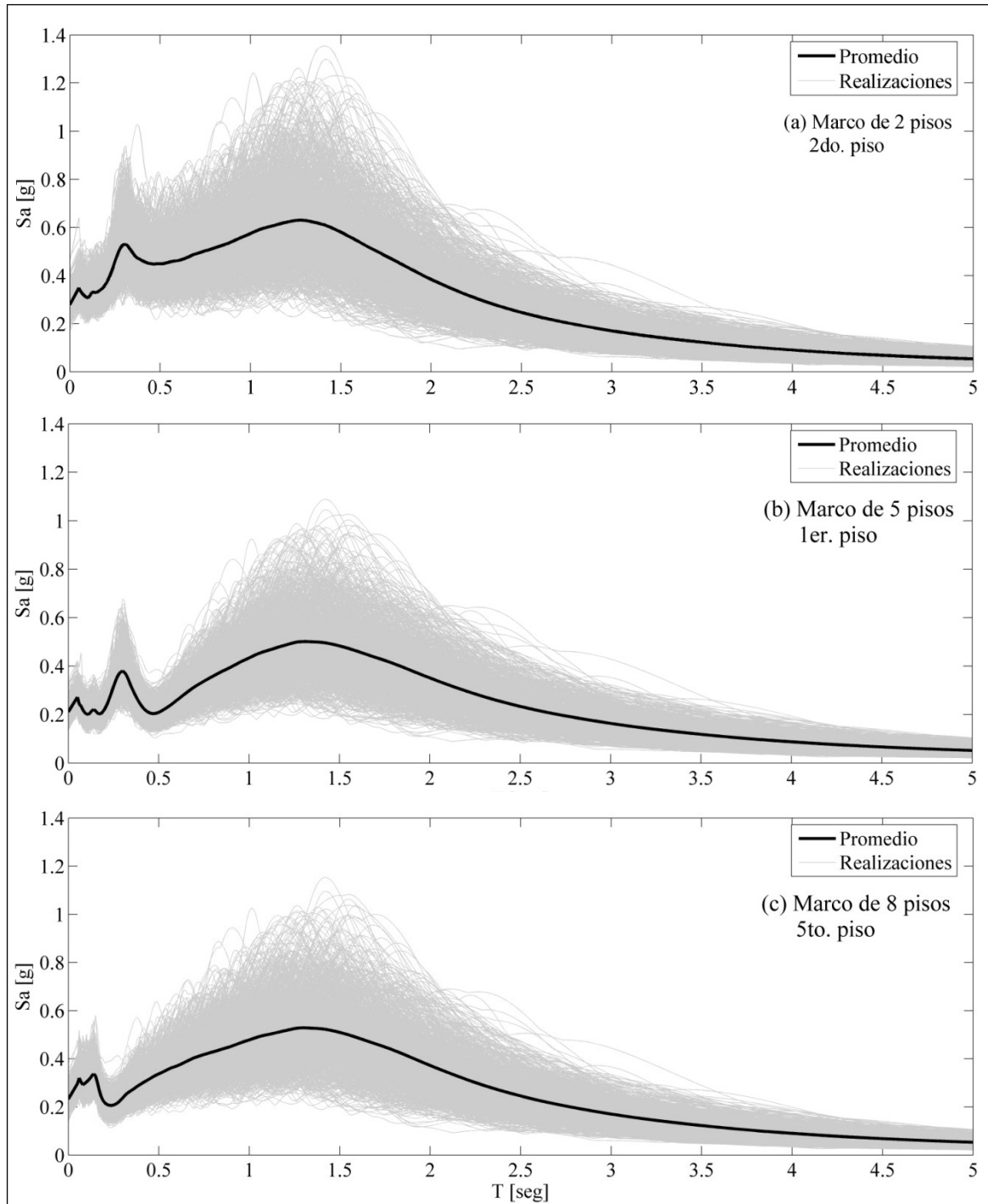


Figura 4-3 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: ejemplos de espectros de piso (amortiguamiento=0.05).

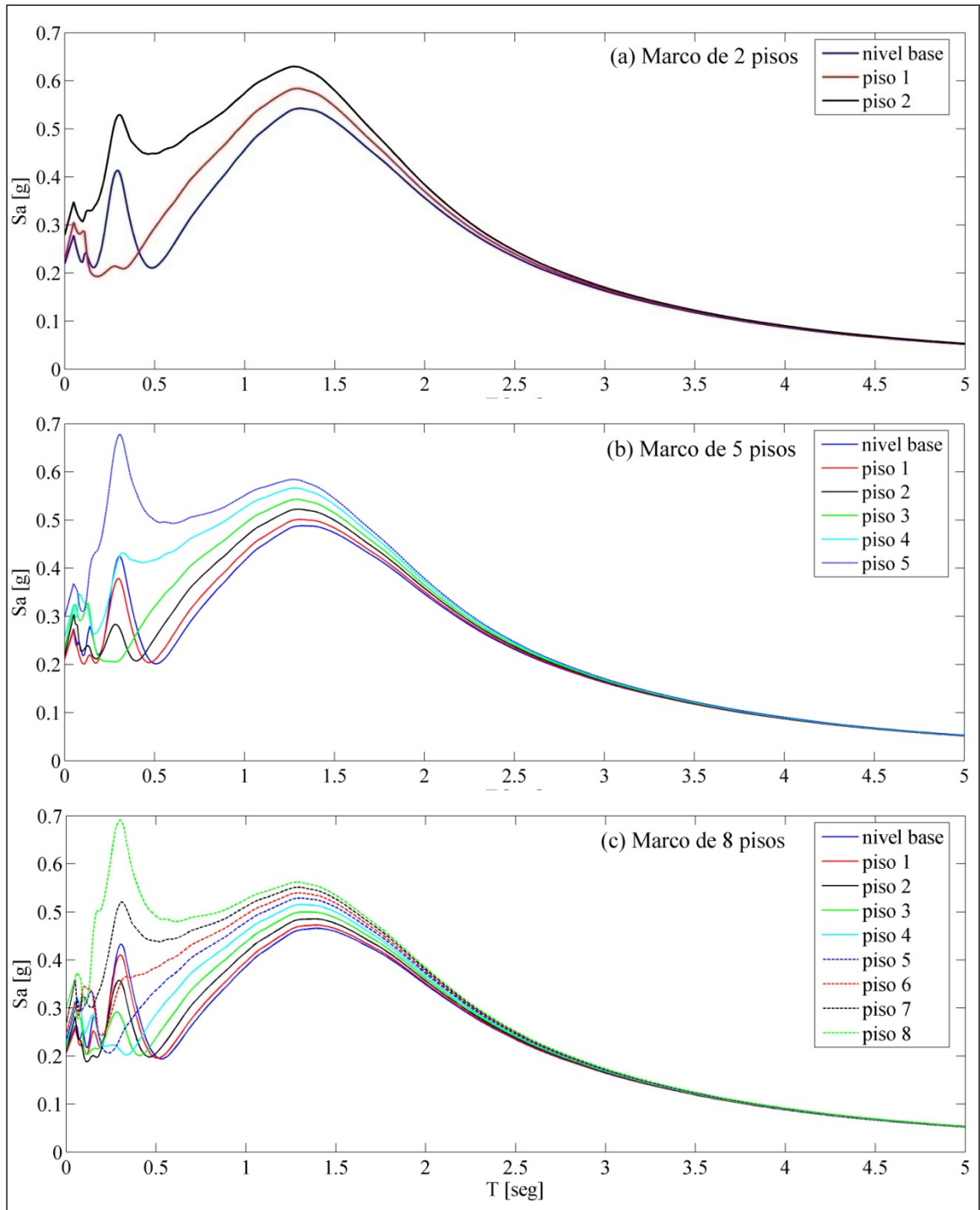


Figura 4-4 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana (amortiguamiento=0.05).

En la Figura 4-4 se muestran los espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Se notan diferencias importantes entre las ordenadas espectrales de cada piso en la zona de los modos superiores, sobre todo en la zona del segundo período modal. Para períodos de elementos no estructurales ubicados a la derecha de la zona del período fundamental de la estructura, las ordenadas espectrales son esencialmente iguales en todos los pisos. Otra observación importante se refiere al hecho de que las ordenadas espectrales en la zona del segundo período modal pueden, en algunos casos, ser mayores que las ordenadas espectrales en la zona del período fundamental. En todos los casos, se advierte que en los pisos intermedios las ordenadas espectrales en la zona del segundo período modal son mucho menores que aquéllas correspondientes a los pisos inferiores y superiores, observación que es consistente con el hecho de que la amplitud de la segunda forma modal en los pisos intermedios (Figura 2-10) es mucho menor que la amplitud de la misma forma modal en los demás pisos (inferiores y superiores).

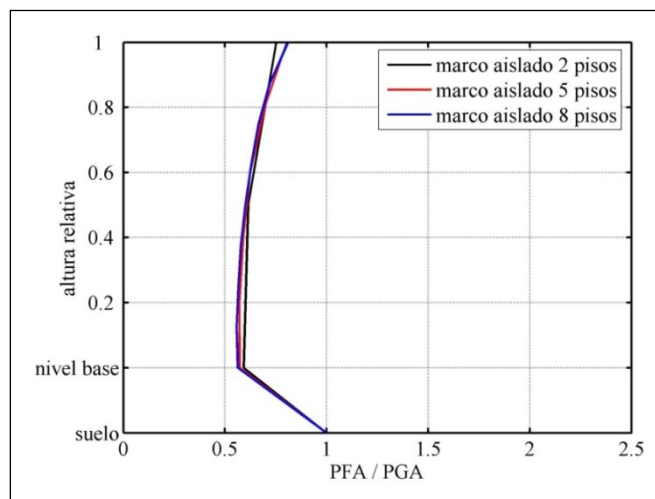


Figura 4-5 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: valores de la relación PFA/PGA .

En la Figura 4-5 se muestran los valores del PFA de todas las estructuras, normalizados por el valor del PGA . En general, los valores de la relación PFA/PGA son muy similares

en las tres estructuras analizadas, y son siempre menores que la unidad (en otras palabras, los valores del *PFA* son siempre menores que el valor de *PGA*).

4.2.1.2 Respuesta a las Excitaciones de Fuente Cercana

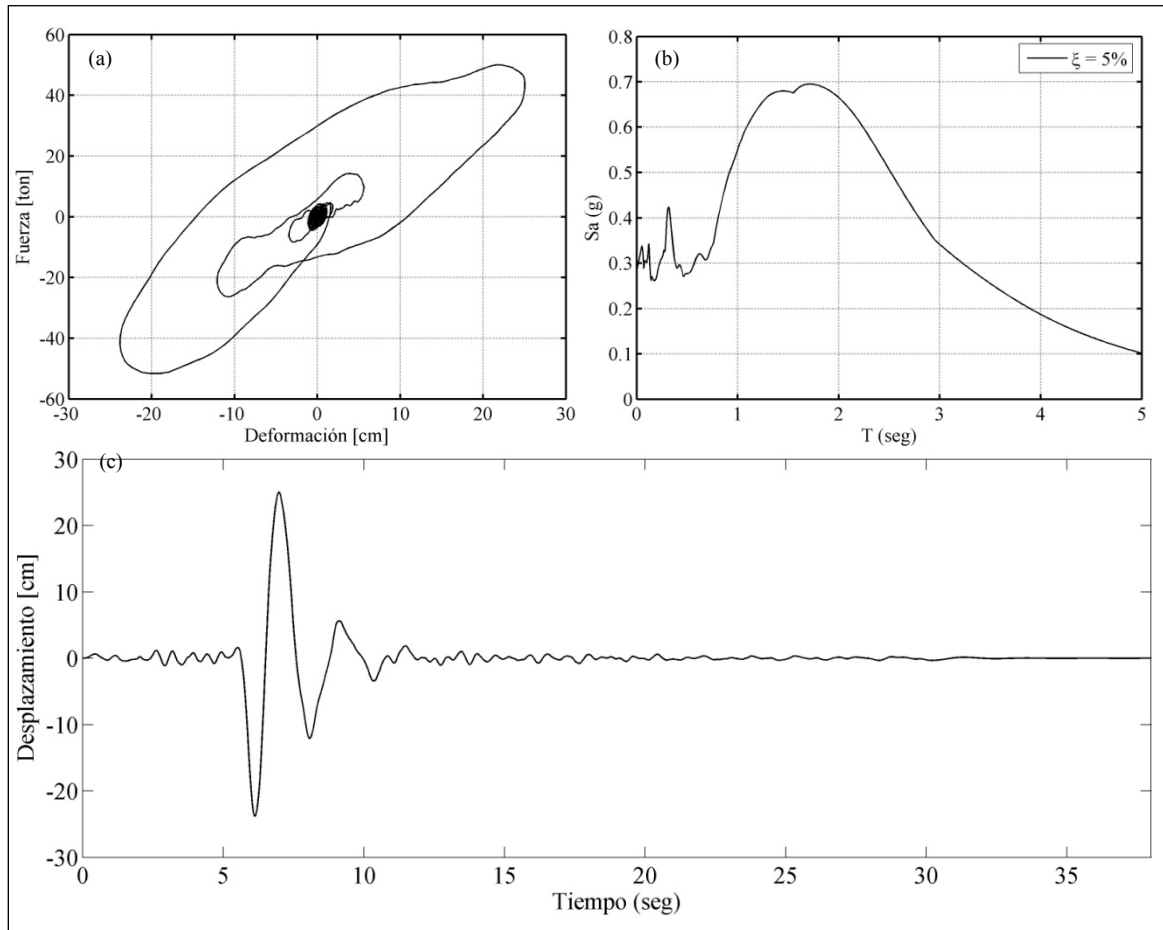


Figura 4-6 Respuesta de la estructura de 2 pisos (sistema de aislación lineal) al registro sintético de fuente Cercana I nro. 580: a) historia fuerza–deformación del sistema de aislación; b) espectro de piso del nivel base; y c) historia del desplazamiento del nivel base.

A fines ilustrativos, en la Figura 4-6 puede observarse la respuesta de la estructura de 2 pisos a una realización de la excitación de fuente Cercana I, y en la Figura 4-7 puede observarse la respuesta de la misma estructura a una realización de la excitación de fuente Cercana II. En la Figura 4-8 y en la Figura 4-9 pueden observarse ejemplos de espectros de piso.

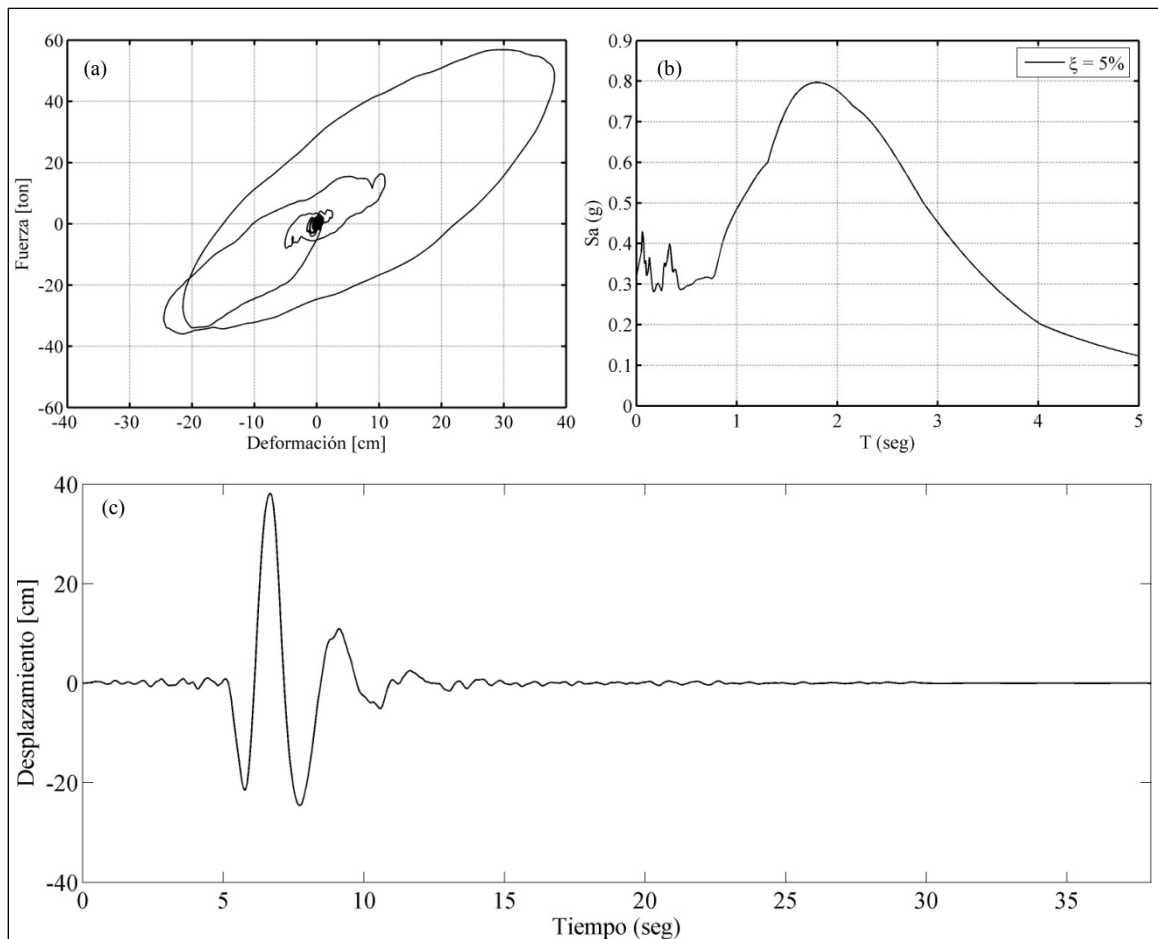


Figura 4-7 Respuesta de la estructura de 2 pisos (sistema de aislación lineal) al registro sintético de fuente Cercana II nro. 872: a) historia fuerza–deformación del sistema de aislación; b) espectro de piso del nivel base; y c) historia del desplazamiento del nivel base.

En la Figura 4-8 y en la Figura 4-9 puede observarse que la dispersión de las ordenadas espectrales es mucho menor que la observada en el caso de la excitación de fuente Lejana (Figura 4-3). En la Figura 4-10 consistentemente se observa que la desviación estándar de las ordenadas espectrales correspondientes a la excitación de fuente Lejana es mayor que la desviación estándar de las ordenadas espectrales correspondientes a las excitaciones de fuente Cercana en todo el rango de períodos considerado, siendo esta característica más significativa en la zona del período fundamental de la estructura. El valor de las ordenadas de una función de densidad de probabilidad es una medida del grado de dispersión de la correspondiente variable aleatoria. Un menor valor de estas ordenadas indica mayor dispersión de la variable. En la Figura 4-11 se muestran ejemplos de funciones de densidad de probabilidad de ordenadas espectrales, evaluadas numéricamente a partir de los resultados obtenidos de los análisis tiempo historia.

En la Figura 4-12 y en la Figura 4-13 se muestran los espectros de piso correspondientes a los registros de fuente Cercana I y II, respectivamente. En general, no existe una significativa variación entre las ordenadas espectrales de cada piso. Similar a lo observado en el caso de registros de fuente Lejana, para períodos de elementos no estructurales ubicados a la derecha de la zona del período fundamental de la estructura, las ordenadas espectrales son esencialmente iguales en todos los pisos. En contraste con lo observado en el caso de registros de fuente Lejana, en cambio, se advierte que en todos los pisos las ordenadas espectrales en la zona del segundo período modal de la estructura son siempre menores que aquéllas correspondientes a la zona del período fundamental. Adicionalmente, en los espectros de piso mostrados en la Figura 4-12 y en la Figura 4-13 se observan dos máximos muy próximos entre sí. El primero de ellos se observa en la zona del período asociado a la componente impulsiva de la excitación. Tal como se mencionó en la Sección 3.2, los períodos asociados a las componentes impulsivas son iguales a 1.29 seg y 1.55 seg para las excitaciones de fuente Cercana I y II, respectivamente (Figura 3-7). El segundo máximo de los espectros corresponde, al igual que en el caso de las excitaciones de fuente Lejana, al efecto de amplificación en la zona del período fundamental de la estructura.

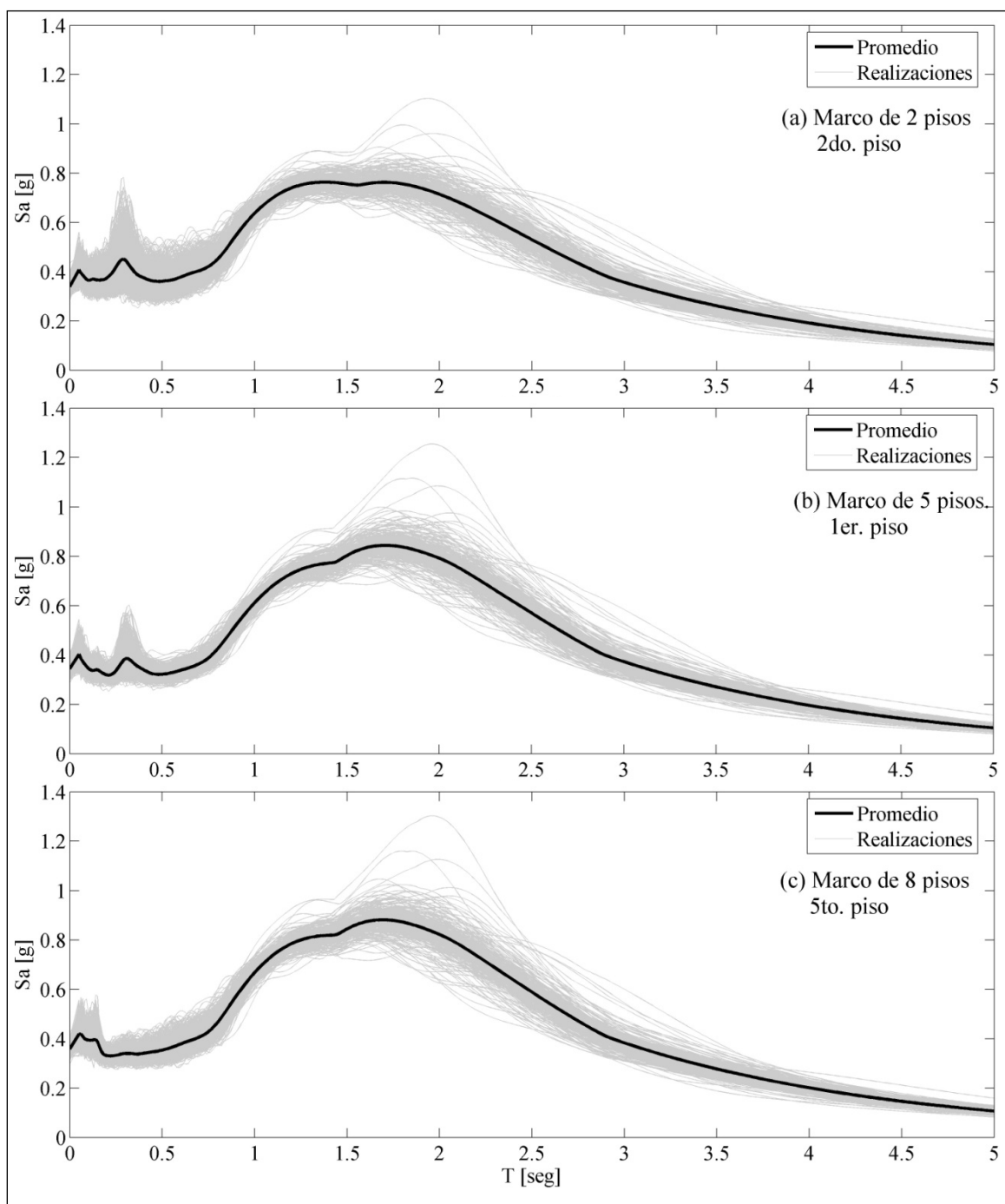


Figura 4-8 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I: ejemplos de espectros de piso (amortiguamiento=0.05).

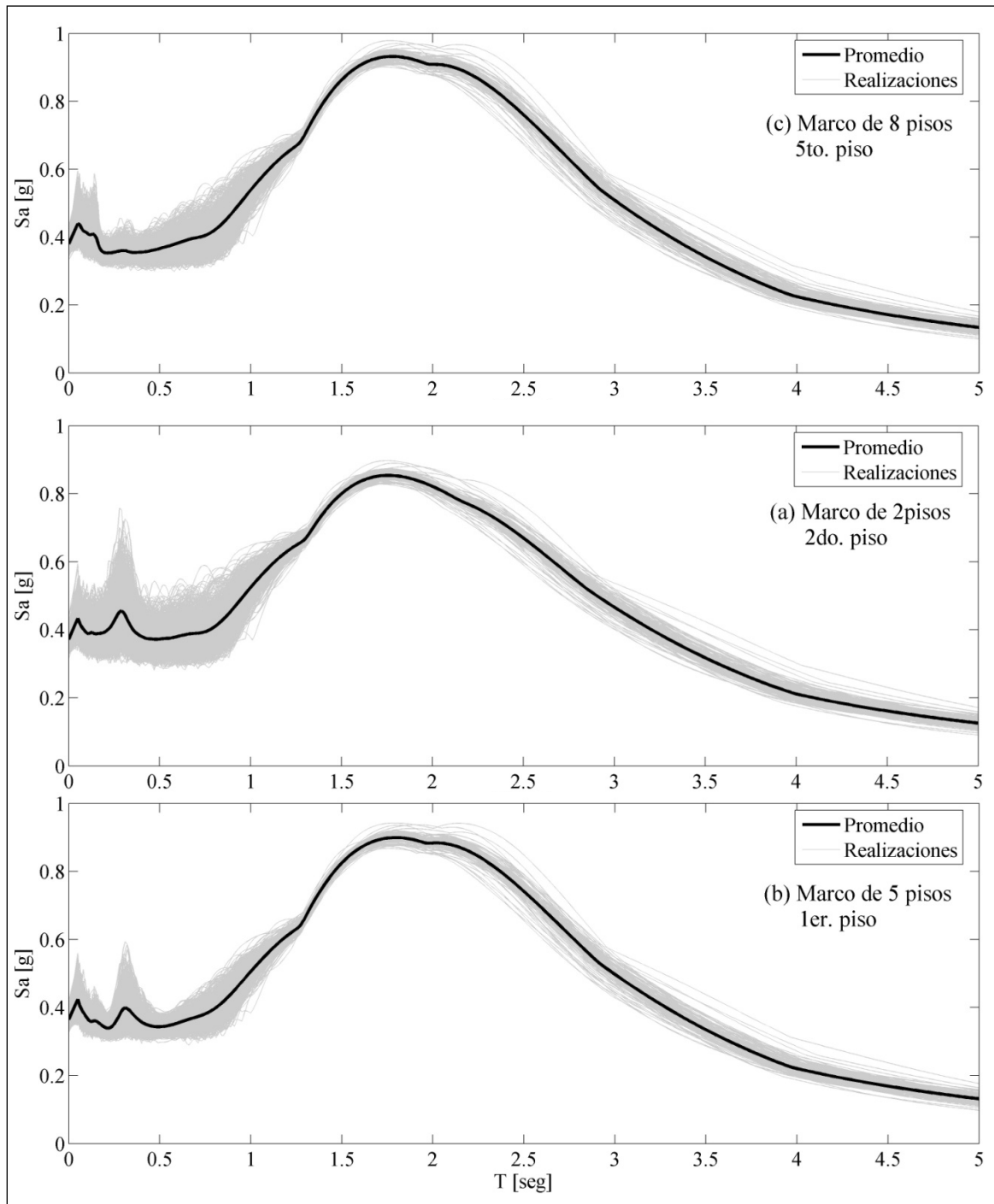


Figura 4-9 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II: ejemplos de espectros de piso (amortiguamiento=0.05).

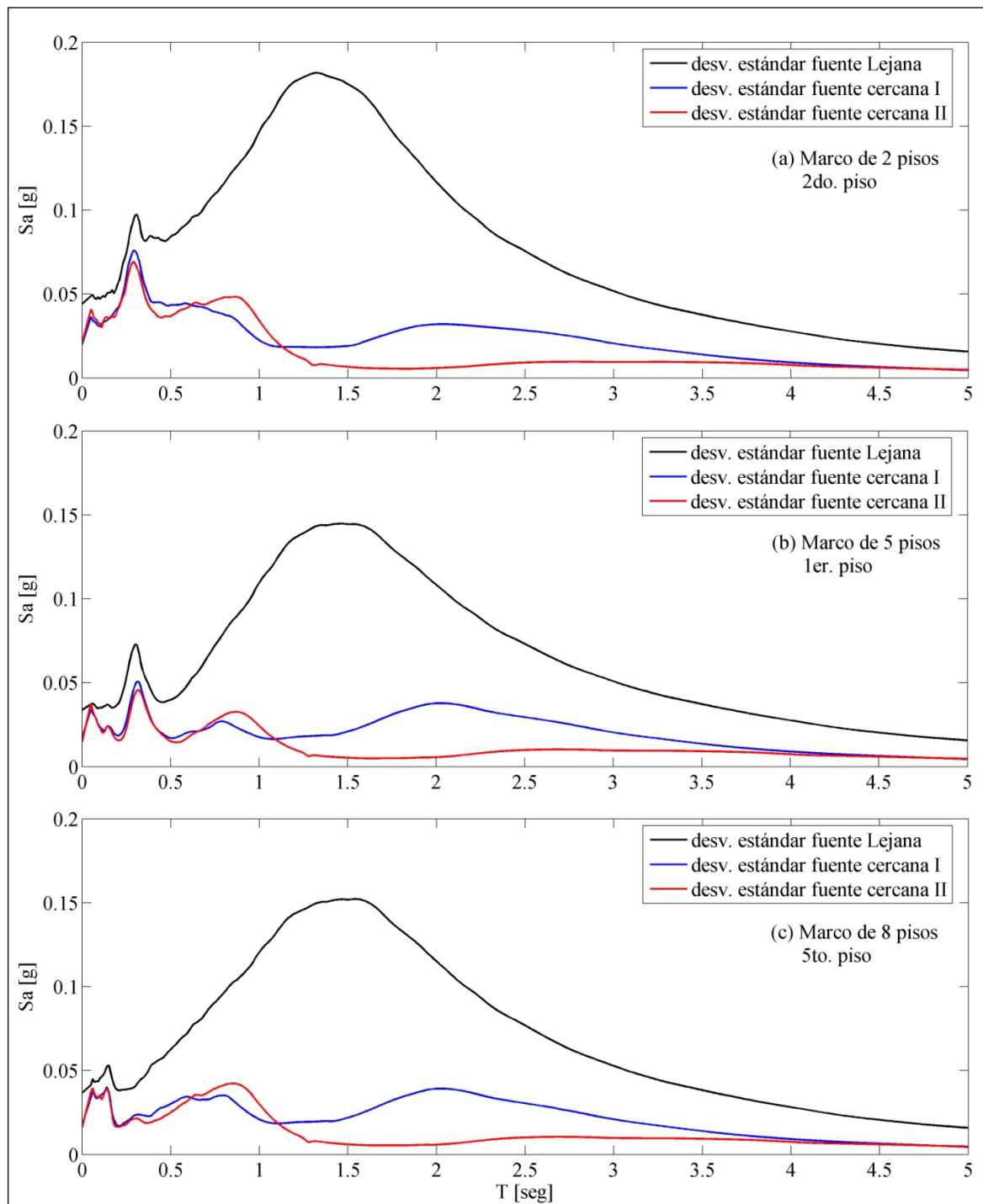


Figura 4-10 Ejemplos de valores de la desviación estándar de ordenadas espectrales de piso.

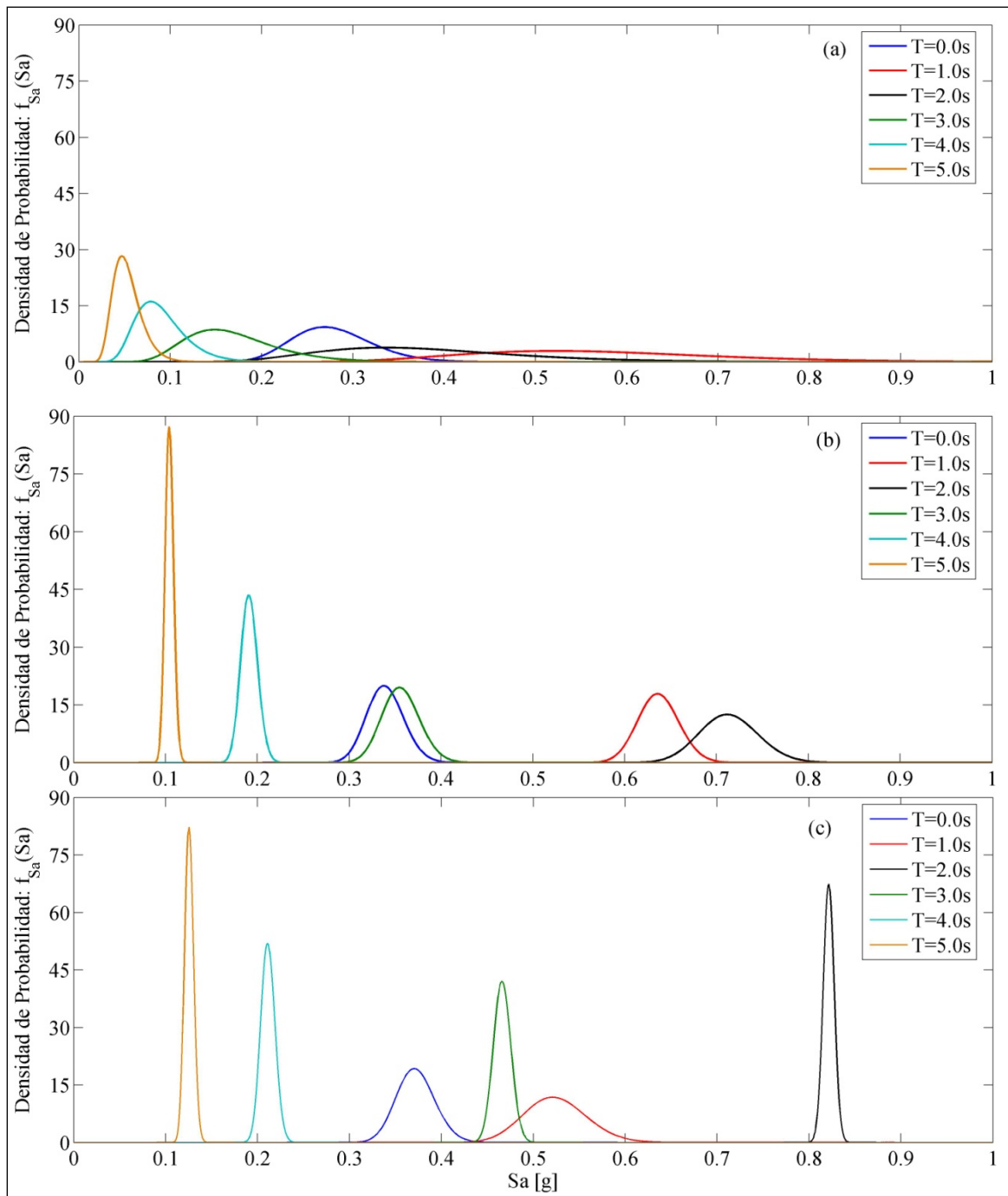


Figura 4-11 Ejemplos de funciones de densidad de probabilidad de ordenadas espectrales de piso (marco de 2 pisos, 2do. Piso); a) registros fuente Lejana; b) registros fuente Cercana I; y c) registros fuente Cercana II.

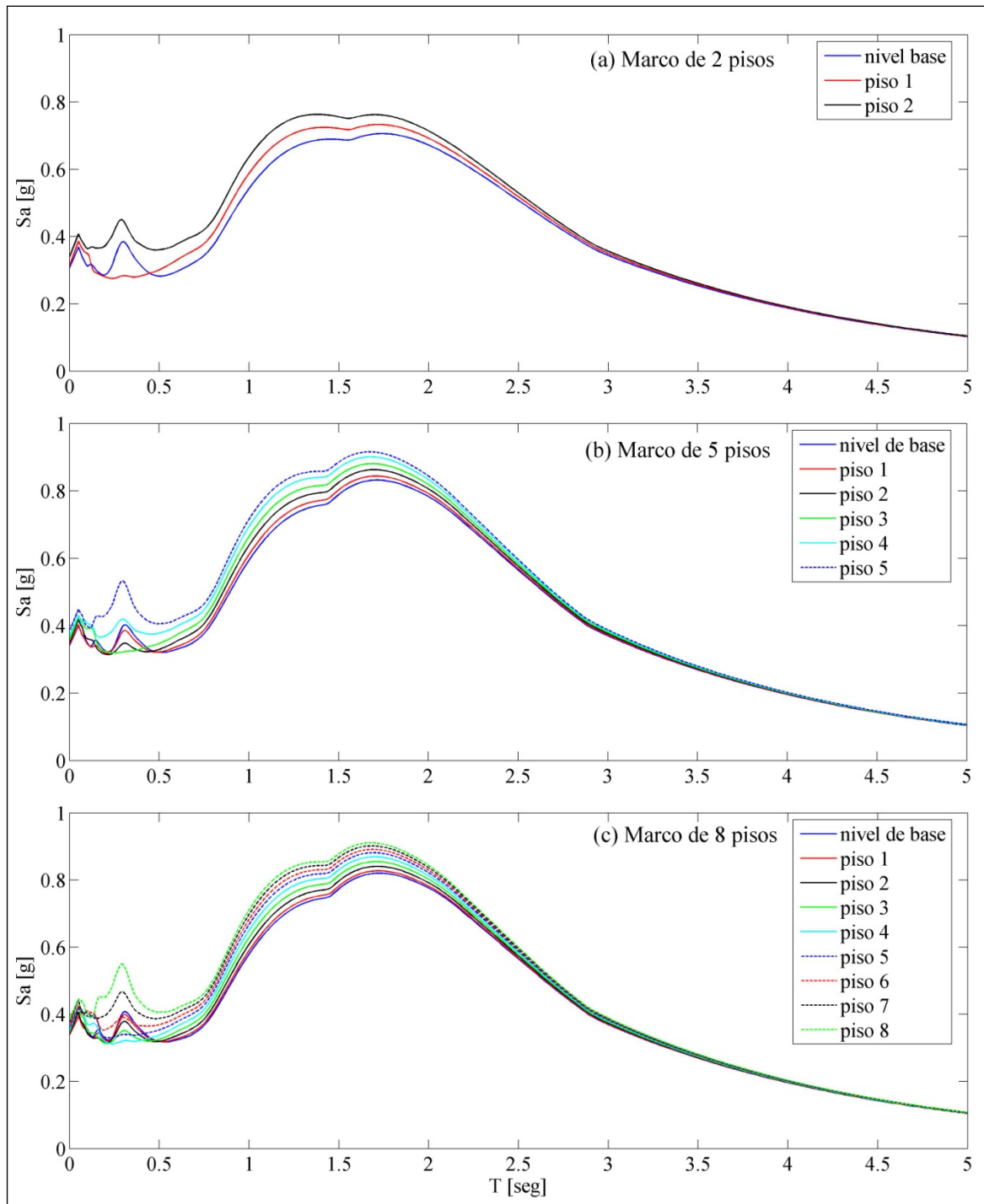


Figura 4-12 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I (amortiguamiento=0.05).

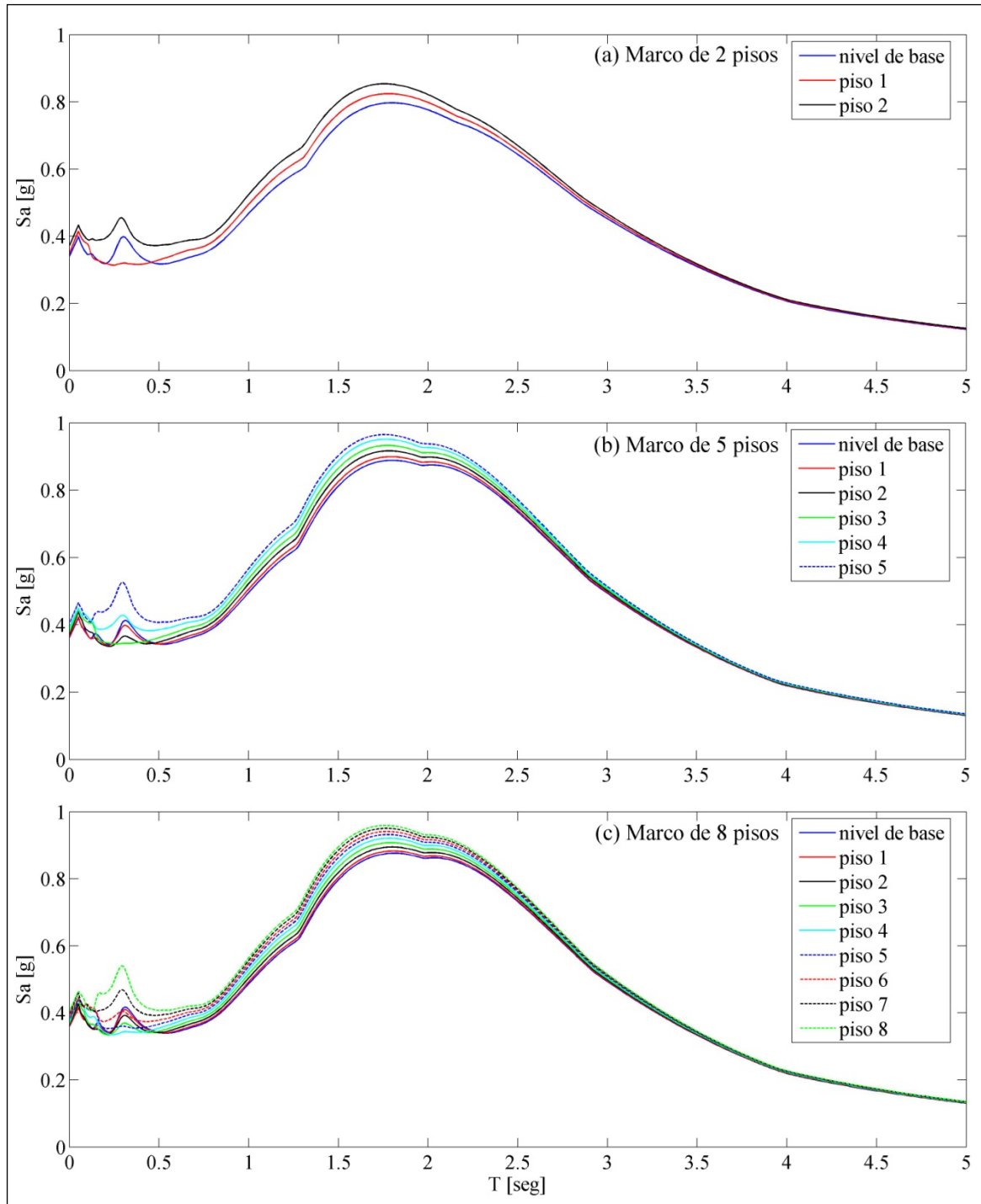


Figura 4-13 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II (amortiguamiento=0.05).

Lo discutido en esta sección permite determinar dos características importantes que diferencian los espectros de piso correspondientes a excitaciones de fuente Lejana de aquéllos correspondientes a excitaciones impulsivas:

- En el caso de excitaciones de fuente Lejana, es necesario estimar el espectro de piso en cada piso de la estructura. En el caso de excitaciones impulsivas, en cambio, puede asumirse que los espectros de piso de todos los niveles de la estructura son esencialmente iguales entre sí, de modo que sólo es necesario estimar el espectro de piso en un solo piso de la estructura (i.e., el nivel base).
- En el caso de excitaciones de fuente Lejana, el procedimiento de predicción de espectros de piso deberá incorporar de manera explícita la importante amplificación que ocurre en la zona de los períodos superiores de la estructura.

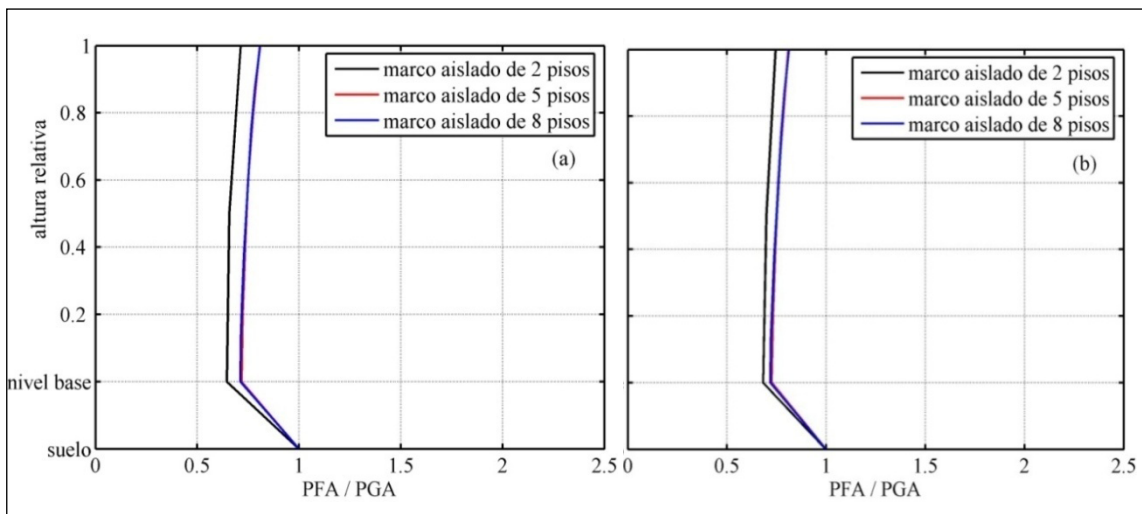


Figura 4-14 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana: valores de la relación PFA/PGA : a) excitaciones de fuente Cercana I; y b) excitaciones de fuente Cercana II.

En la Figura 4-14 se muestran los valores del PFA de todas las estructuras, normalizados por el valor del PGA . Tal como se observó en el caso de la excitación de fuente Lejana,

los valores de la relación PFA/PGA son en general muy similares en las tres estructuras analizadas, y son siempre menores que la unidad.

4.2.2 Aceleraciones de Piso en Estructuras con Sistemas No Lineales de Aislación

4.2.2.1 Respuesta a la Excitación de Fuente Lejana

A fines ilustrativos, en la Figura 4-15 puede observarse la respuesta de la estructura de 2 pisos a una realización de la excitación de fuente Lejana, y en la Figura 4-16 puede observarse la respuesta de la estructura de 8 pisos a otra realización de la misma excitación. En la Figura 4-17 pueden observarse ejemplos de espectros de piso.

La forma de las relaciones fuerza-deformación de las columnas de borde (aisladores 1 y 5) en la Figura 4-16 son típicas del fenómeno de levantamiento del deslizador. Este fenómeno sólo se observó en el marco de 8 pisos.

En la Figura 4-17 se muestran, para un piso de cada una de las estructuras, todos los espectros de piso obtenidos de las simulaciones numéricas y los correspondientes espectros promedio. En ellos se observa que para los períodos asociados al segundo modo de la estructura se obtienen los valores más altos de pseudo-aceleración espectral.

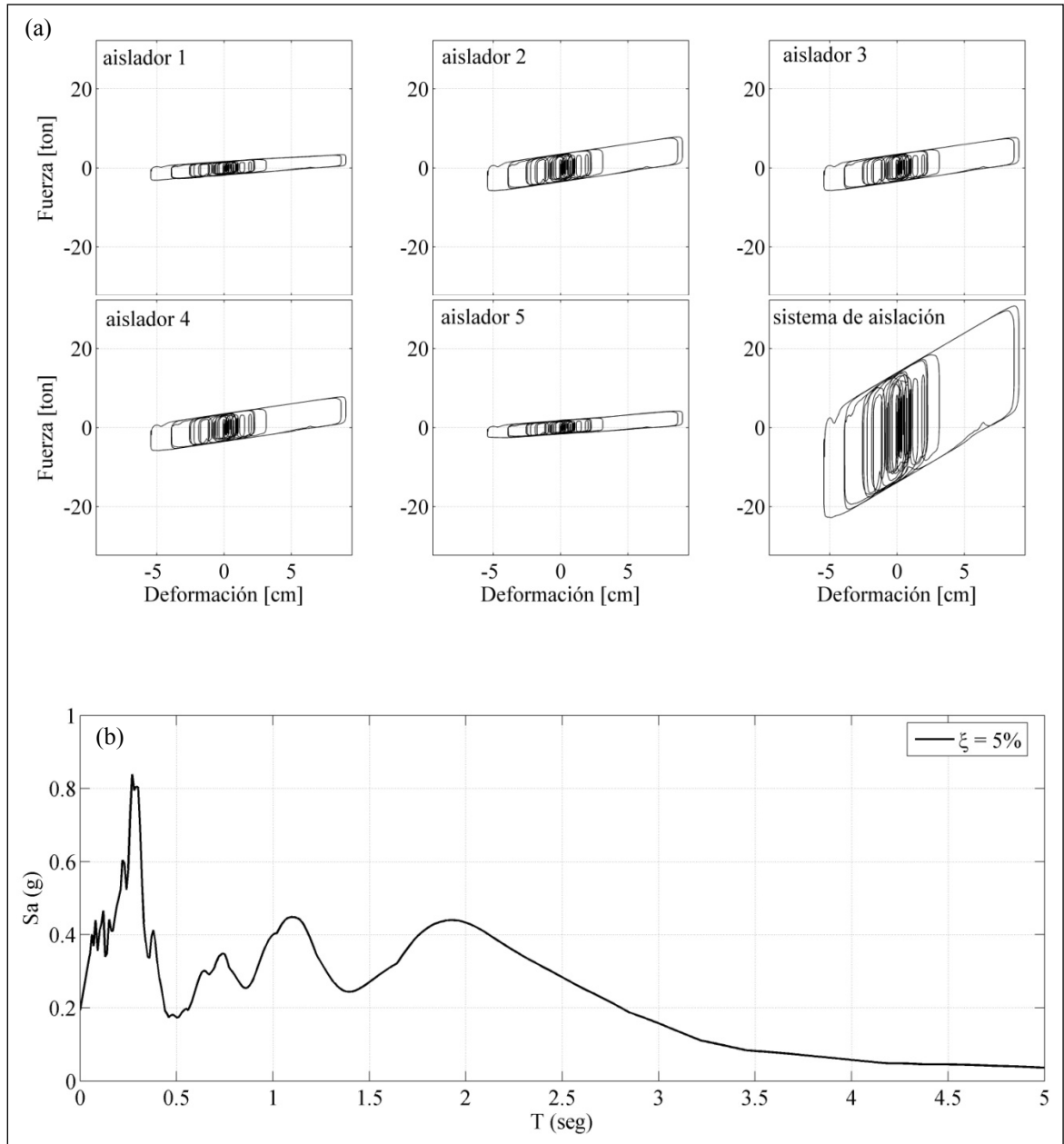


Figura 4-15 Respuesta de la estructura de 2 pisos (sistema de aislación no lineal) al registro sintético de fuente Lejana nro. 935: a) historia fuerza–deformación del sistema de aislación; b) espectro de piso del nivel base; y c) historia del desplazamiento del nivel base.

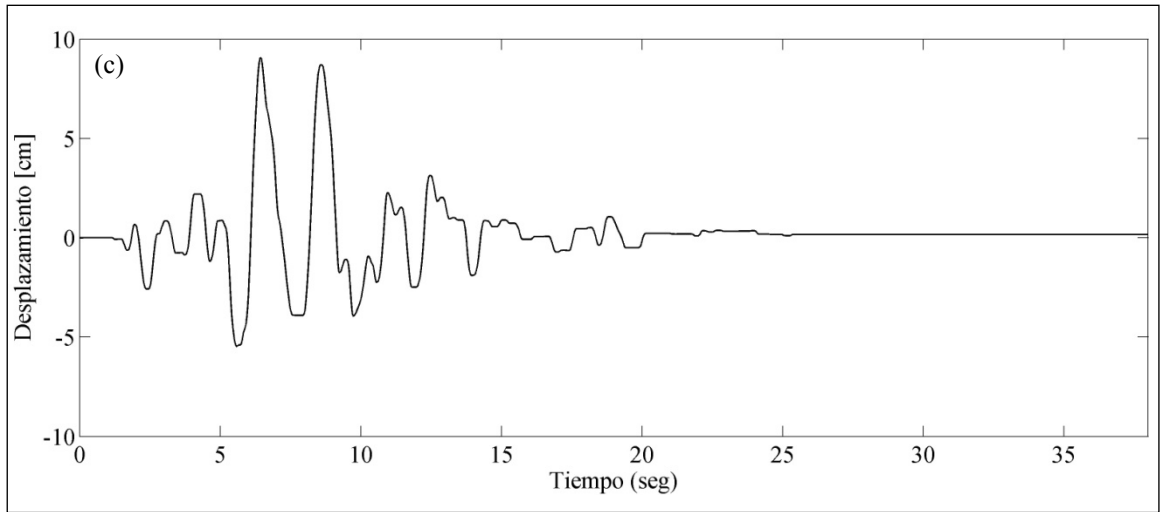


Figura 4-15 (continuación).

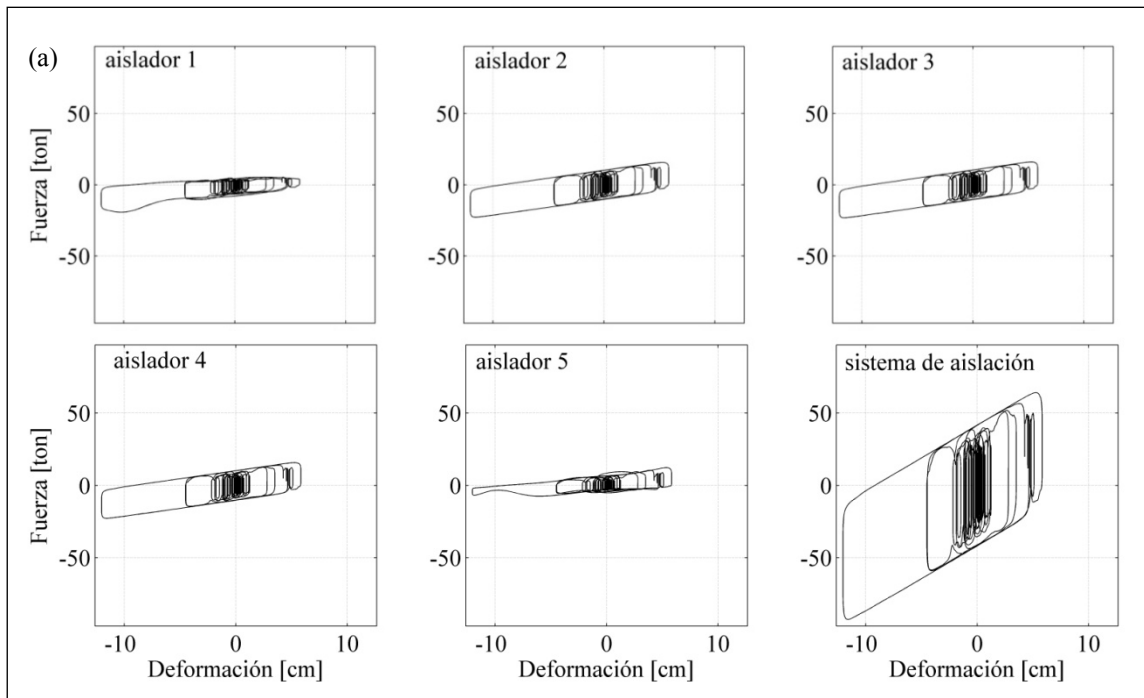


Figura 4-16 Respuesta de la estructura de 8 pisos (sistema de aislación no lineal) al registro sintético de fuente Lejana nro. 721: a) historia fuerza-deformación del sistema de aislación; b) espectro de piso del nivel base; y c) historia del desplazamiento del nivel base.

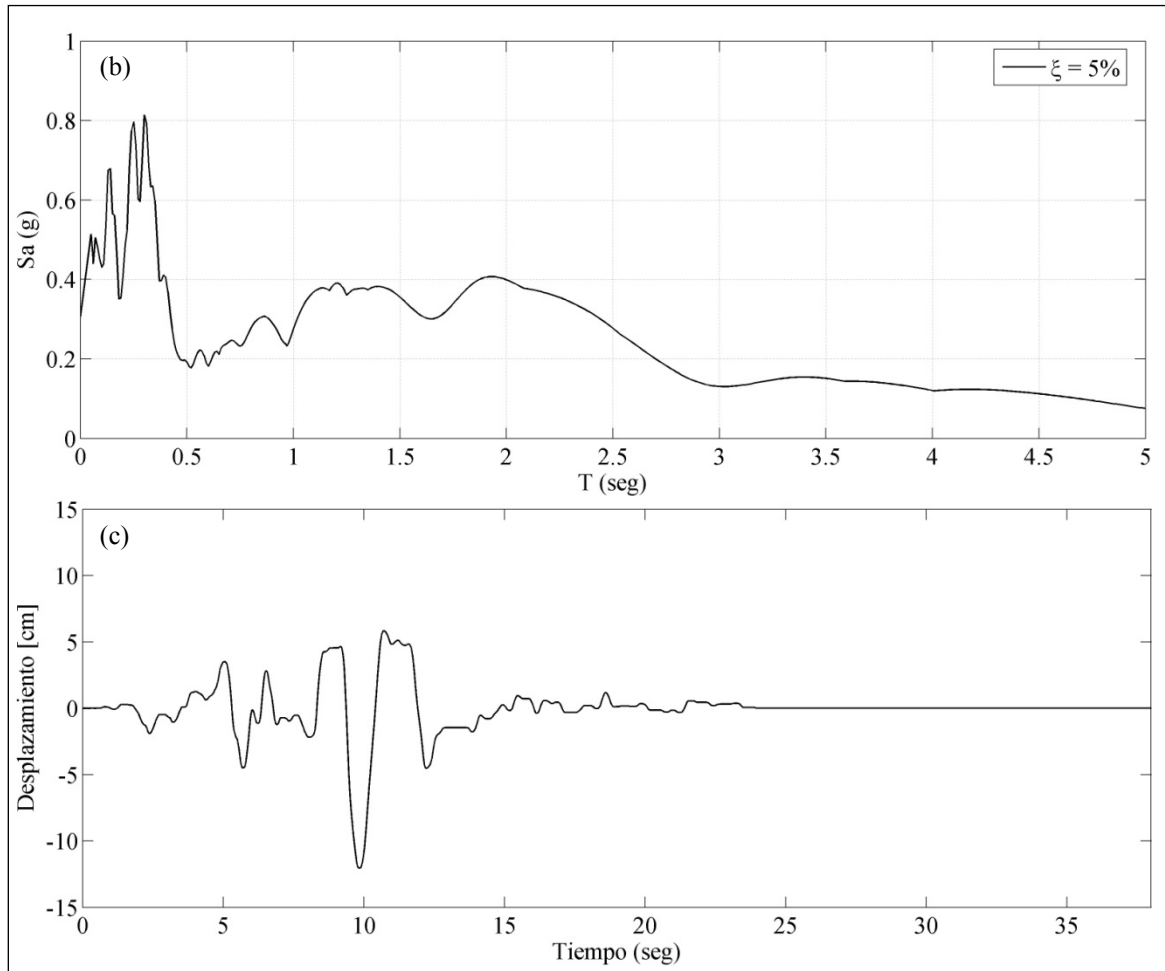


Figura 4-16 (continuación).

En la Figura 4-18 se muestran los espectros de piso promedio correspondientes a los registros de fuente Lejana. Se notan diferencias importantes en las ordenadas espectrales en la zona del segundo período modal de cada estructura, característica también observada en los sistemas lineales. En la zona del segundo período modal del edificio, las ordenadas espectrales en pisos intermedios son menores que las correspondientes a pisos inferiores y superiores.

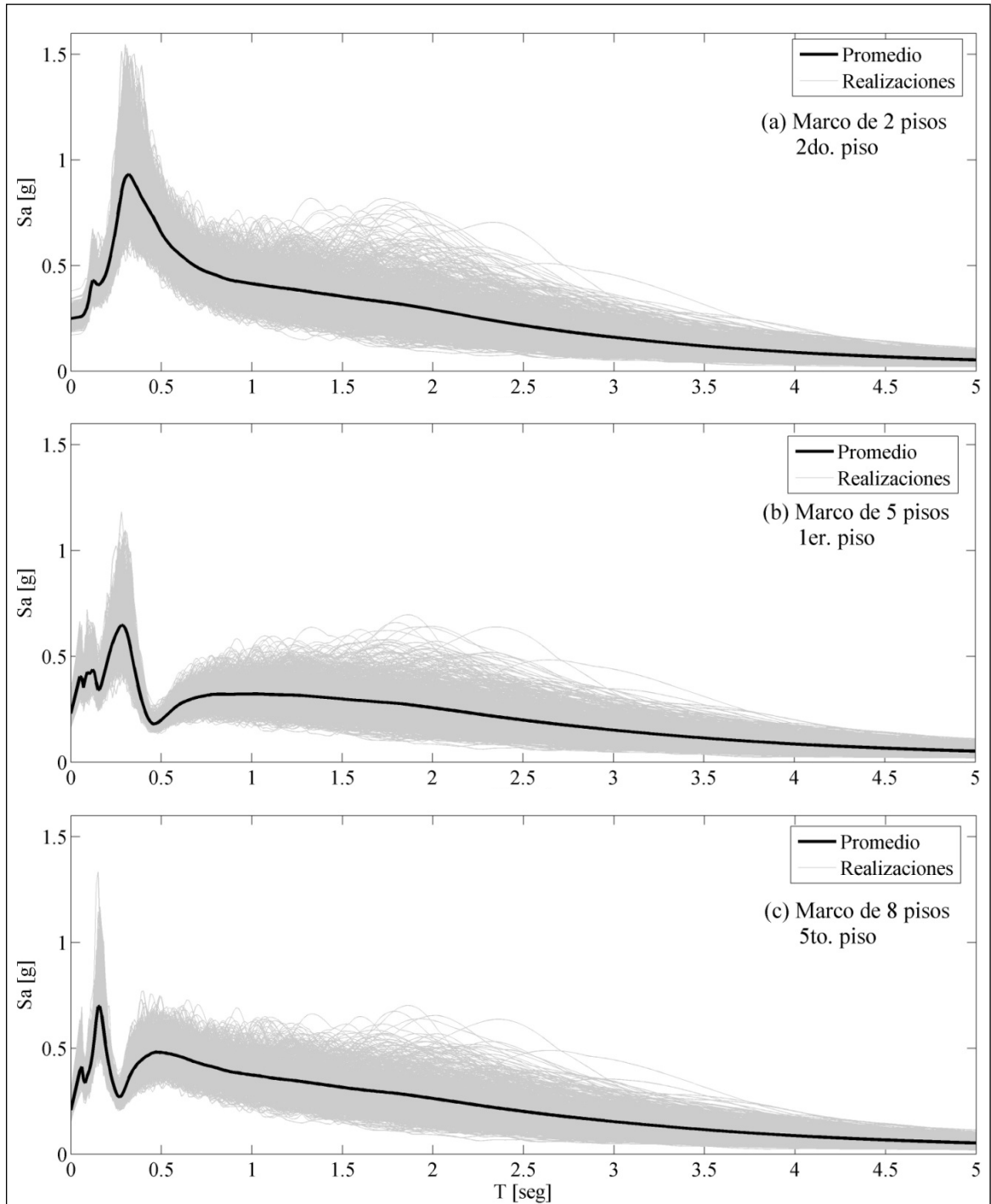


Figura 4-17 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: ejemplos de espectros de piso (amortiguamiento=0.05).

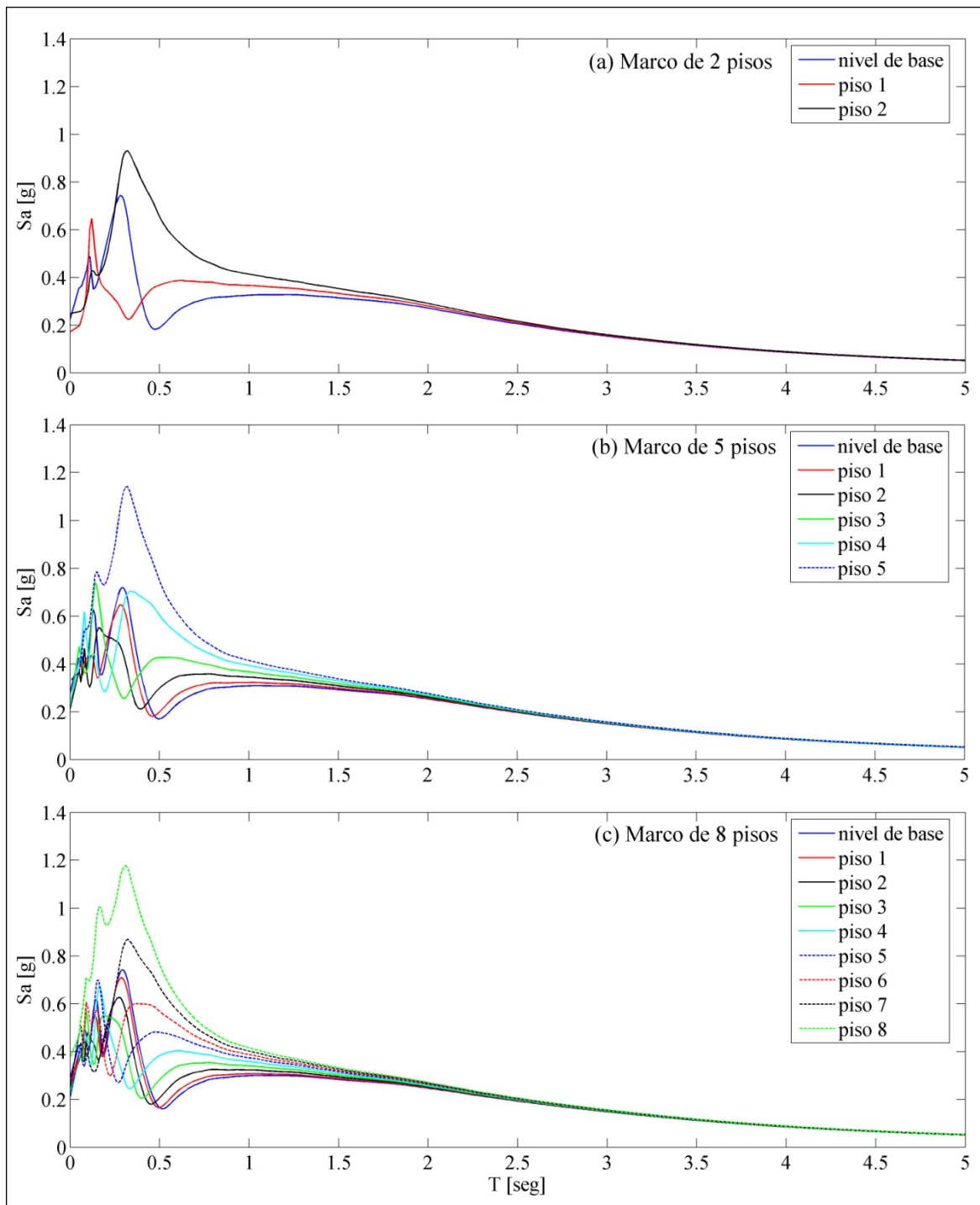


Figura 4-18 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana (amortiguamiento=0.05).

En la Figura 4-19 se muestran los valores de la relación PFA/PGA de todas las estructuras para las excitaciones de fuente Lejana. Las diferencias de los valores de la relación PFA/PGA entre las tres estructuras es mayor a la observada para los sistemas lineales (Figura 4-5).

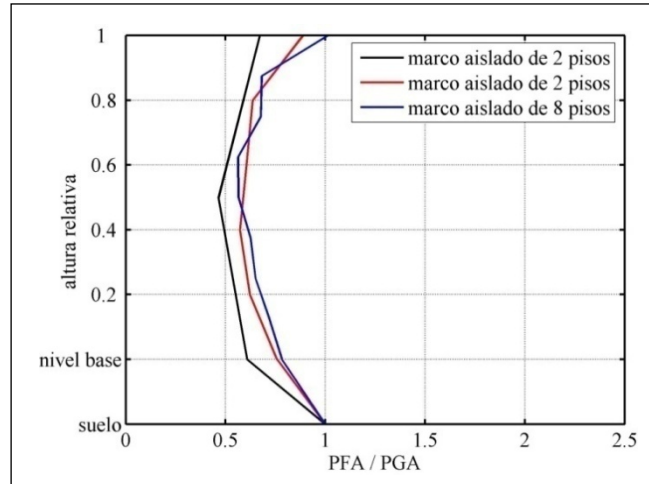


Figura 4-19 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: valores de la relación PFA/PGA .

4.2.2.2 Respuesta a las Excitaciones de Fuente Cercana

A fines ilustrativos, en la Figura 4-20 puede observarse la respuesta de la estructura de 2 pisos a una realización de la excitación de fuente Cercana I, y en la Figura 4-21 puede observarse la respuesta de la estructura de 8 pisos a una realización de la misma excitación. En la Figura 4-22 y en la Figura 4-23 pueden observarse ejemplos de espectros de piso.

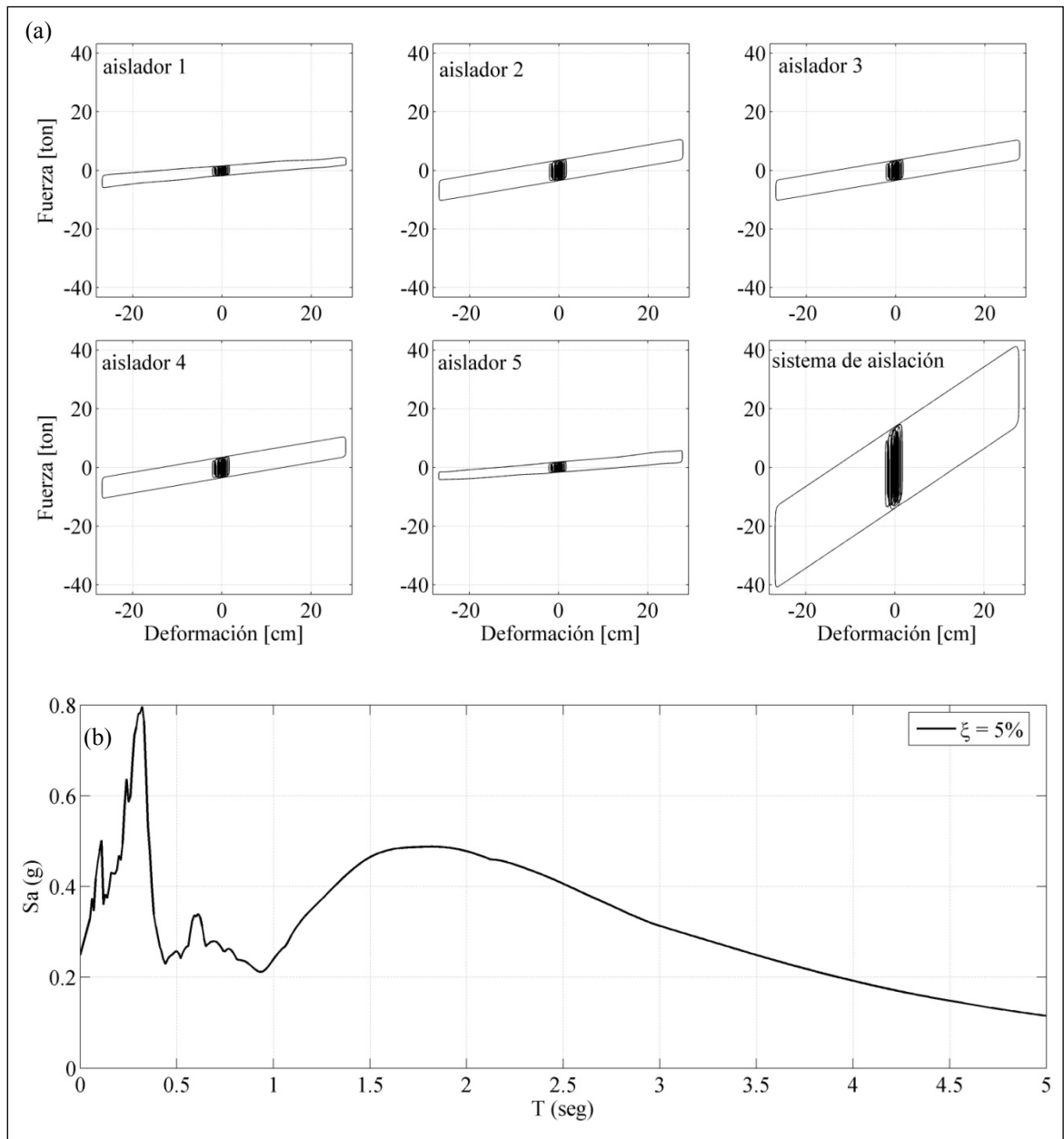


Figura 4-20 Respuesta de la estructura de 2 pisos (sistema de aislación no lineal) al registro sintético de fuente Cercana I nro. 935: a) historia fuerza–deformación del sistema de aislación; b) espectro de piso del nivel base; y c) historia del desplazamiento del nivel base.

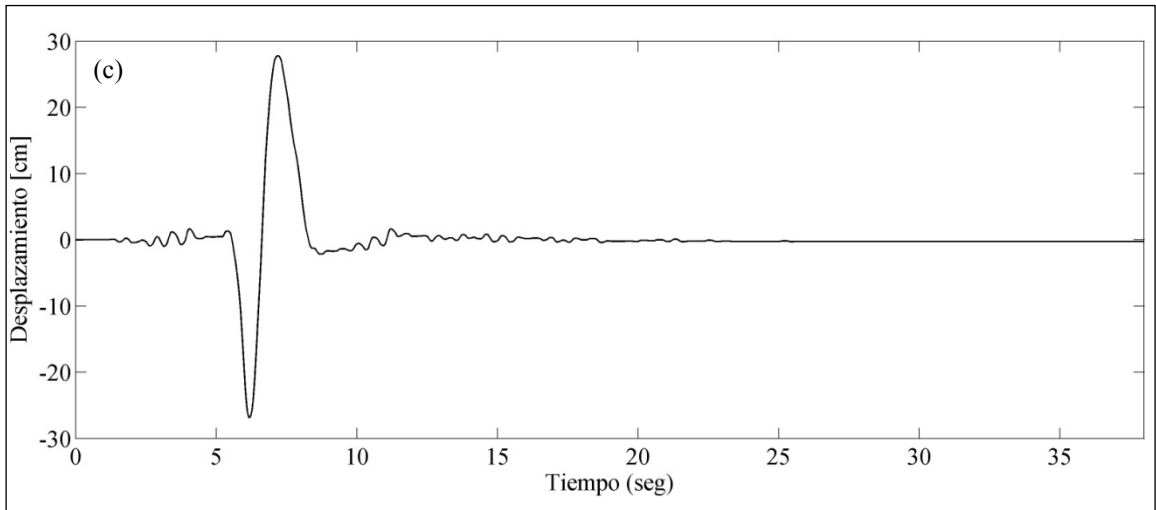


Figura 4-20 (continuación).

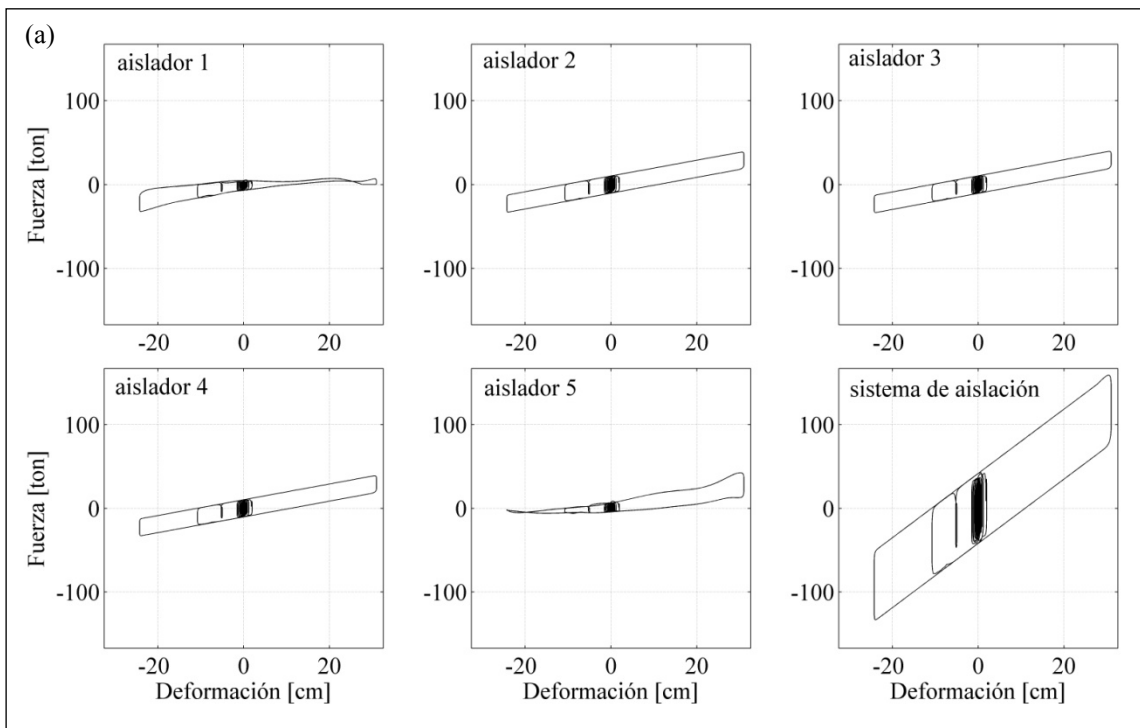


Figura 4-21 Respuesta de la estructura de 8 pisos (sistema de aislación no lineal) al registro sintético de fuente Cercana I nro. 721: a) historia fuerza–deformación del sistema de aislación; b) espectro de piso del nivel base; y c) historia del desplazamiento del nivel base.

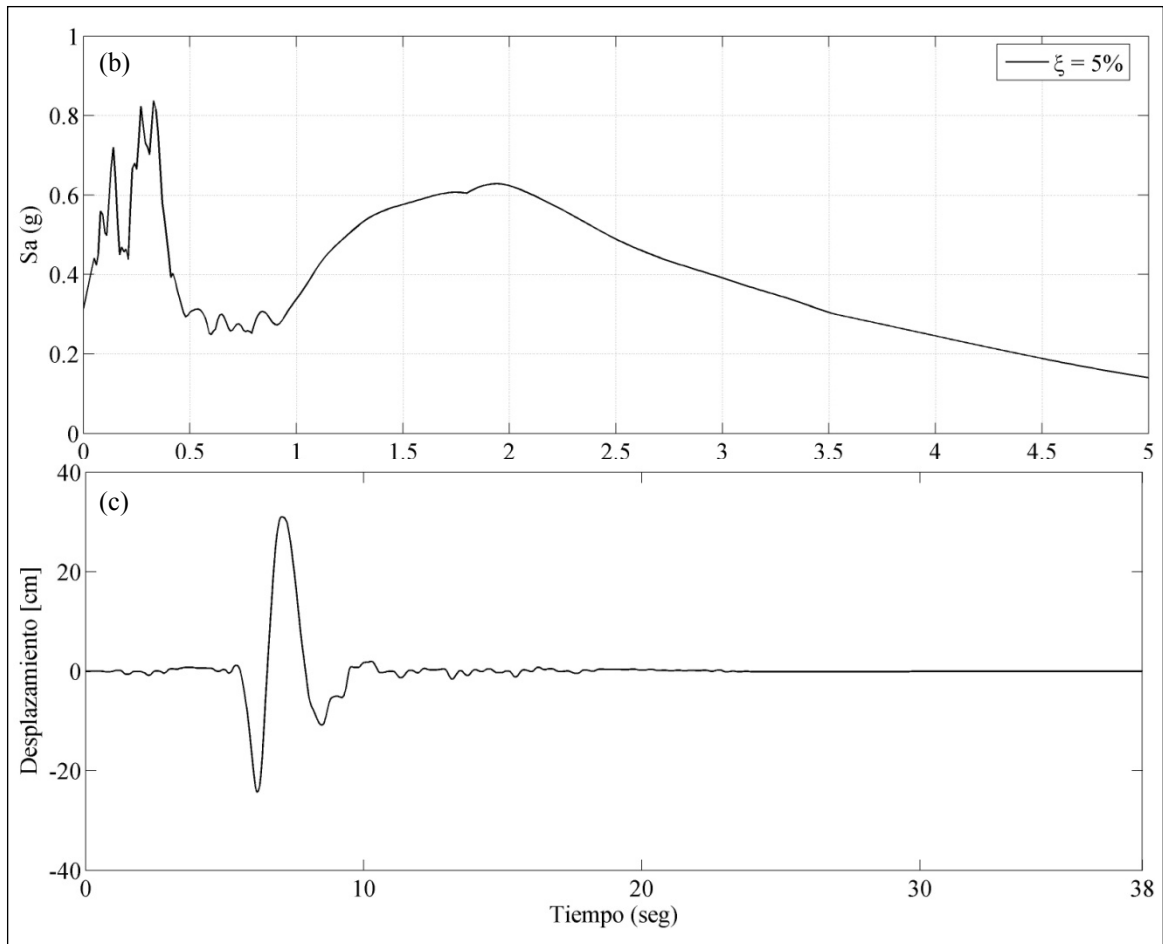


Figura 4-21 (continuación).

En la Figura 4-22 y Figura 4-23 se muestran, para un piso de cada una de las estructuras, todos los espectros de piso obtenidos de las simulaciones numéricas y los correspondientes espectros promedio. Se observa que en general, las ordenadas espectrales tienen una menor dispersión que las correspondientes a registros de fuente Lejana (Figura 4-18), aunque se advierte que esta dispersión es mayor para la zona de períodos de modos superiores de la estructura.

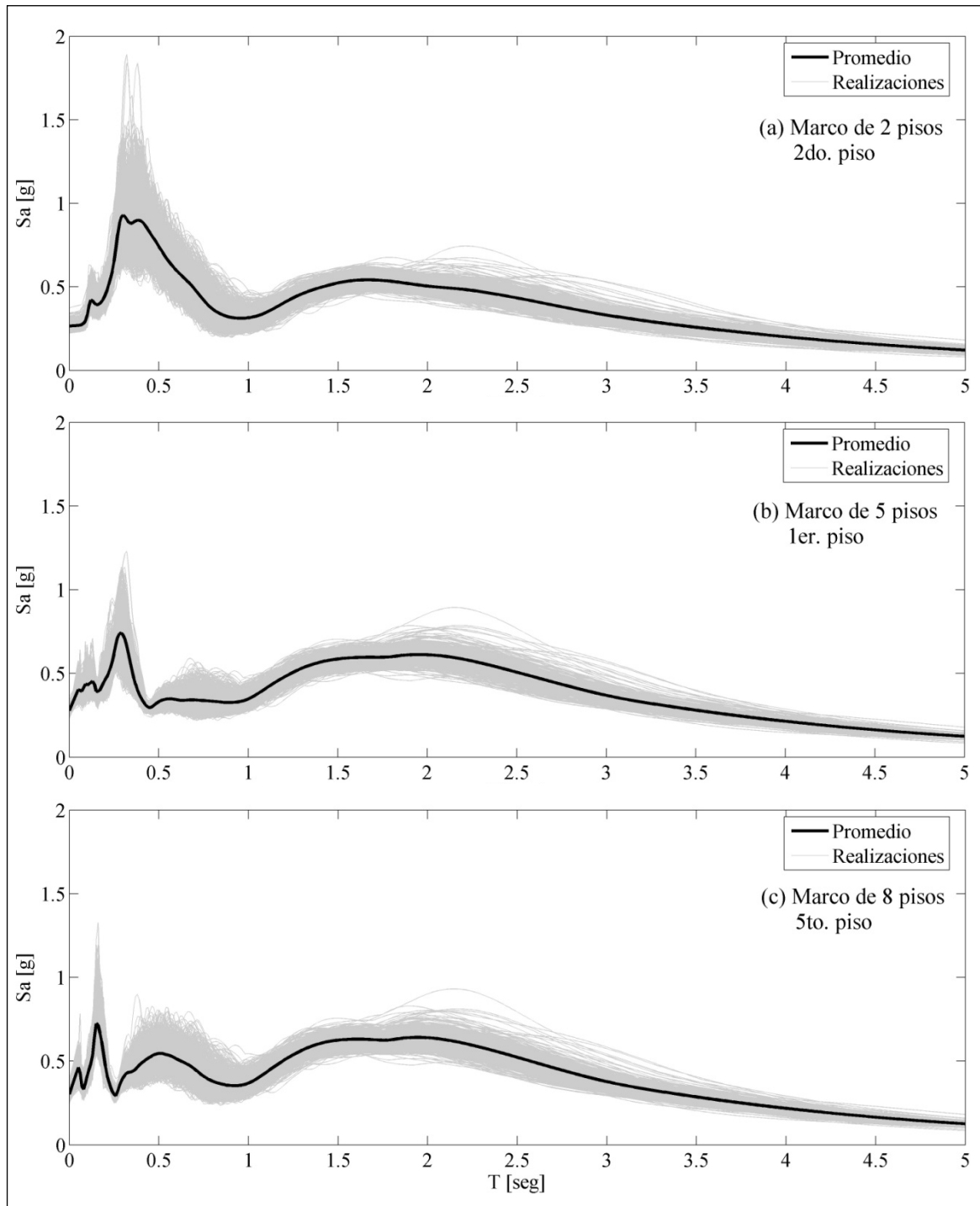


Figura 4-22 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I: ejemplos de espectros de piso (amortiguamiento=0.05).

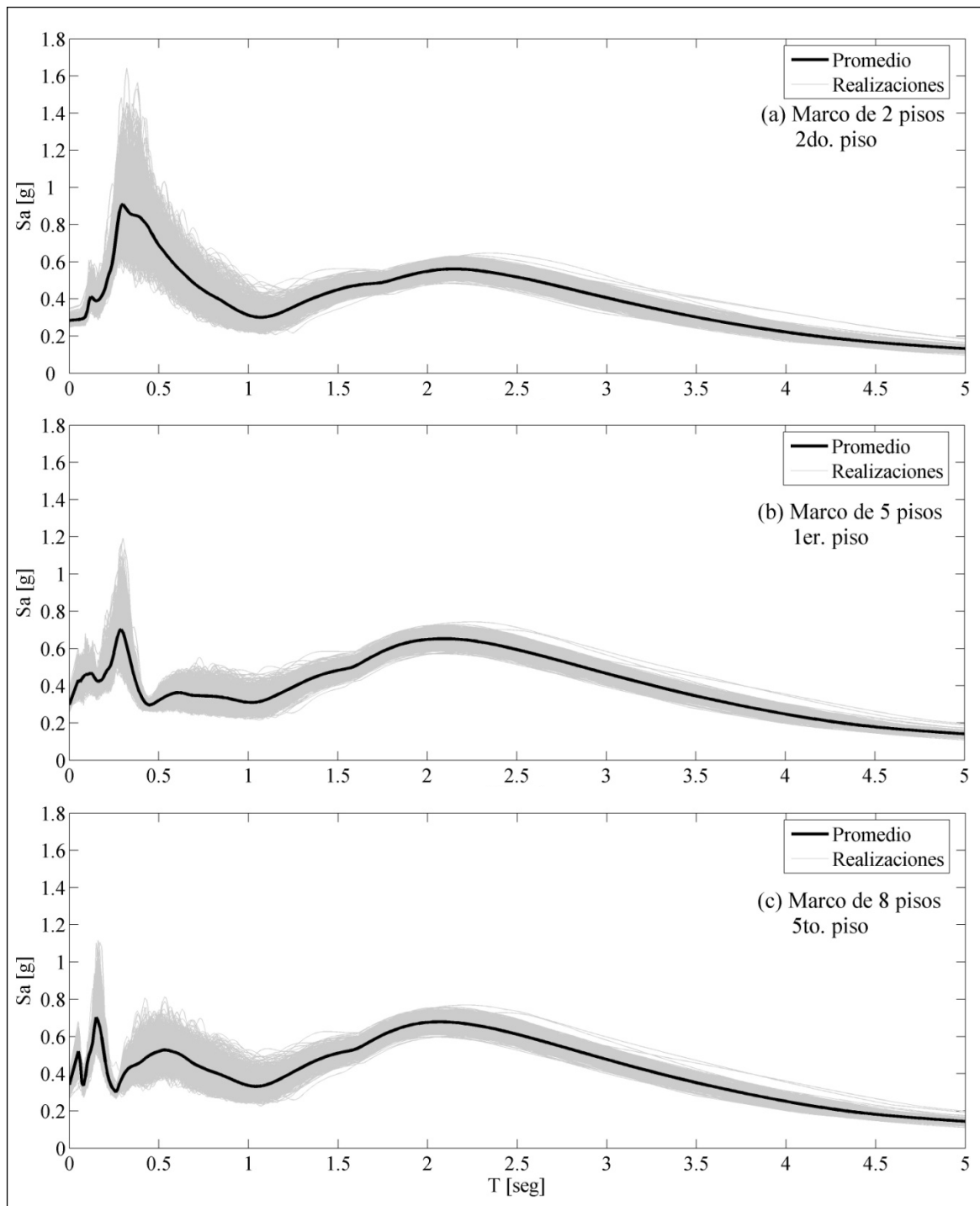


Figura 4-23 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II: ejemplos de espectros de piso (amortiguamiento=0.05).

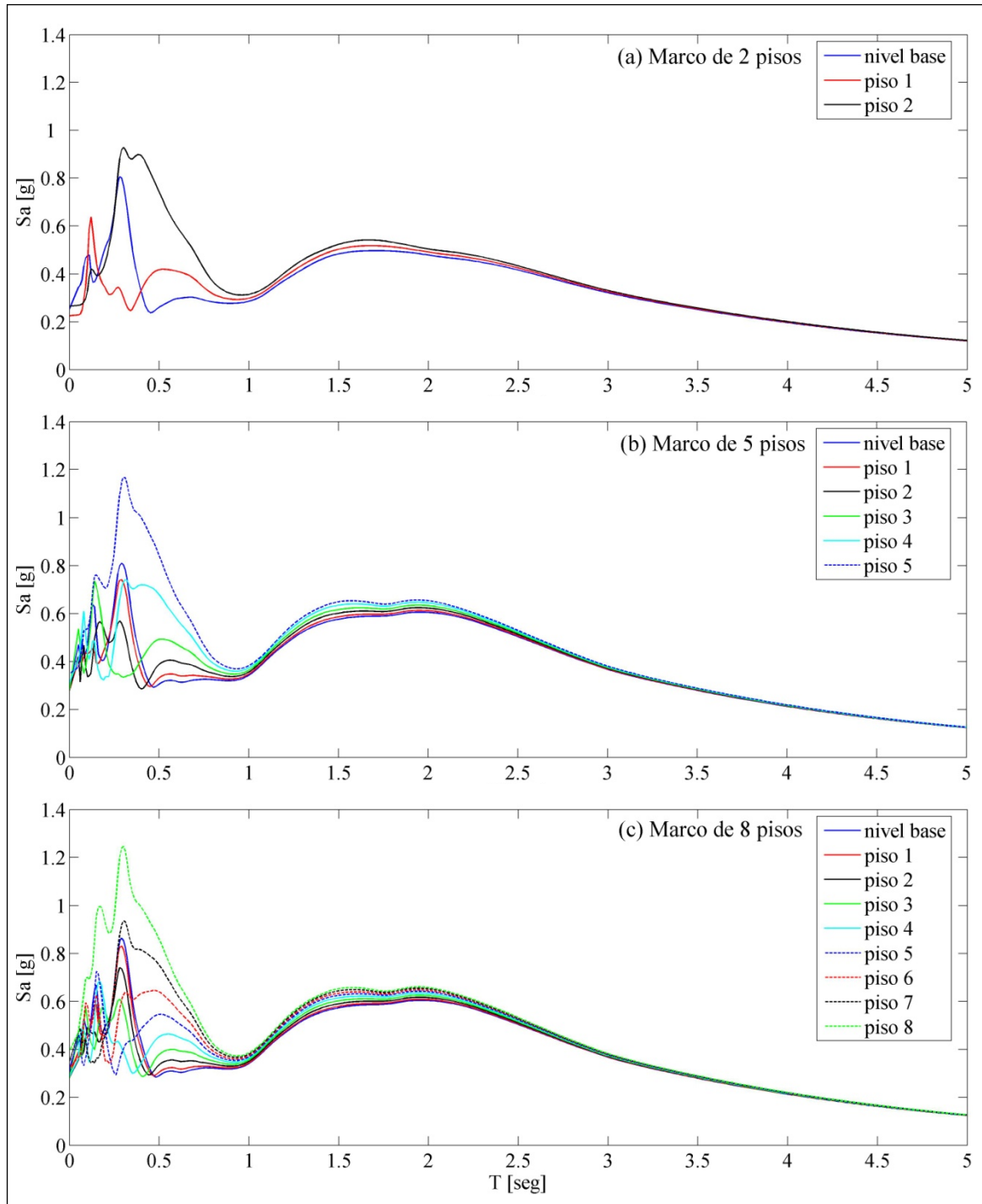


Figura 4-24 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I (amortiguamiento=0.05).

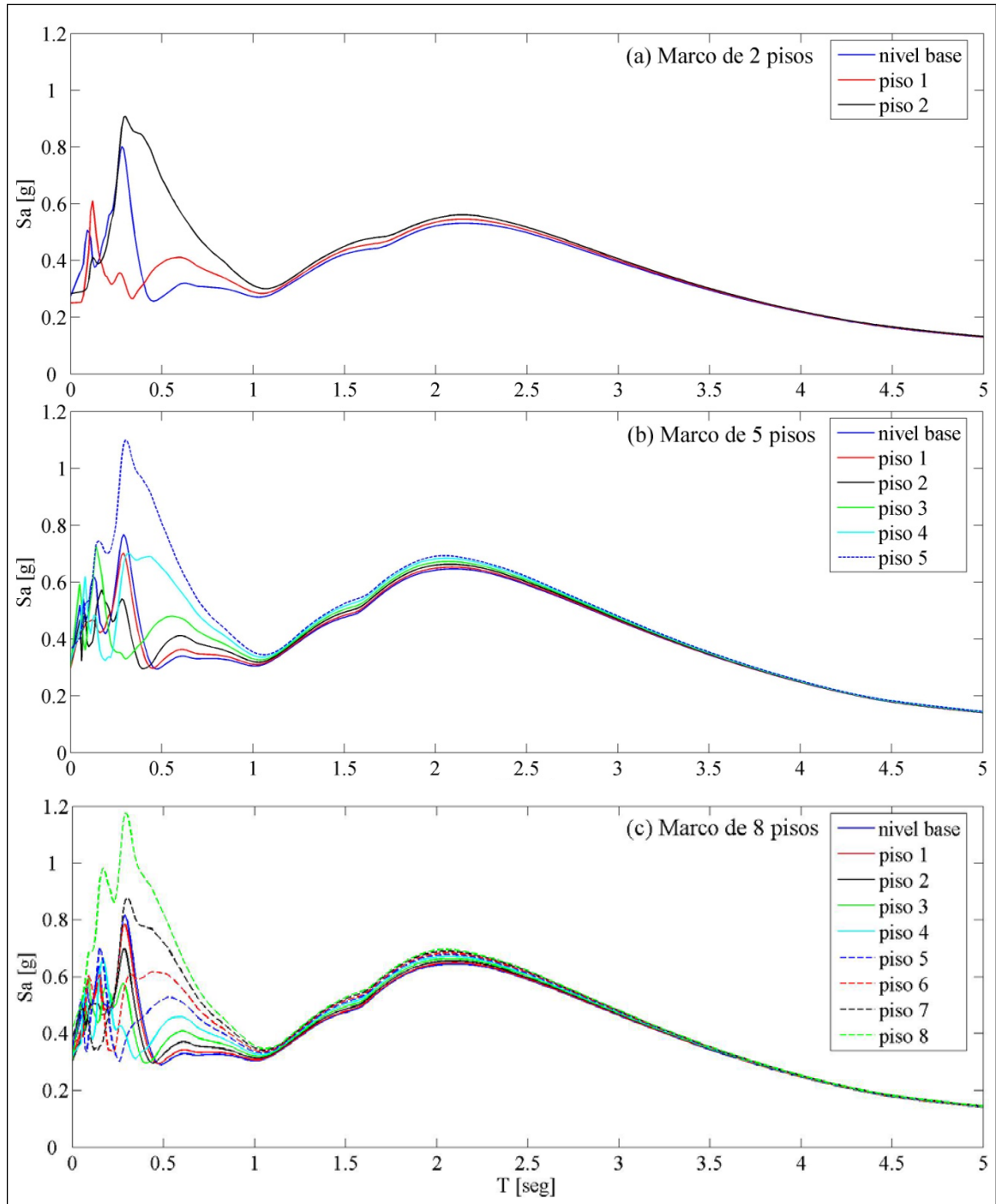


Figura 4-25 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II (amortiguamiento=0.05).

En la Figura 4-24 y Figura 4-25 se muestran los espectros de piso de los registros de fuente Cercana I y II, respectivamente. Similar a lo observado en el caso de los registros de fuente Lejana (Figura 4-18), importantes ampliaciones del valor del PFA ocurren en la zona de períodos modales superiores de la estructura. Para períodos mayores al primer modo, una mínima variabilidad entre las ordenadas espectrales de piso también es advertida.

En la Figura 4-26 se muestran los valores del PFA normalizados por el PGA de todas las estructuras para las excitaciones de fuente Cercana I y Cercana II. En general, la magnitud de las diferencias entre los valores de la relación PFA/PGA de las tres estructuras son del mismo orden que el caso de los registros de fuente Lejana (Figura 4-19).

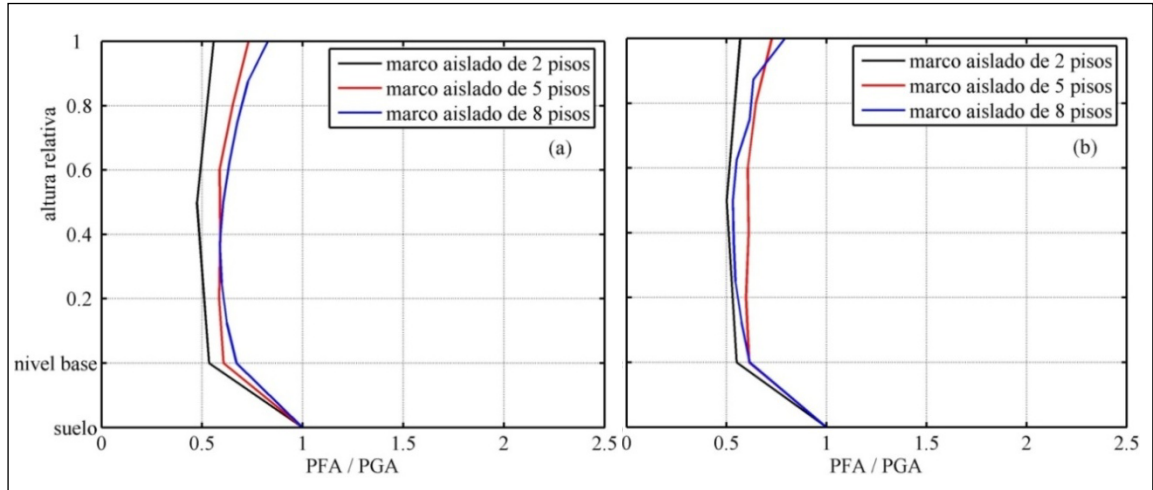


Figura 4-26 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana: valores de la relación PFA/PGA : a) excitaciones de fuente Cercana I; y b) excitaciones de fuente Cercana II.

4.2.3 Comparación entre las Respuestas de los Sistemas Lineales y No Lineales.

4.2.3.1 Aceleración Máxima de Piso

En la Figura 4-27 se muestran los valores de la relación PFA/PGA de todas las estructuras sujetas a la excitación de fuente Lejana. Se observa que estas relaciones, en general, no son consistentes en todas las estructuras. En los pisos inferiores de las estructuras de 5 y 8 pisos, los valores de las relaciones PFA/PGA son mayores para los sistemas de aislamiento no lineales. En los pisos intermedios y superiores, aunque las diferencias de dichas relaciones no son significativas, si son muy erráticas. Se advierte que en el nivel de techo los sistemas no lineales proporcionan mayores valores a la relación PFA/PGA . Para la estructura de 2 pisos, los valores de las relaciones PFA/PGA obtenidas con los sistemas lineales son iguales o mayores que las obtenidas con los sistemas no lineales.

En la Figura 4-28 y en la Figura 4-29 se muestran los valores de las relaciones PFA/PGA correspondientes a las excitaciones de fuente Cercana I y II, respectivamente. Se observa que las relaciones son consistentes en todos los marcos. En general, los valores de las relaciones PFA/PGA obtenidas con los sistemas lineales son mayores que las correspondientes a los sistemas no lineales. No se observan diferencias importantes entre las relaciones obtenidas para los dos tipos de excitaciones de fuente Cercana.

4.2.3.2 Espectro de Piso

En la Figura 4-30 a la Figura 4-32 se muestran los espectros de piso de todas las estructuras (lineales y no lineales) correspondientes a la excitación de fuente Lejana. Se observa que: (a) en la zona del período fundamental de la estructura, las ordenadas espectrales son siempre mayores en los sistemas lineales; (b) en la zona de los períodos superiores de la estructura, las ordenadas espectrales son mayores en los sistemas no lineales, sobre todo en los pisos superiores; y (c) las ordenadas espectrales de los

sistemas no lineales en la zona de los períodos superiores de la estructura son mayores que las máximas ordenadas espectrales de los sistemas lineales. En la Figura 4-33 a la Figura 4-38 se observan los espectros de piso correspondientes a las excitaciones de fuente Cercana. Las observaciones (a) y (b) siguen siendo válidas, aunque la observación (c), en cambio, sigue siendo válida sólo en el caso de los pisos superiores.

En la Figura 4-39 se muestra la relación entre los espectros de piso de los sistemas no lineales y los espectros de pisos de los sistemas lineales (excitación de fuente Lejana), relación denominada “Factor de amplificación”. Se observa que las ordenadas espectrales de los sistemas no lineales son menores que las de los sistemas lineales a partir de los 0.8 seg aproximadamente. A partir de este período, la relación entre los espectros de piso no lineales y lineales es esencialmente igual en todos los pisos de todos los marcos. A medida que aumenta el período, la relación entre los espectros de piso tiende a la unidad, es decir, las ordenadas espectrales tienden a valores esencialmente iguales, independientemente del número de pisos y del sistema de aislación. Claramente, en la zona del período fundamental de la estructura, las ordenadas espectrales de los sistemas no lineales son, en todos los pisos, menores que las ordenadas espectrales de los sistemas lineales. En la zona de los períodos superiores las relaciones son muy erráticas, pero se advierte que, en general, las ordenadas espectrales de los sistemas no lineales son mayores que las de los sistemas lineales. Estas observaciones son consistentes con los resultados de modelos de superestructuras aisladas de 1 GDL obtenidos por Politopoulos & Khac Pham (2008). En la Figura 4-40 y en la Figura 4-41 se muestran las mismas relaciones para cuando las estructuras son sometidas a las excitaciones de fuente Cercana I y fuente Cercana II, respectivamente. Se observa que las ordenadas espectrales de los sistemas no lineales también son menores que las de los sistemas lineales a partir de los 0.8 seg aproximadamente, aunque una tendencia ligeramente opuesta se observa en la zona de períodos mayores que 3 seg aproximadamente. Similar a lo observado en el caso de la excitación de fuente Lejana (Figura 4-39), en las zonas de los períodos superiores las relaciones son muy erráticas,

pero en general las ordenadas espectrales de los sistemas no lineales son también mayores que las ordenadas espectrales de los sistemas lineales.

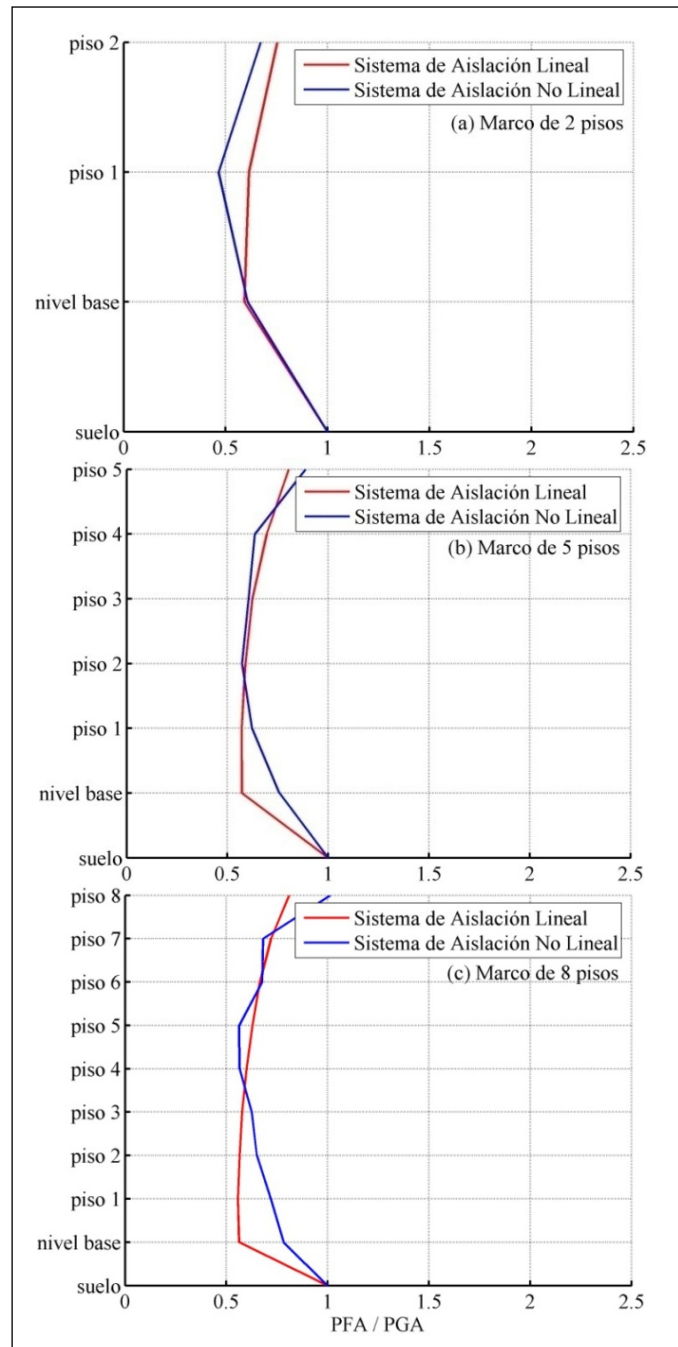


Figura 4-27 Sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: valores de la relación PFA/PGA .

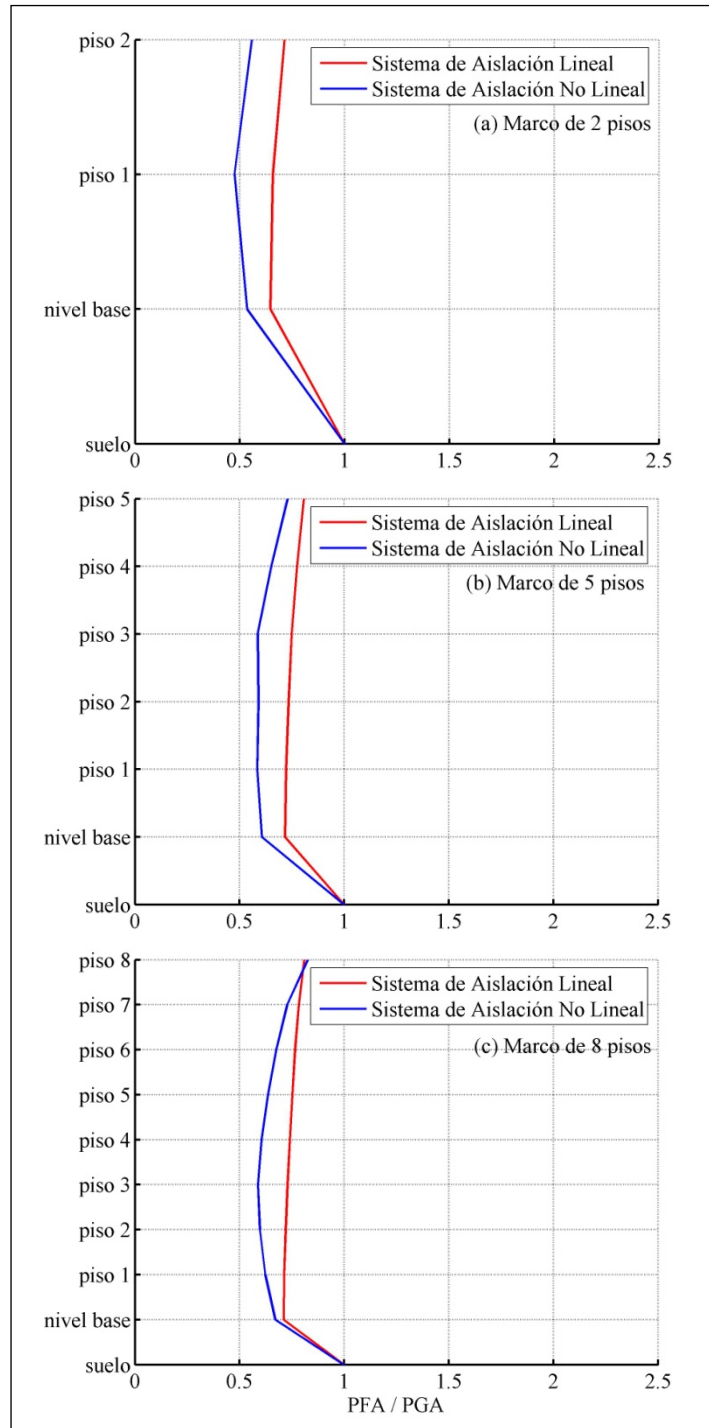


Figura 4-28 Sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I: valores de la relación PFA/PGA .

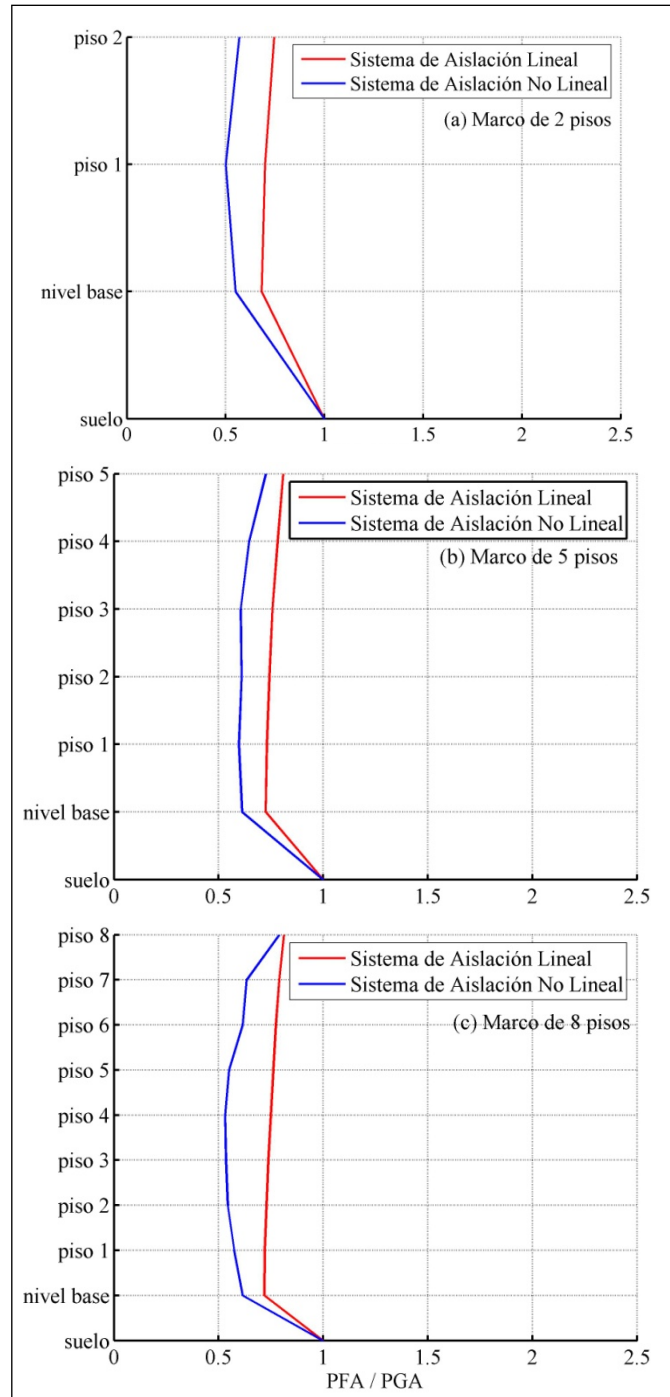


Figura 4-29 Sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II:
valores de la relación PFA/PGA

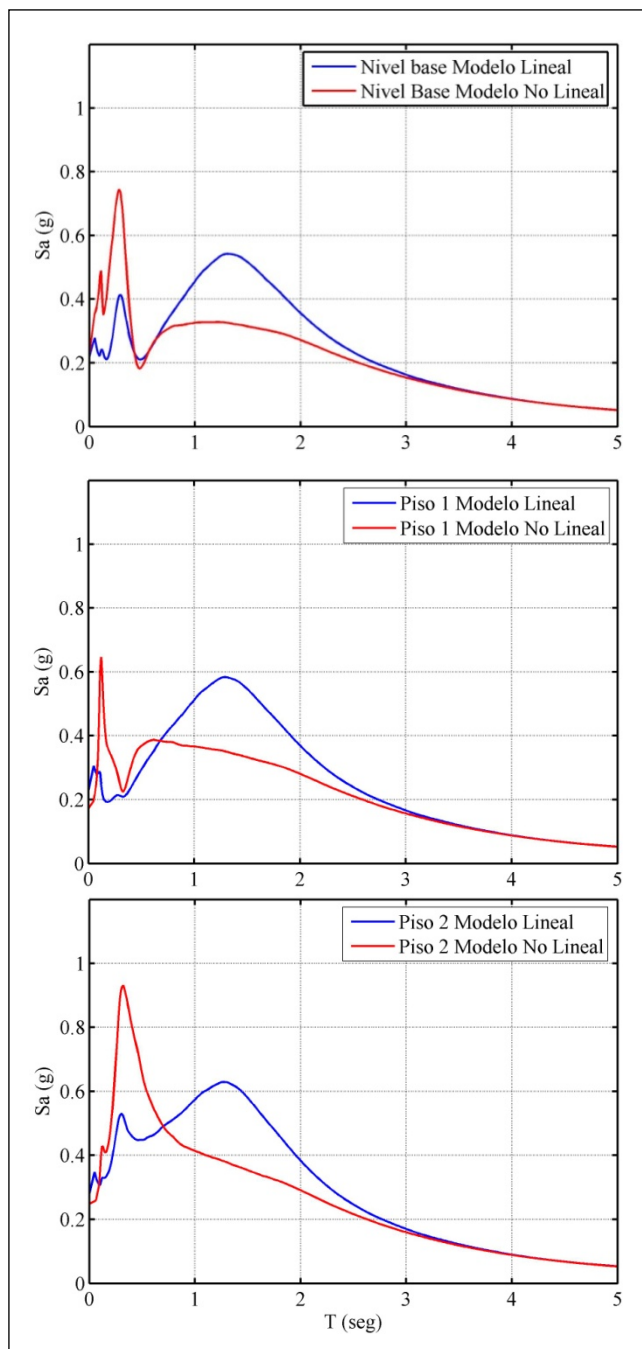


Figura 4-30 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana (amortiguamiento=0.05). Marco de 2 pisos.

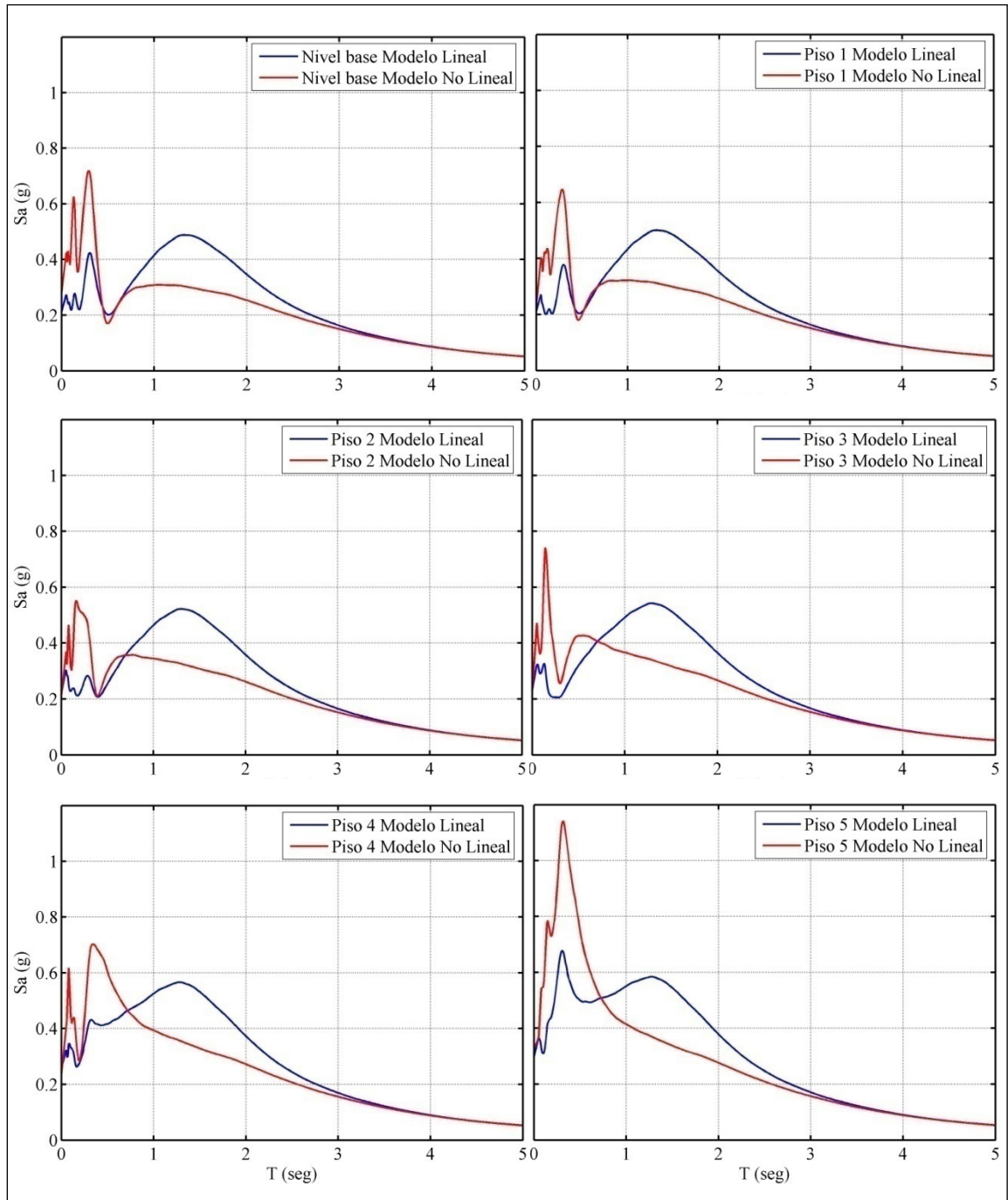


Figura 4-31 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana (amortiguamiento=0.05). Marco de 5 pisos.

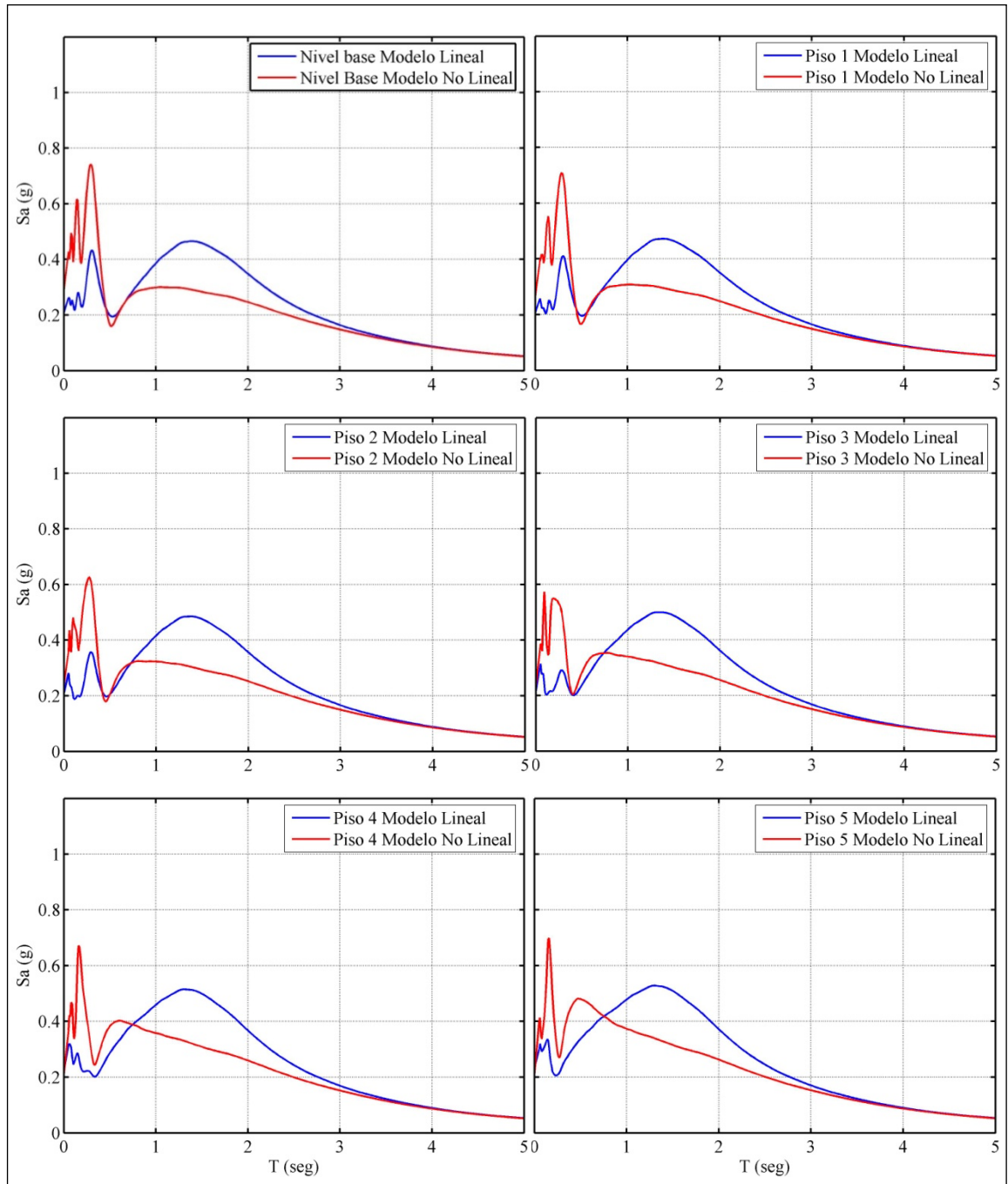


Figura 4-32 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana (amortiguamiento=0.05). Marco de 8 pisos.

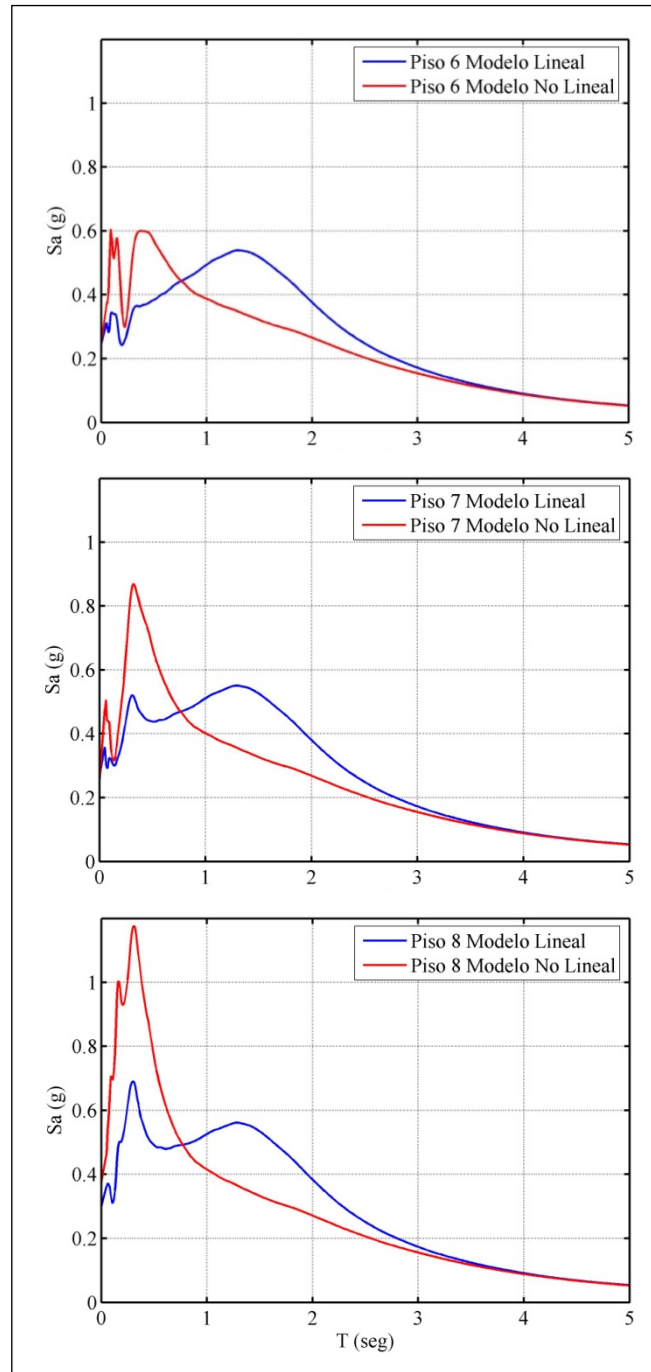


Figura 4-32 (continuación).

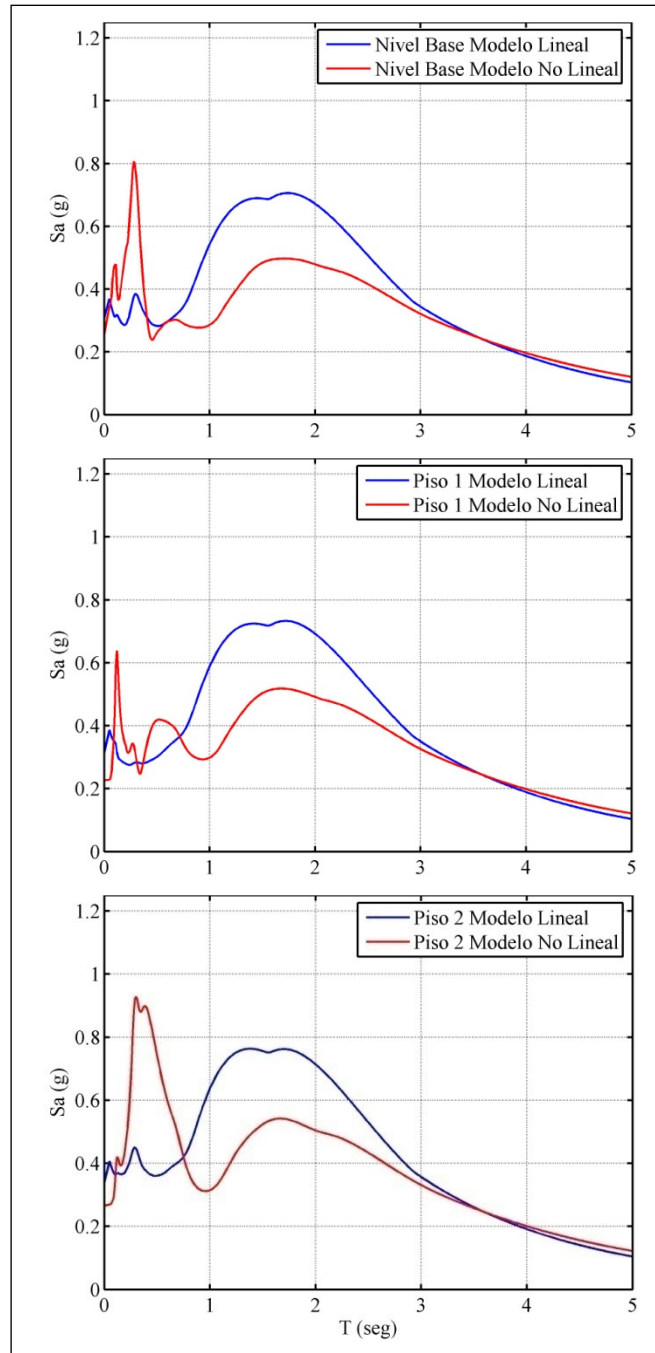


Figura 4-33 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I (amortiguamiento=0.05). Marco de 2 pisos.

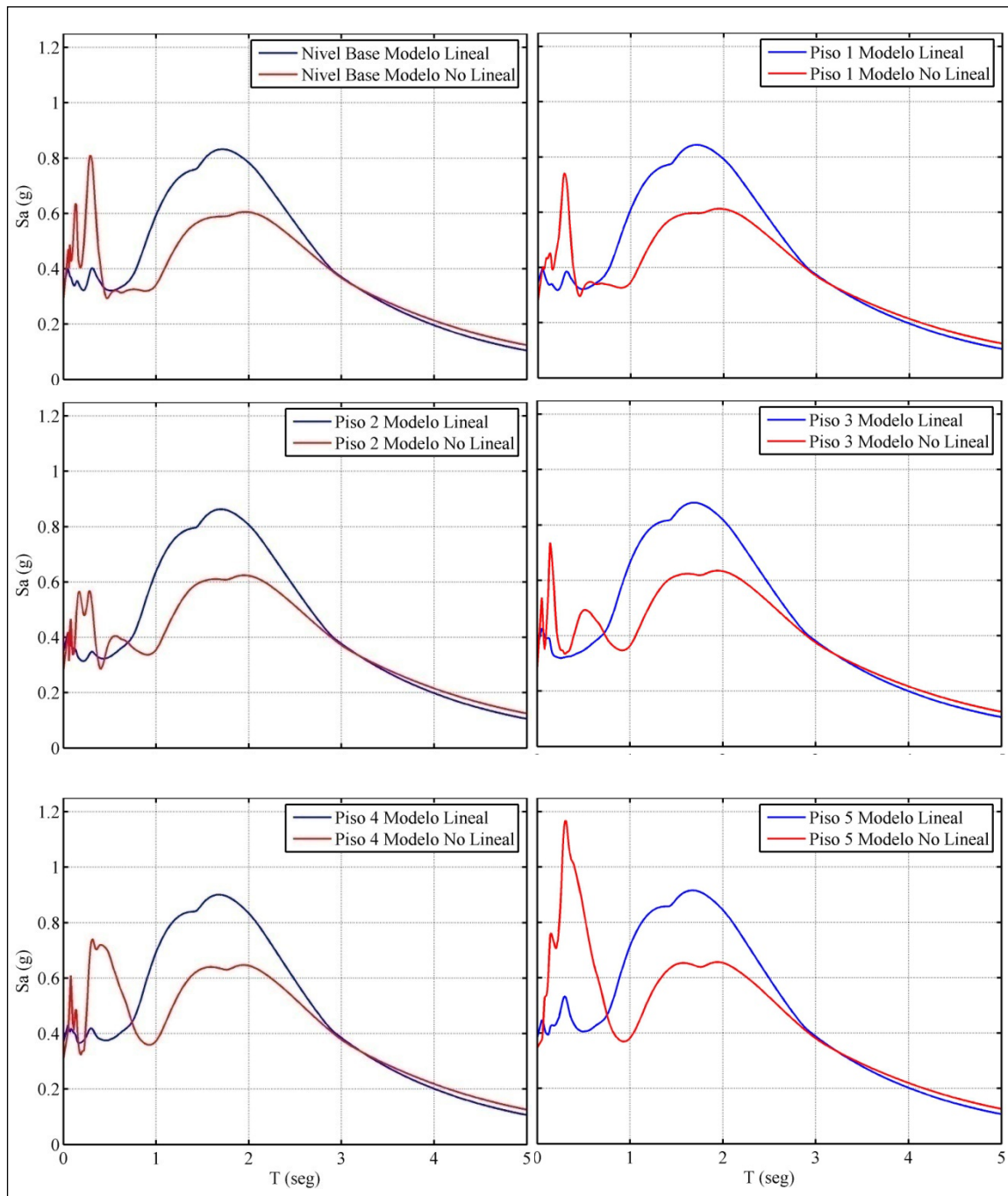


Figura 4-34 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I (amortiguamiento=0.05). Marco de 5 pisos.

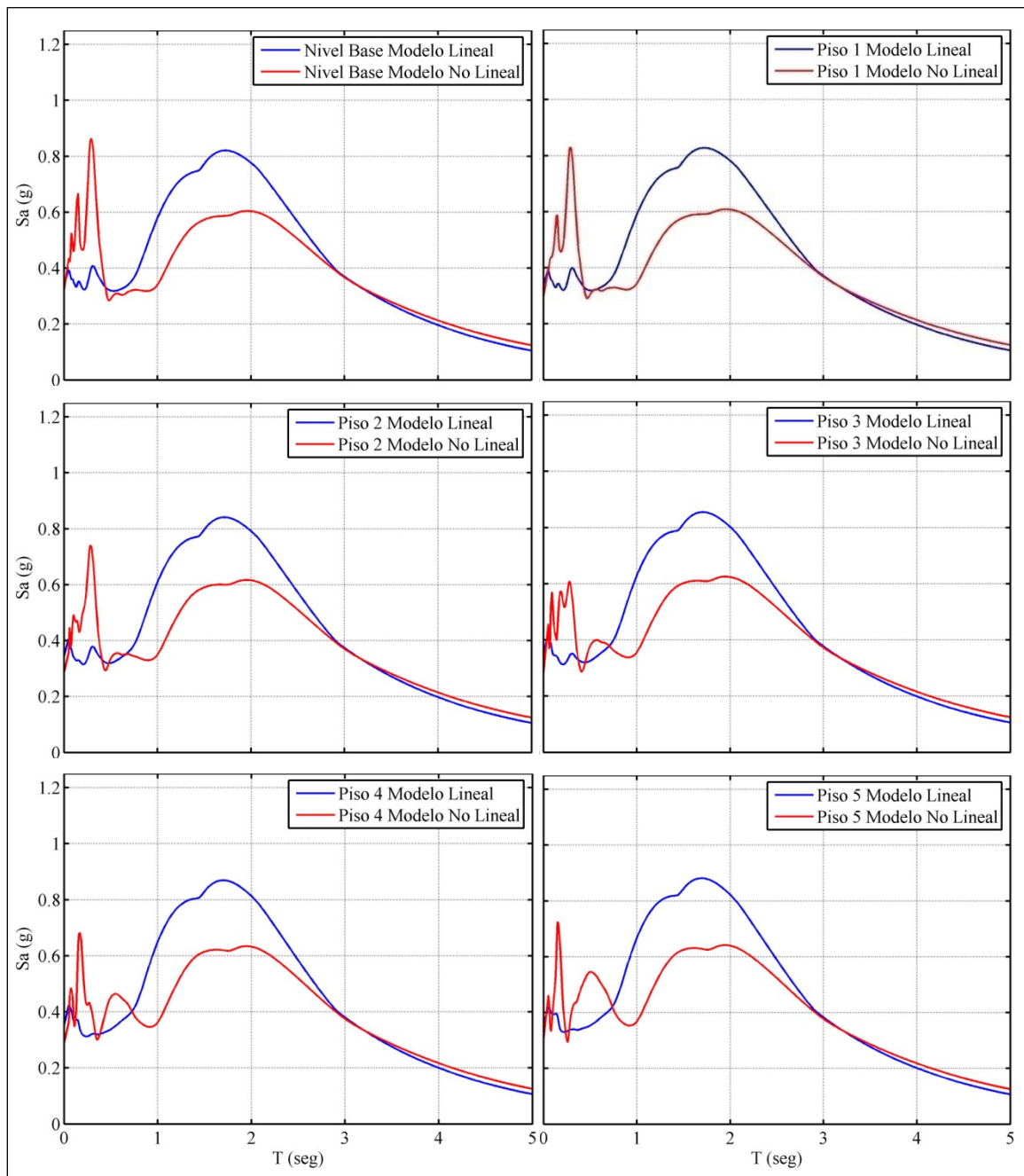


Figura 4-35 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I (amortiguamiento=0.05). Marco de 8 pisos.

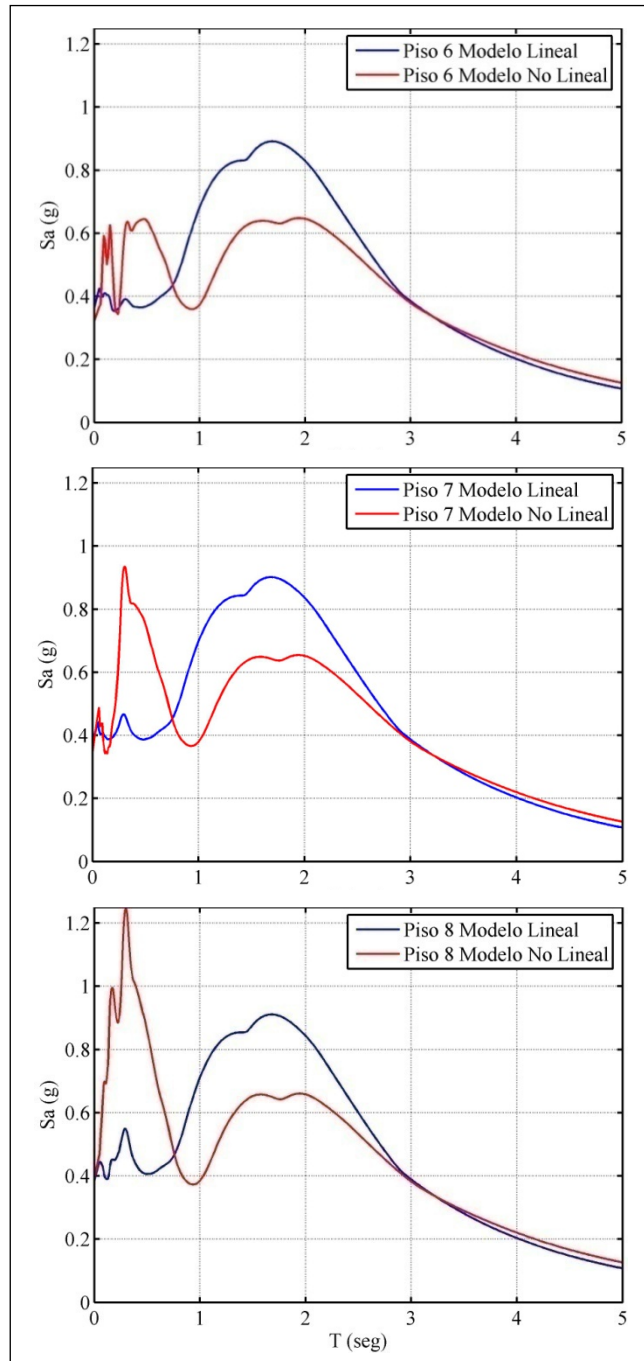


Figura 4-35 (continuación).

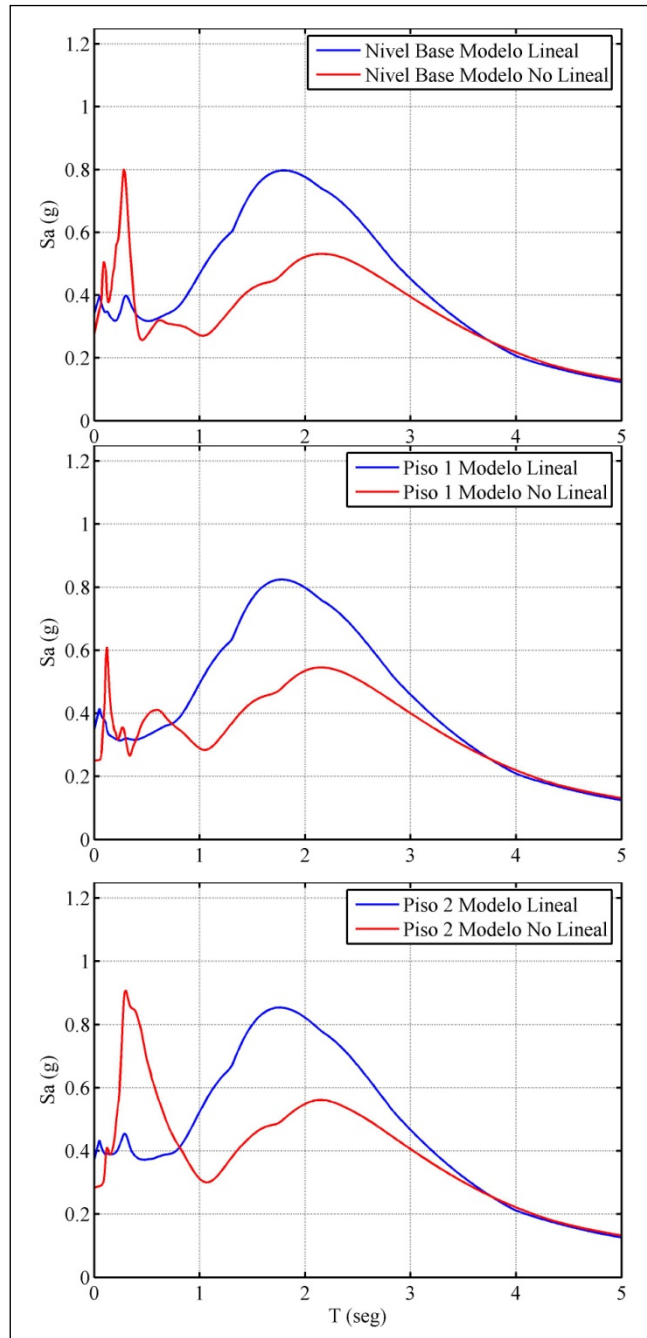


Figura 4-36 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II (amortiguamiento=0.05). Marco de 2 pisos.

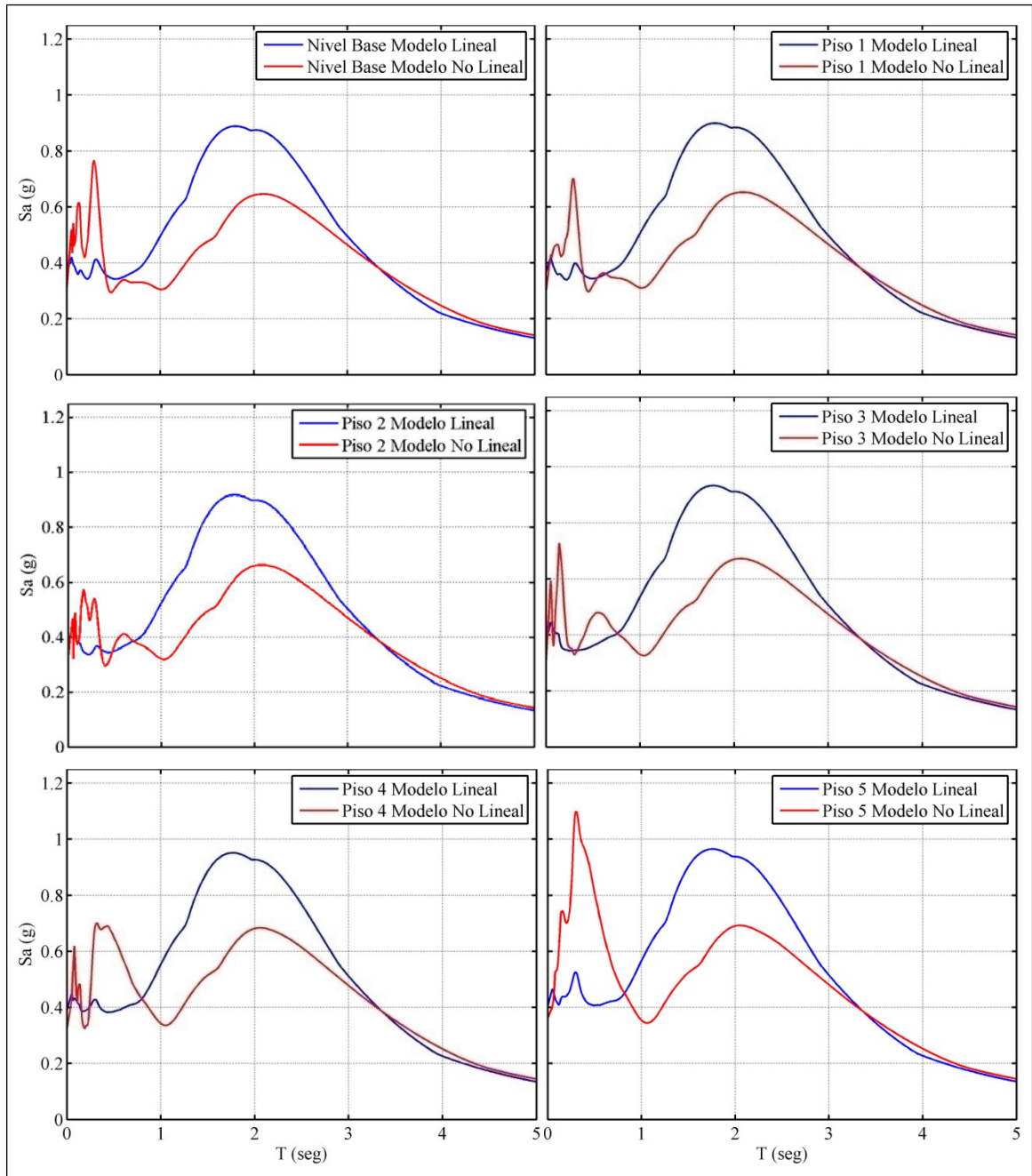


Figura 4-37 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II (amortiguamiento=0.05). Marco de 5 pisos.

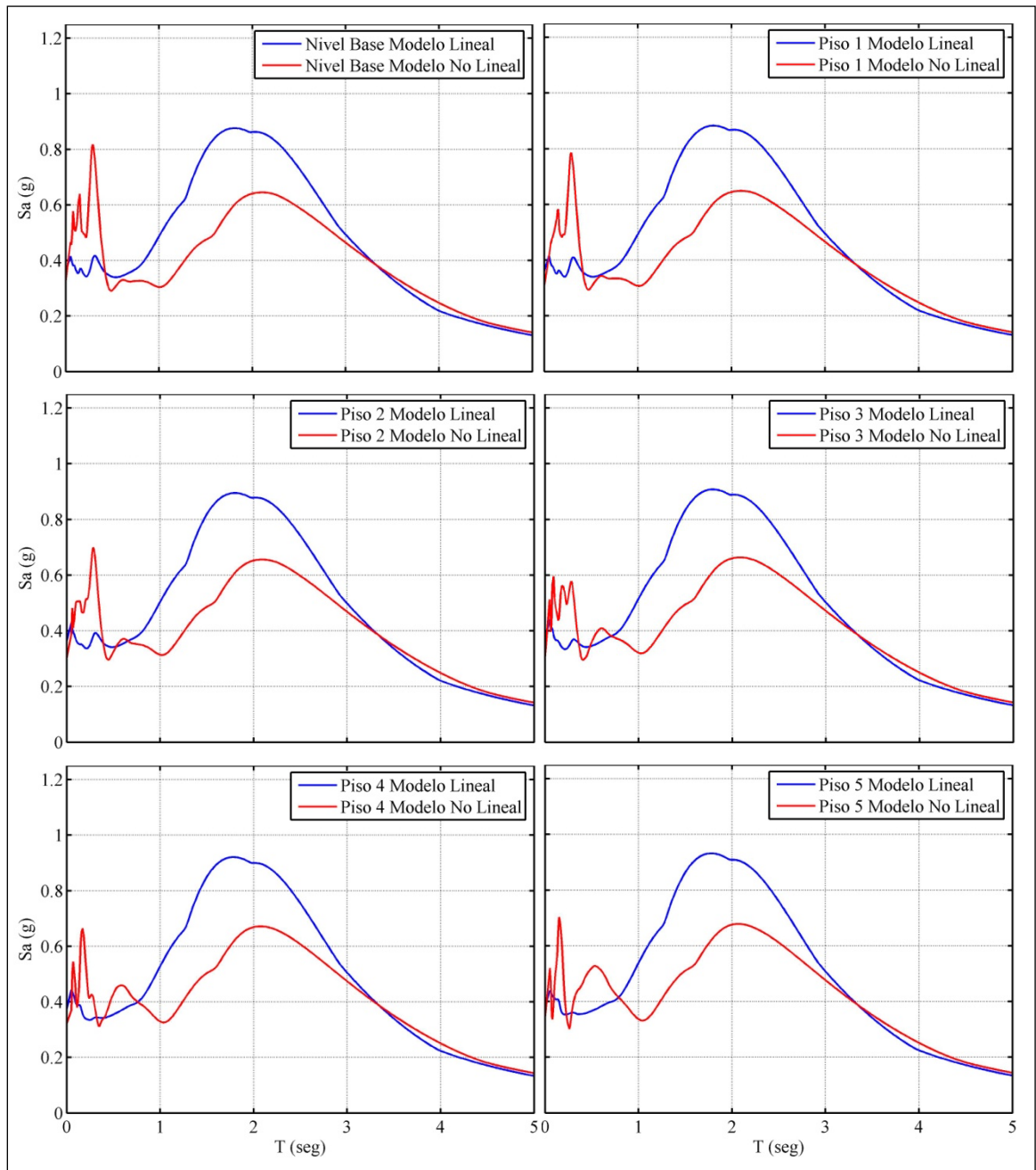


Figura 4-38 Espectros de piso de los sistemas lineales y no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II (amortiguamiento=0.05). Marco de 8 pisos.

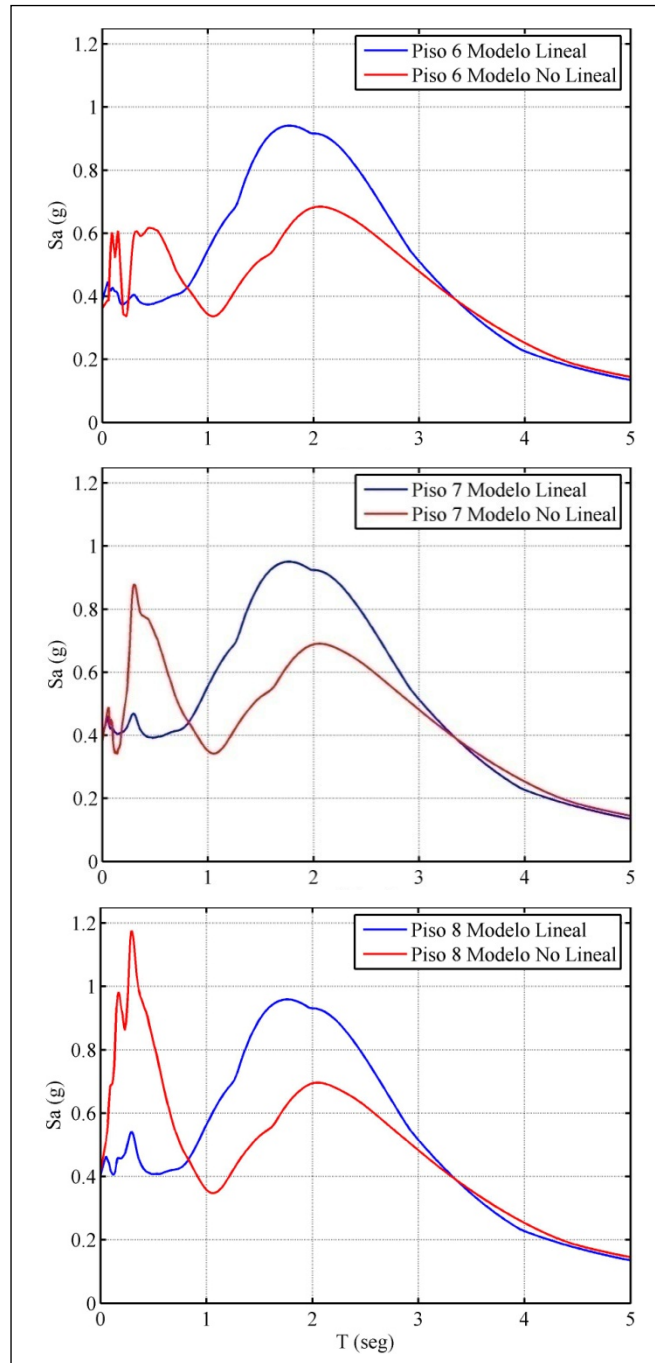


Figura 4-38 (continuación).

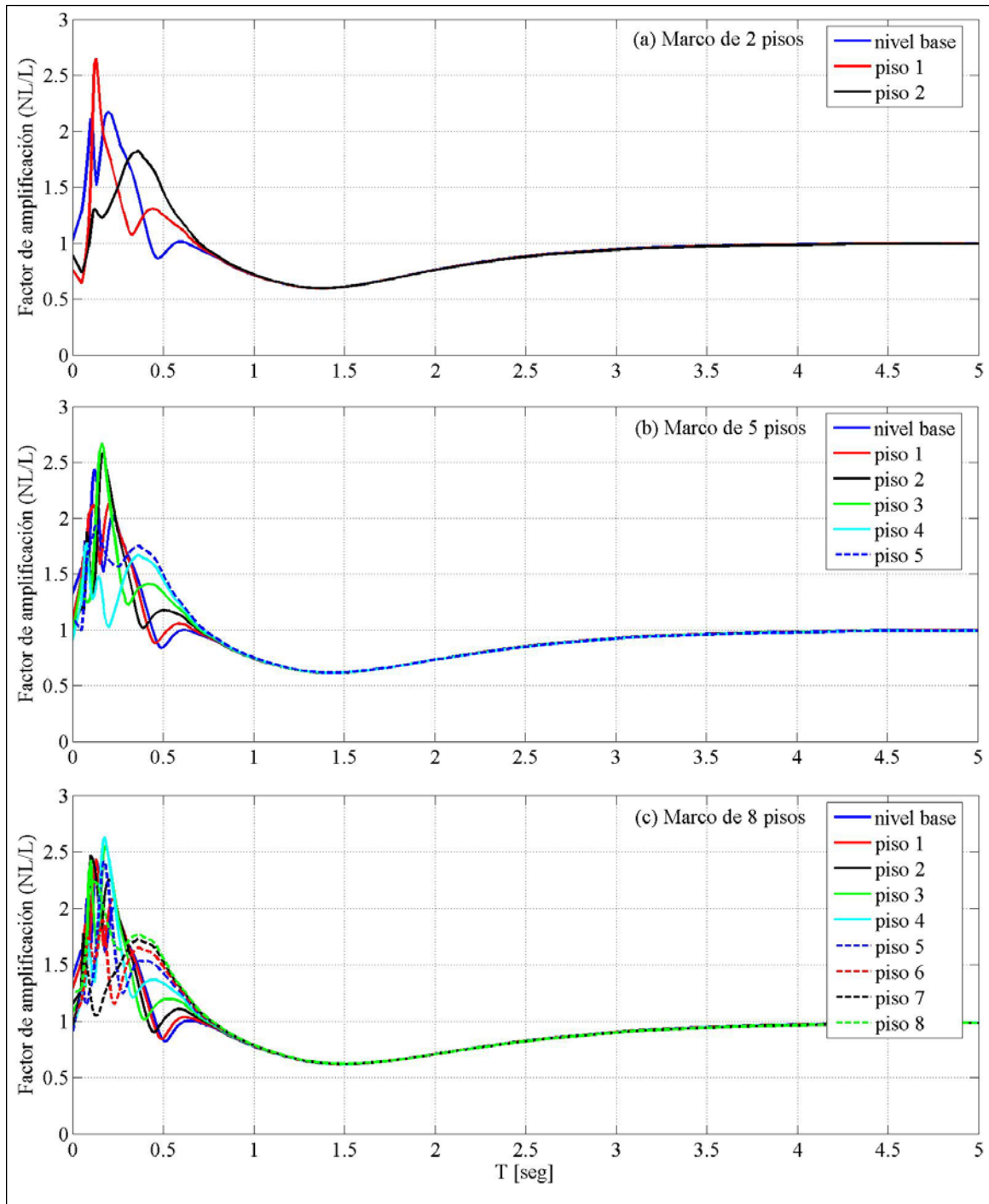


Figura 4-39 Relación entre espectros de piso de sistemas no lineales y lineales (amortiguamiento=0.05). Excitaciones de fuente Lejana.

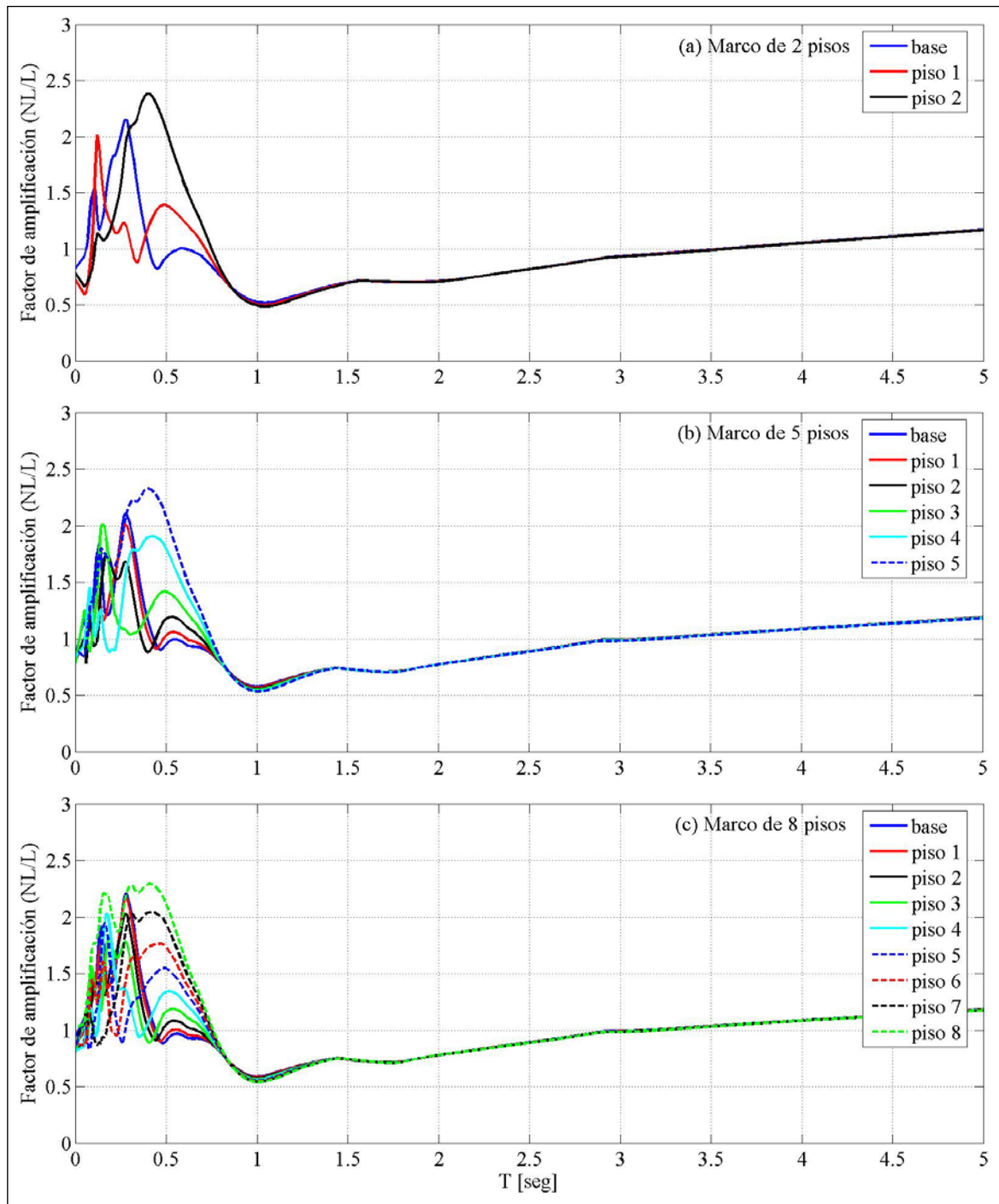


Figura 4-40 Relación entre espectros de piso de sistemas no lineales y lineales (amortiguamiento=0.05). Excitaciones de fuente Cercana I.

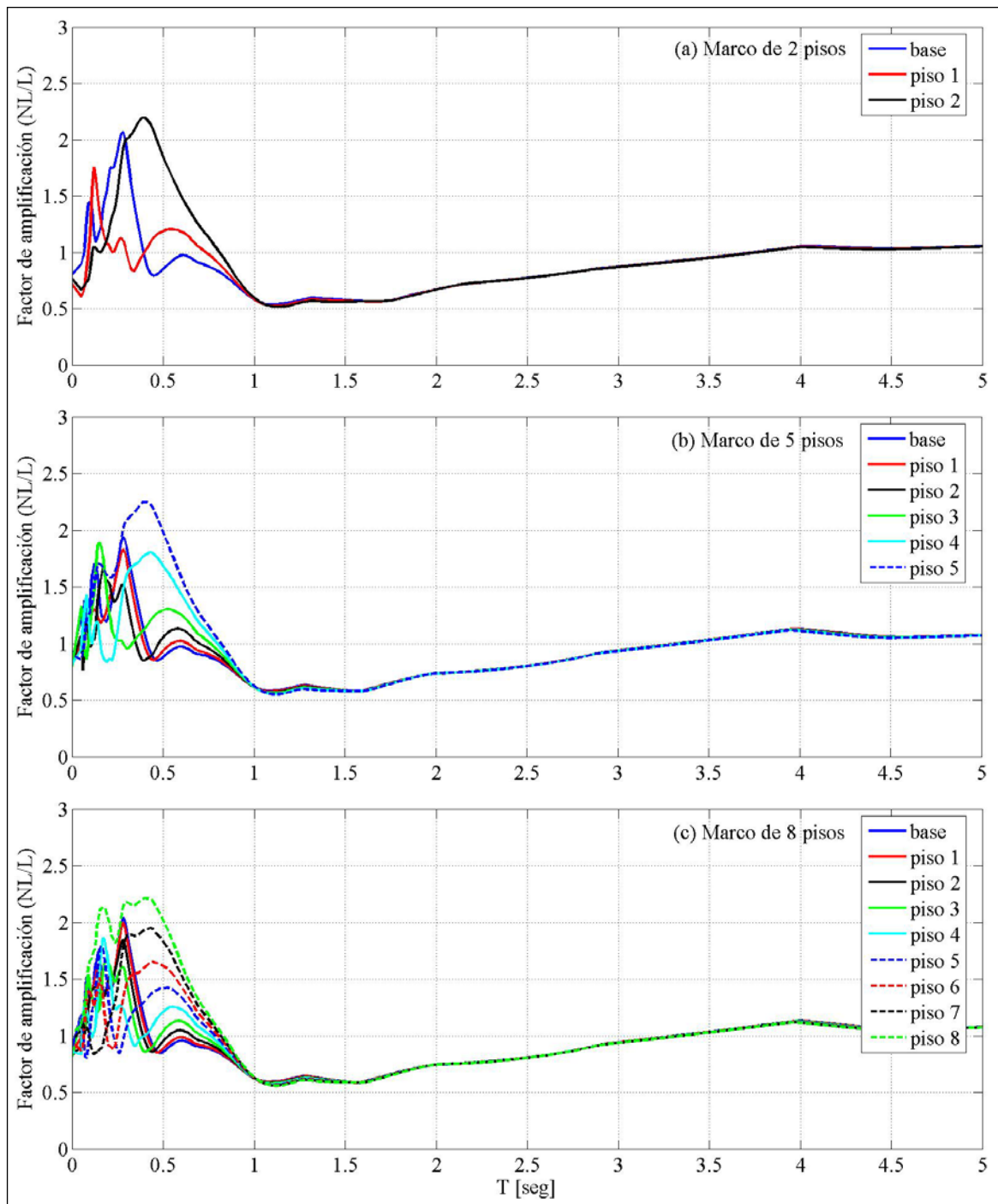


Figura 4-41 Relación entre espectros de piso de sistemas no lineales y lineales
(amortiguamiento=0.05). Excitaciones de fuente Cercana II.

5. EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO PARA ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES INDICADOS EN LAS NORMAS CHILENAS

Con el fin de evaluar la precisión de las disposiciones proporcionadas por las normas NCh2745 y NCh2369 para el diseño sísmico de elementos no estructurales (Sección 1.2), las aceleraciones de piso indicadas por estas normas son comparadas con las obtenidas mediante el proceso de simulación numérica (Capítulo 4). En el caso de los espectros de piso, en este capítulo interesa evaluar la “forma” espectral, razón por la cual se evalúa en realidad el espectro de piso normalizado por el valor del *PFA* correspondiente. Para evitar que la evaluación sea distorsionada por los errores en la estimación del valor del *PFA*, los espectros de piso indicados en las normas NCh2745 y NCh2369 se normalizan por los valores del *PFA* obtenidos de las simulaciones numéricas, i.e.:

$$\frac{PCA}{PFA} = K_p : (NCh2745) \quad (5.1)$$

$$\frac{PCA}{PFA} = 3.0K_p < 1.0 : (NCh2369) \quad (5.2)$$

Al igual que en el Capítulo 4, en este capítulo se considera que el valor de la respuesta de un sistema estructural dado a una excitación sísmica particular está dado por el valor promedio de los valores obtenidos para cada realización de la excitación.

5.1 Sistemas Lineales

5.1.1 Respuesta a la Excitación de Fuente Lejana

En la Figura 5-1 (I) se pueden observar los valores de la relación *PFA/PGA* de todas las estructuras sujetas a la excitación de fuente Lejana. Se grafican las relaciones *PFA/PGA*

obtenidas del proceso de simulación numérica y las obtenidas conforme a la norma NCh2745 usando un análisis modal espectral (AME) y un análisis estático (AE). En todos los casos, una de-amplificación del valor del *PGA* ocurre en todos los pisos, aunque los valores del *PFA* obtenidos de las simulaciones son consistentemente mayores a los obtenidos del AME y del AE. Las estimaciones del AME y AE son muy parecidas entre sí. Se observa además que los resultados de las simulaciones y los obtenidos mediante AME indican que los valores de la relación *PFA/PGA* tiende a aumentar levemente conforme aumenta la altura del nivel de piso.

Con el fin de evaluar el número de modos a considerar con el AME para obtener una buena estimación de la aceleración máxima de piso, en la Figura 5-1 (II) se muestran resultados obtenidos mediante AME considerando: (a) todos los modos de la estructura; (b) el primer modo; y (c) los dos primeros modos. Se observa que las aceleraciones máximas de piso están asociadas principalmente al primer modo del edificio, ya que la contribución de los modos superiores es prácticamente despreciable.

En la Figura 5-2 a la Figura 5-4 se muestran los espectros de piso de todas las estructuras (amortiguamiento = 5%). Adicionalmente, se muestran los espectros de piso obtenidos con las normativas NCh2745 y NCh2369. Se observa que la norma NCh2745 predice de manera aceptable el espectro de piso en la zona del primer período modal de la estructura. En la zona de los modos superiores la predicción es no conservadora, sobre todo en los pisos superiores. La norma NCh2369 sobreestima de manera importante el espectro de piso en todo el rango de períodos.

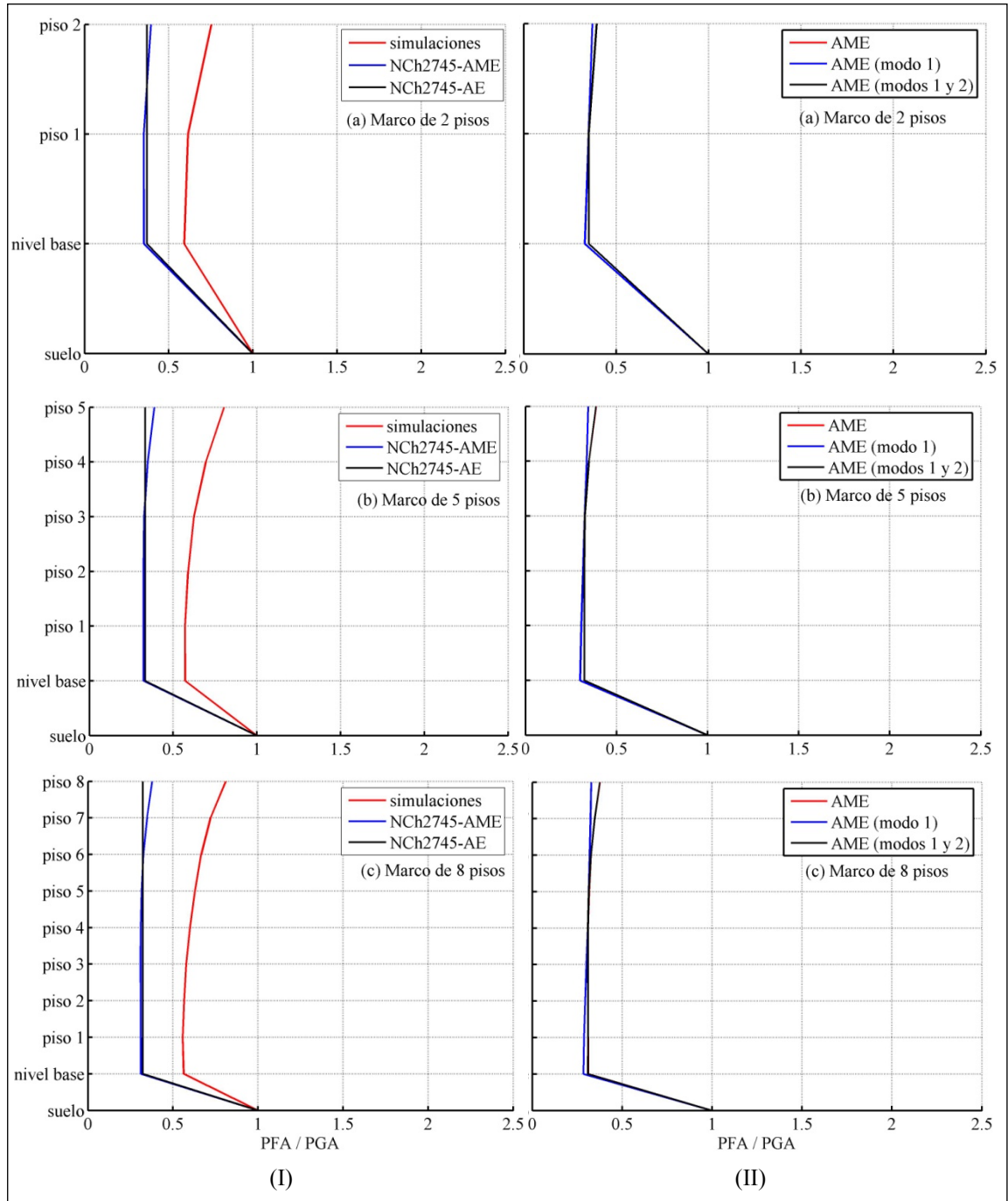


Figura 5-1 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: valores de la relación PFA/PGA : I) evaluación de la norma NCh2745; y II) evaluación del número de modos a considerar en el procedimiento AME de la norma NCh2745.

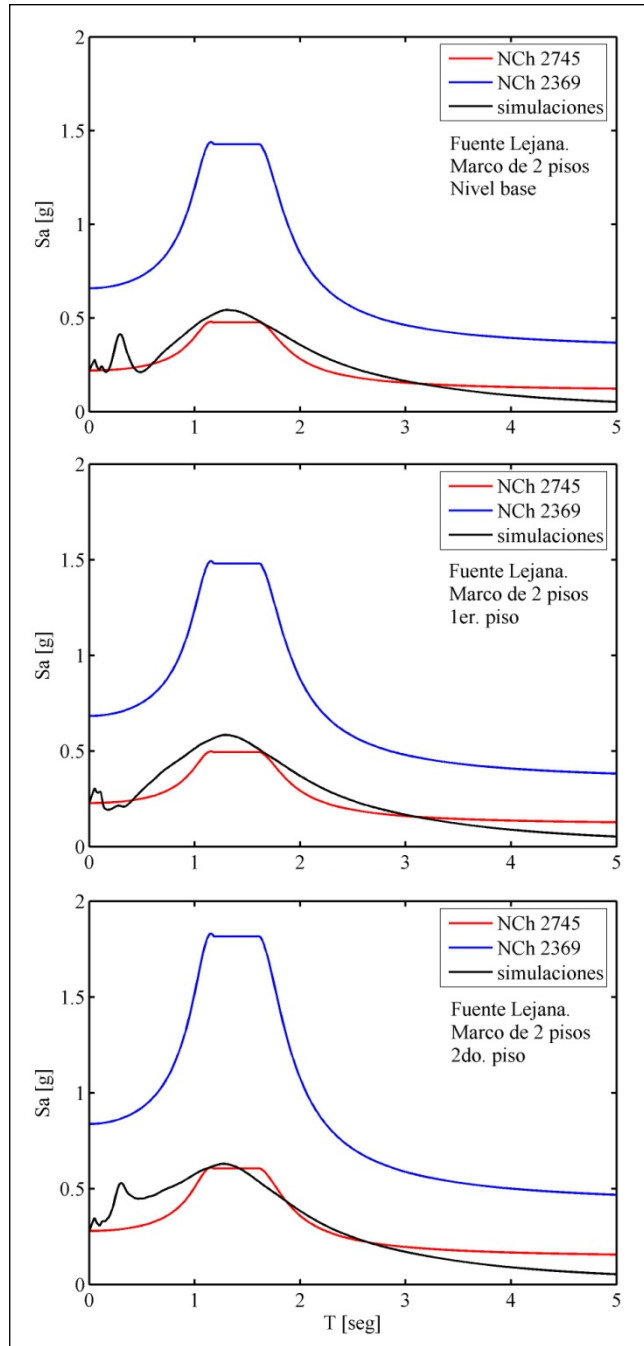


Figura 5-2 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.05).

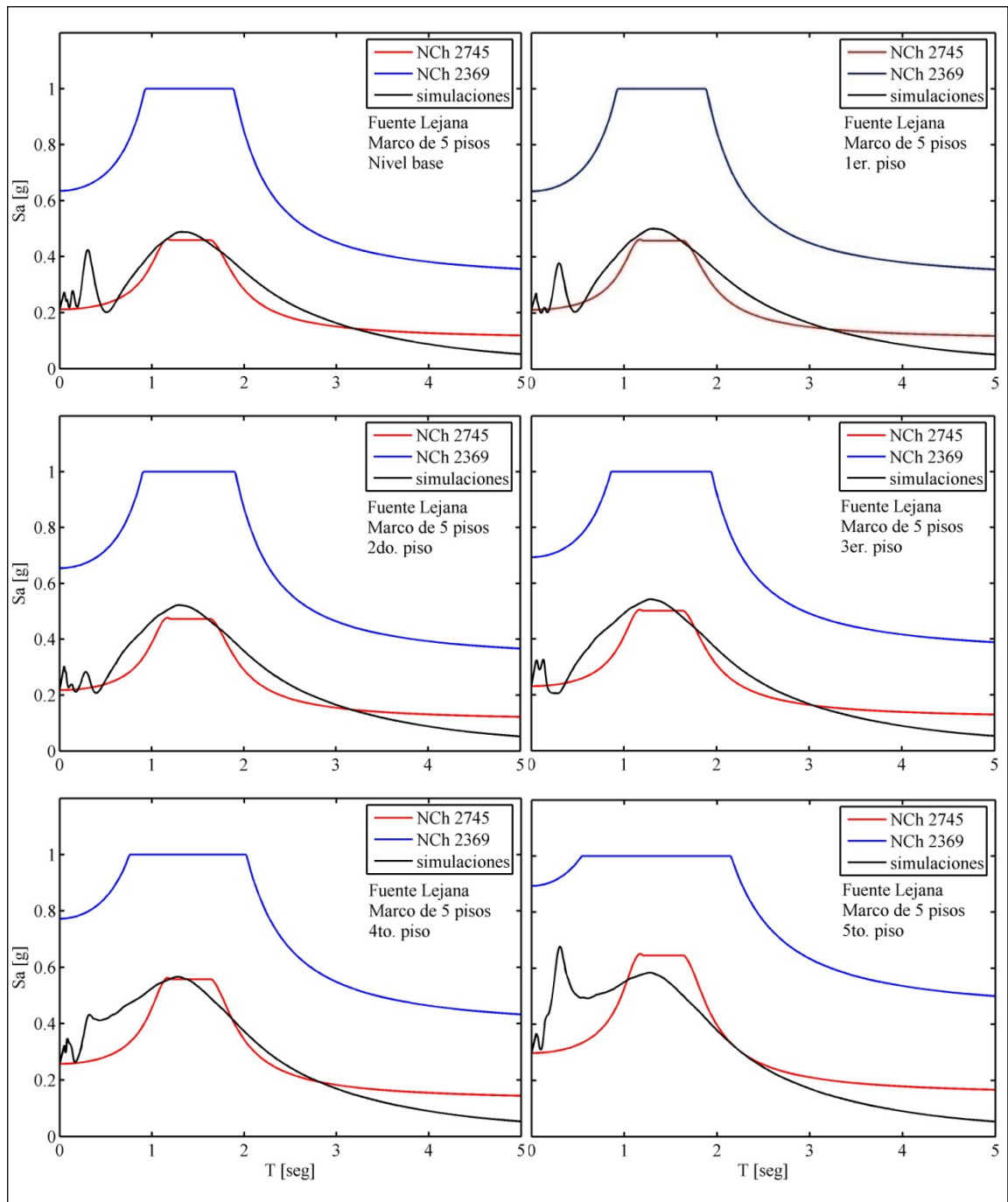


Figura 5-3 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.05).

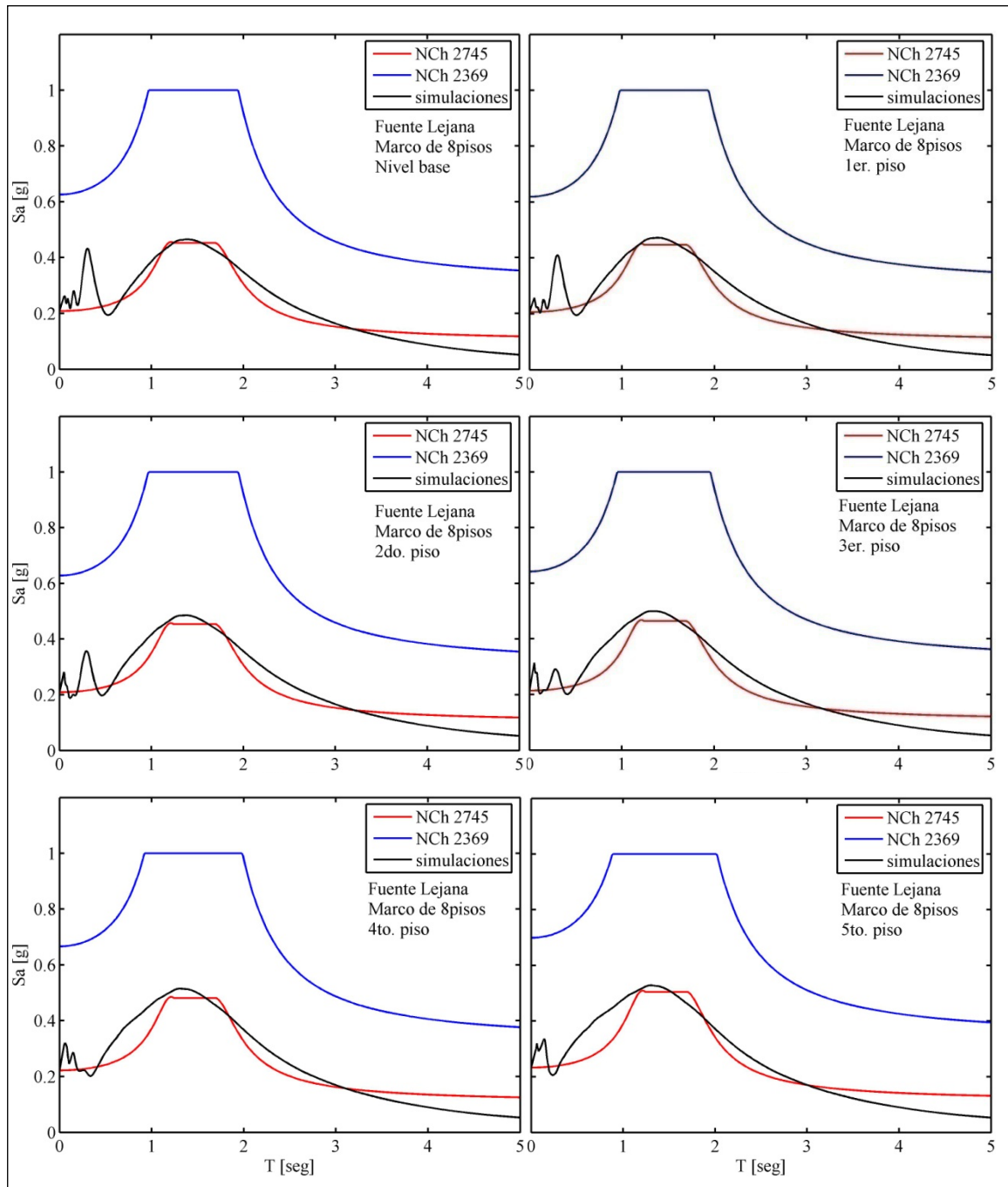


Figura 5-4 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.05).

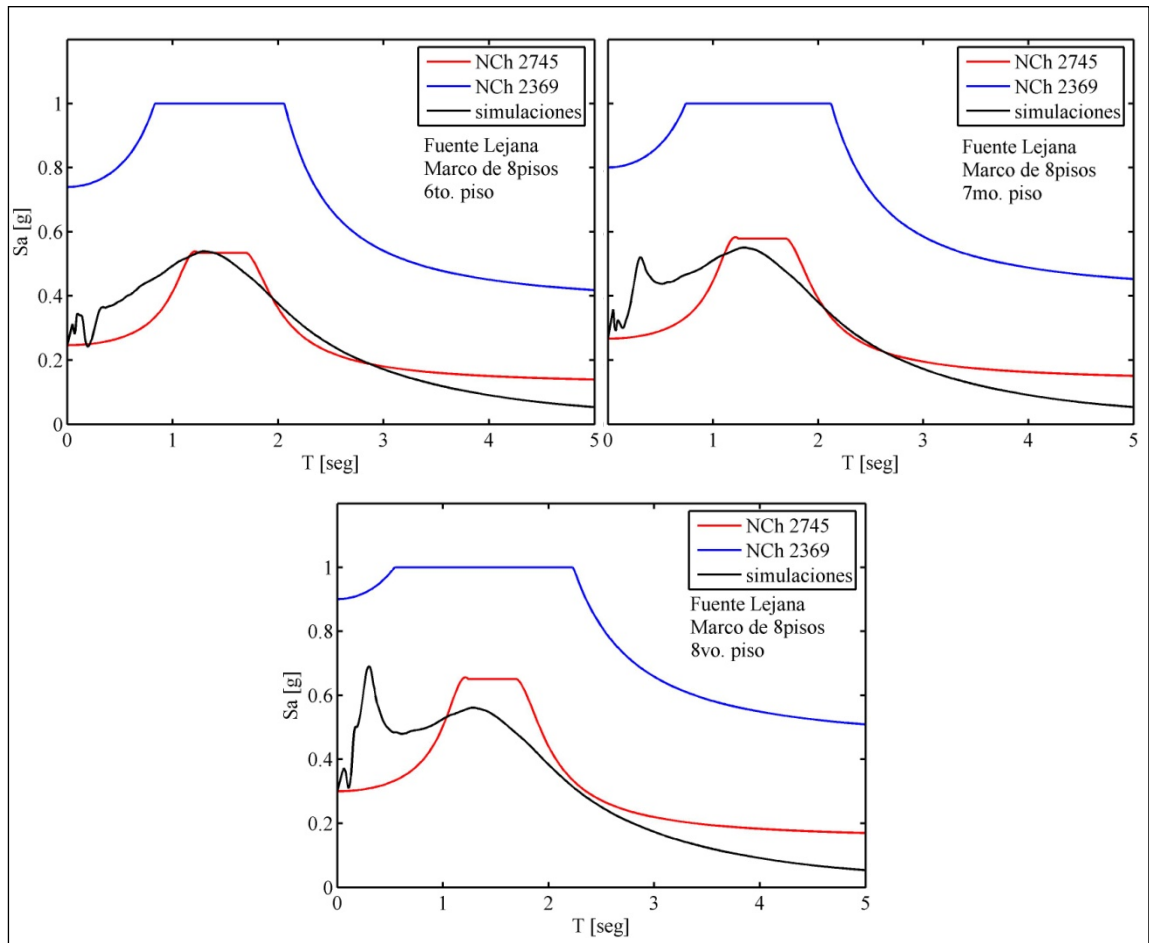


Figura 5-4 (continuación).

5.1.2 Respuesta a las Excitaciones de Fuente Cercana

En la Figura 5-5 (I) y en la Figura 5-6 (I) se pueden observar los valores de las relaciones PFA/PGA de todas las estructuras sujetas a las excitaciones de fuente Cercana I y fuente Cercana II, respectivamente. Se grafican los valores de las relaciones PFA/PGA obtenidas del proceso de simulación numérica y las obtenidas conforme a la norma NCh2745 usando el AME y el AE.

Se mantienen las mismas tendencias observadas para el caso de la excitación de fuente Lejana. Las relaciones PFA/PGA obtenidas para ambos tipos de excitaciones de fuente Cercana son muy similares entre sí.

En la Figura 5-5 (II) y en la Figura 5-6 (II) se muestran resultados obtenidos mediante AME considerando: (a) todos los modos de la estructura; (b) el primer modo; y (c) los dos primeros modos. Se observa que, al igual que en el caso de la excitación de fuente Lejana, las aceleraciones máximas de piso están asociadas principalmente al primer modo del edificio. Se concluye que cuando el AME es realizado, la consideración única del primer modo proporciona una buena aproximación de las aceleraciones obtenidas con la combinación completa, independiente del tipo de excitaciones sísmicas (de fuente Lejana o fuente cercana).

En la Figura 5-7 a la Figura 5-12 se muestran los espectros de piso de todas las estructuras (amortiguamiento = 5%). Adicionalmente, se muestran los espectros de piso obtenidos con las normativas NCh2745 y NCh2369. La estimación del espectro de piso de la norma NCh2745 en la zona del período fundamental es menos adecuada que la obtenida en el caso de la excitación de fuente Lejana, debido principalmente al efecto de la componente impulsiva de la excitación, el cual no es tenido en cuenta en el procedimiento indicado en la norma. Al contrario de lo observado en el caso de la excitación de fuente Lejana, el procedimiento de la norma NCh2745 estima de manera razonable el espectro de piso en la zona de los modos superiores. El espectro de piso indicado en la norma NCh2369 sigue siendo conservador en todo el rango de períodos, y muy conservador para períodos mucho mayores y mucho menores que el período fundamental. Es evidente que los procedimientos de ambas normativas están enfocados a estimar el espectro de piso sólo para elementos no estructurales de períodos naturales muy similares al período fundamental de la estructura.

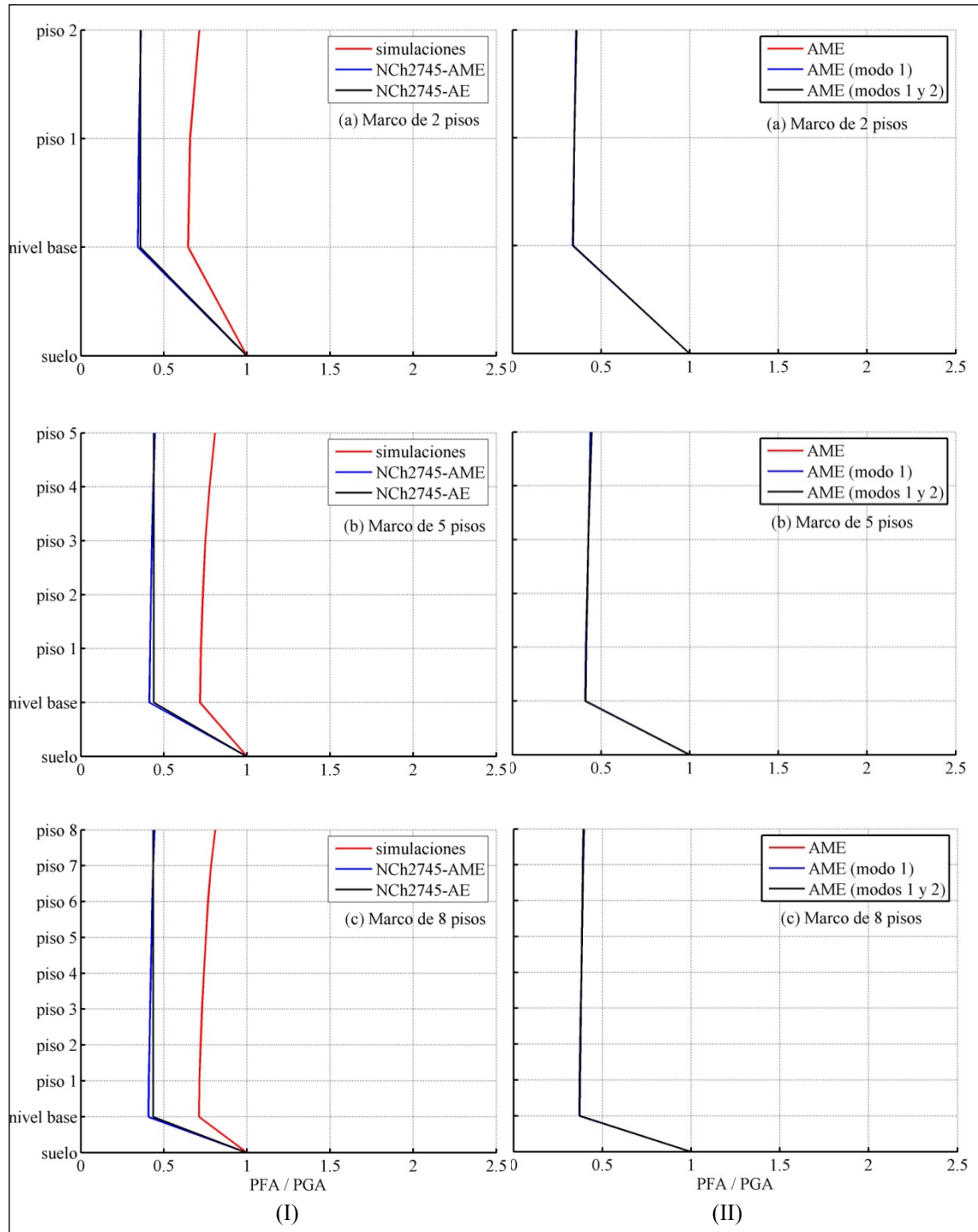


Figura 5-5 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I: valores de la relación PFA/PGA : I) evaluación de la norma NCh2745; y II) evaluación del número de modos a considerar en el procedimiento AME de la norma NCh2745.

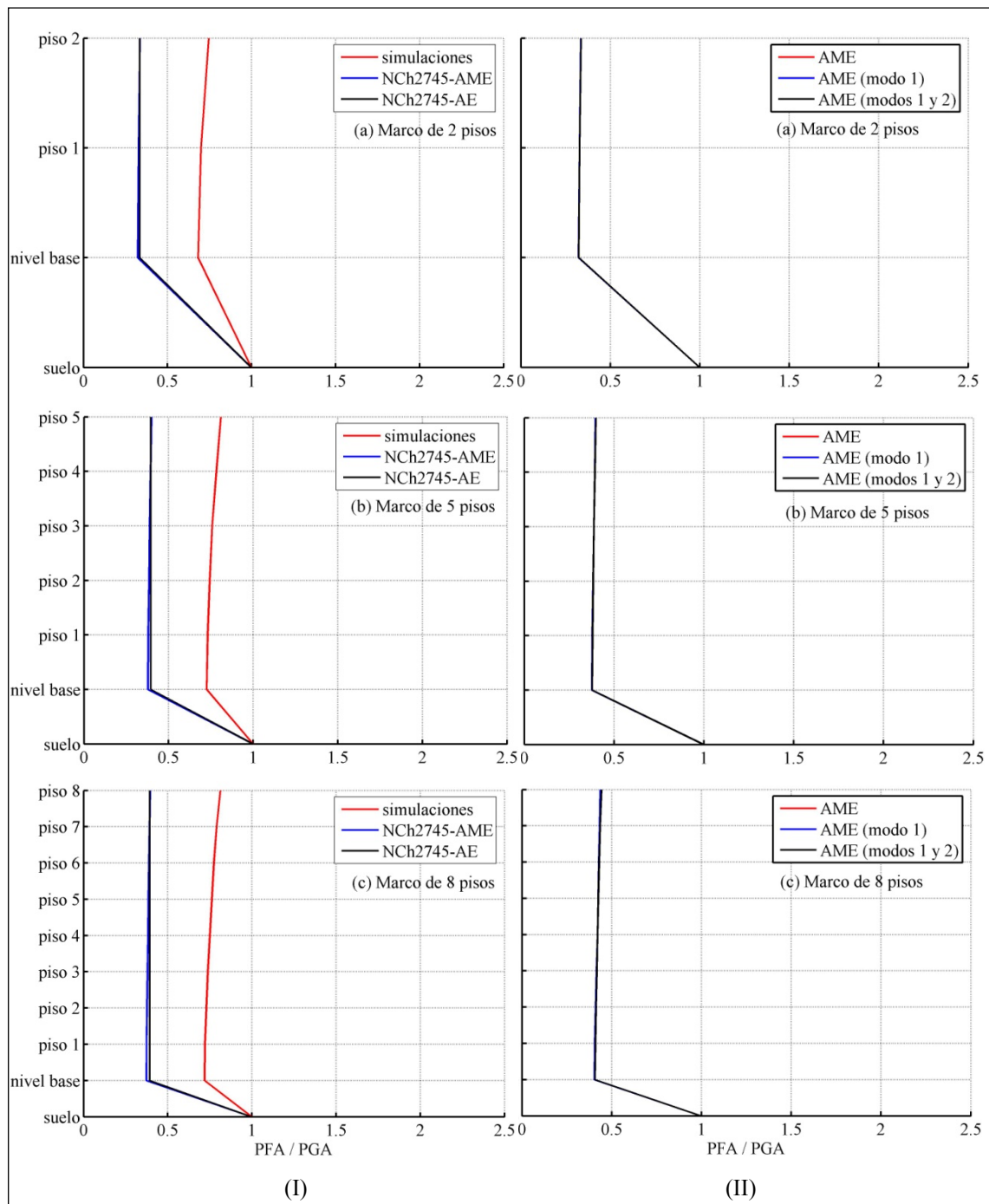


Figura 5-6 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II: valores de la relación PFA/PGA : I) evaluación de la norma NCh2745; y II) evaluación del número de modos a considerar en el procedimiento AME de la norma NCh2745.

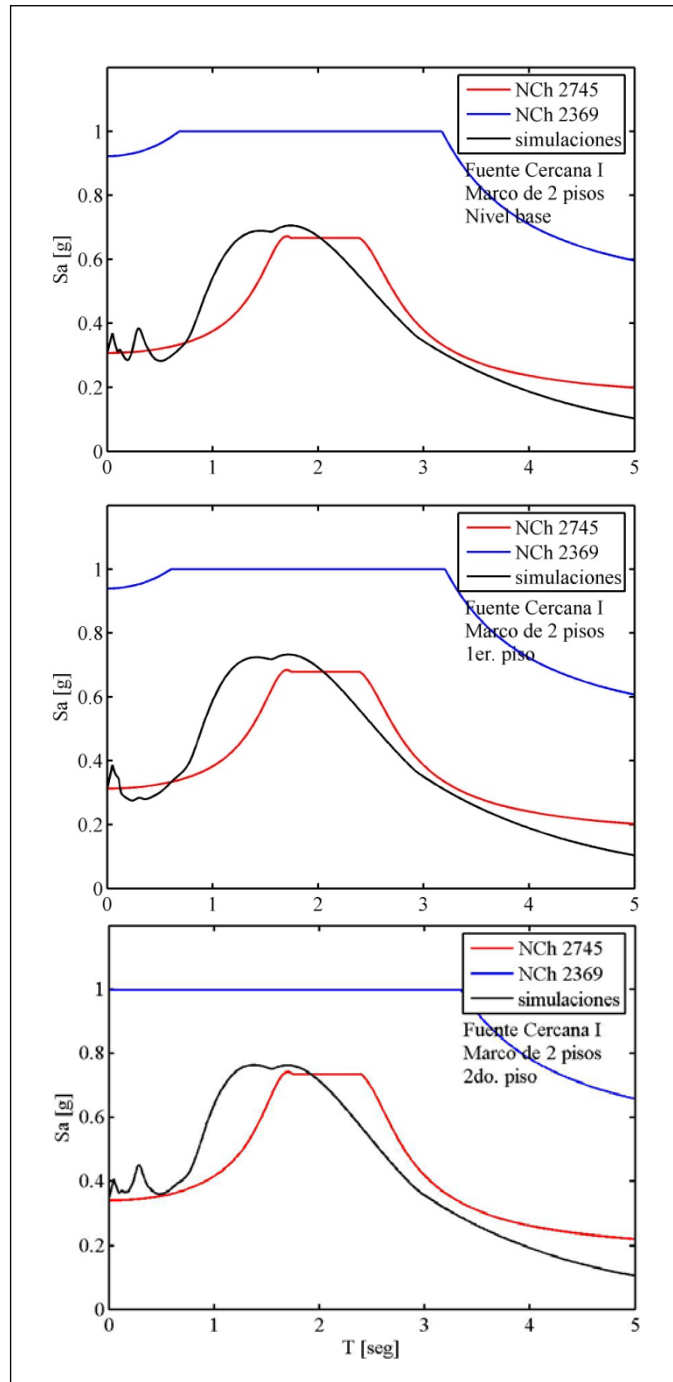


Figura 5-7 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.05).

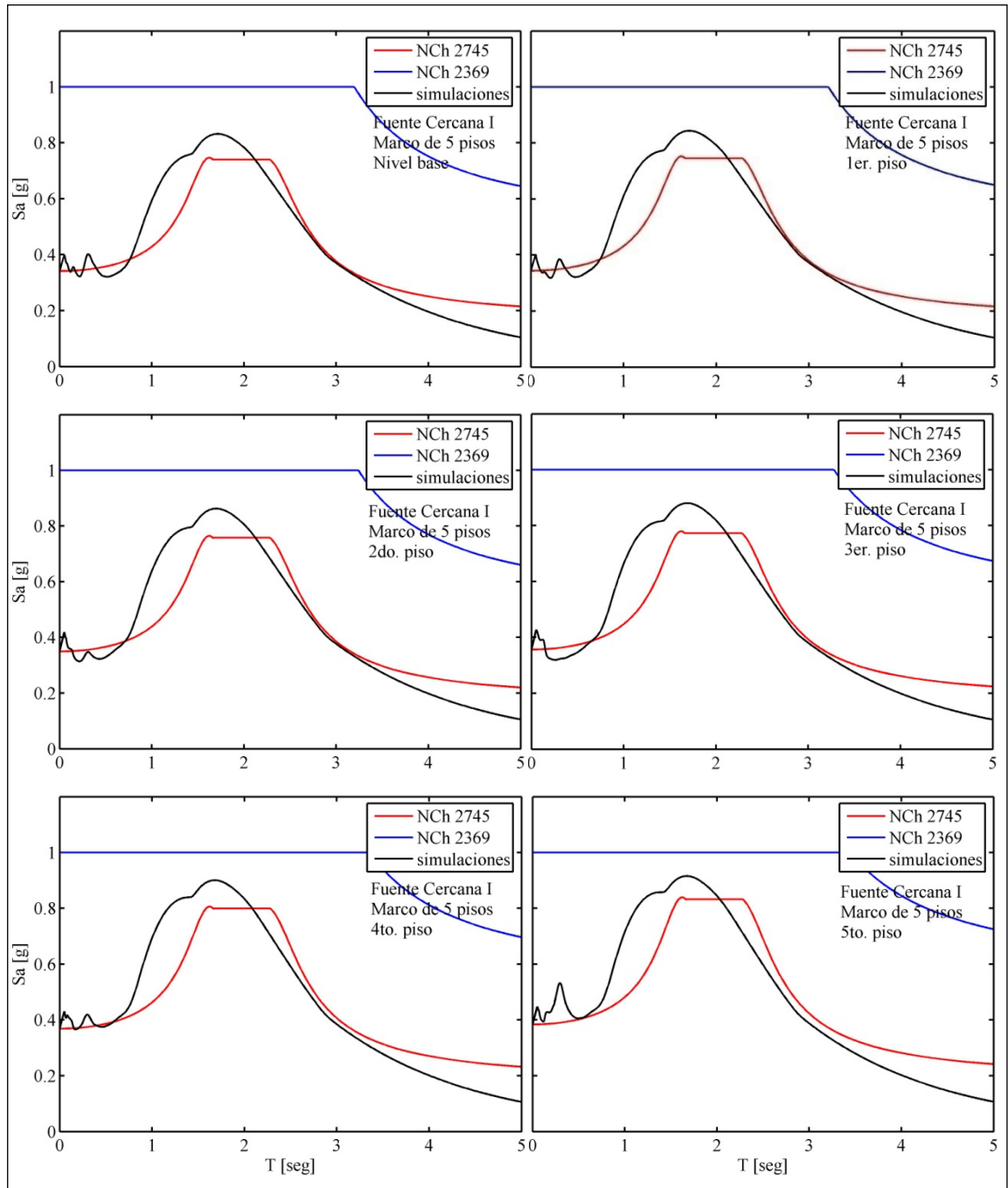


Figura 5-8 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.05).

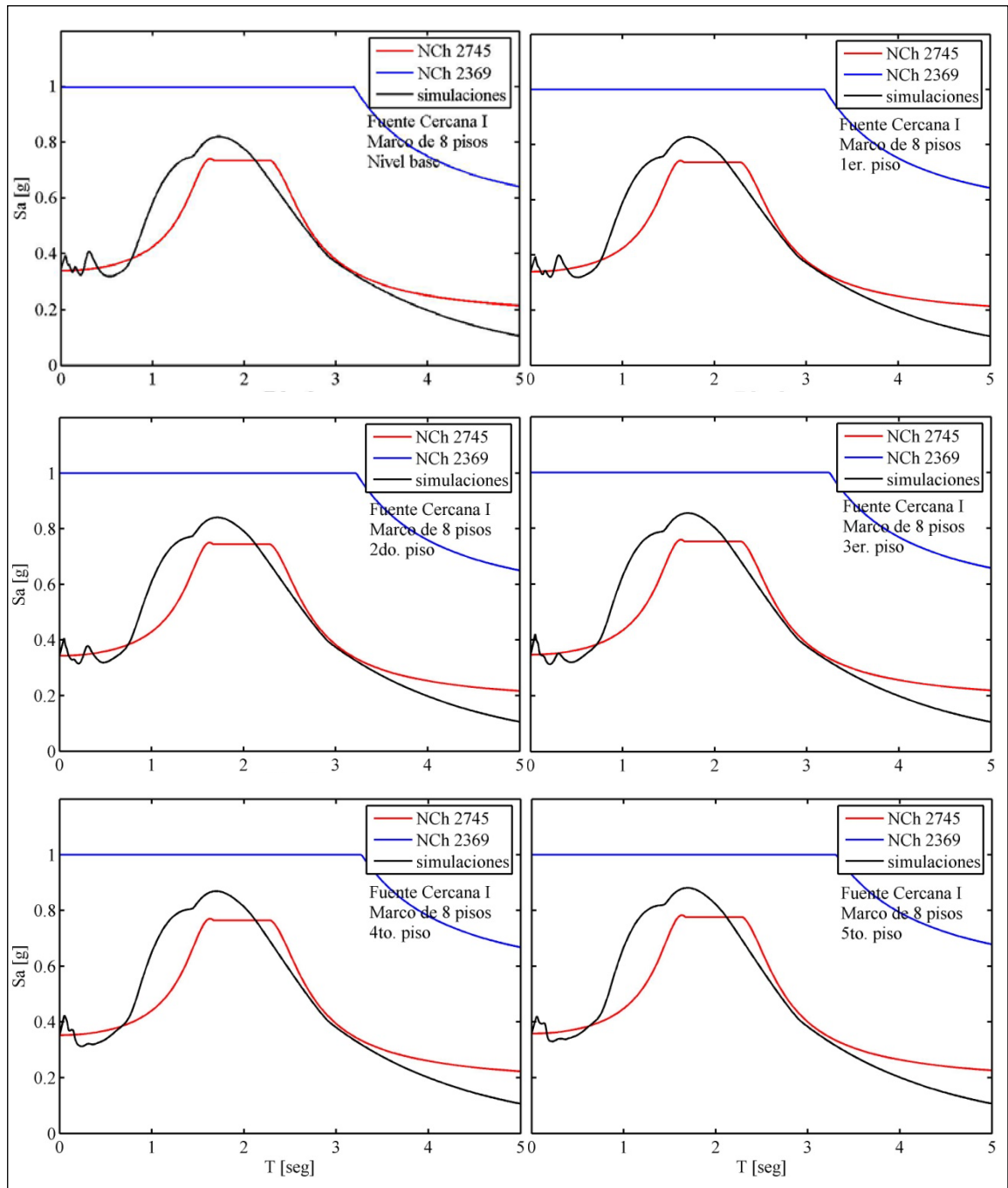


Figura 5-9 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.05).

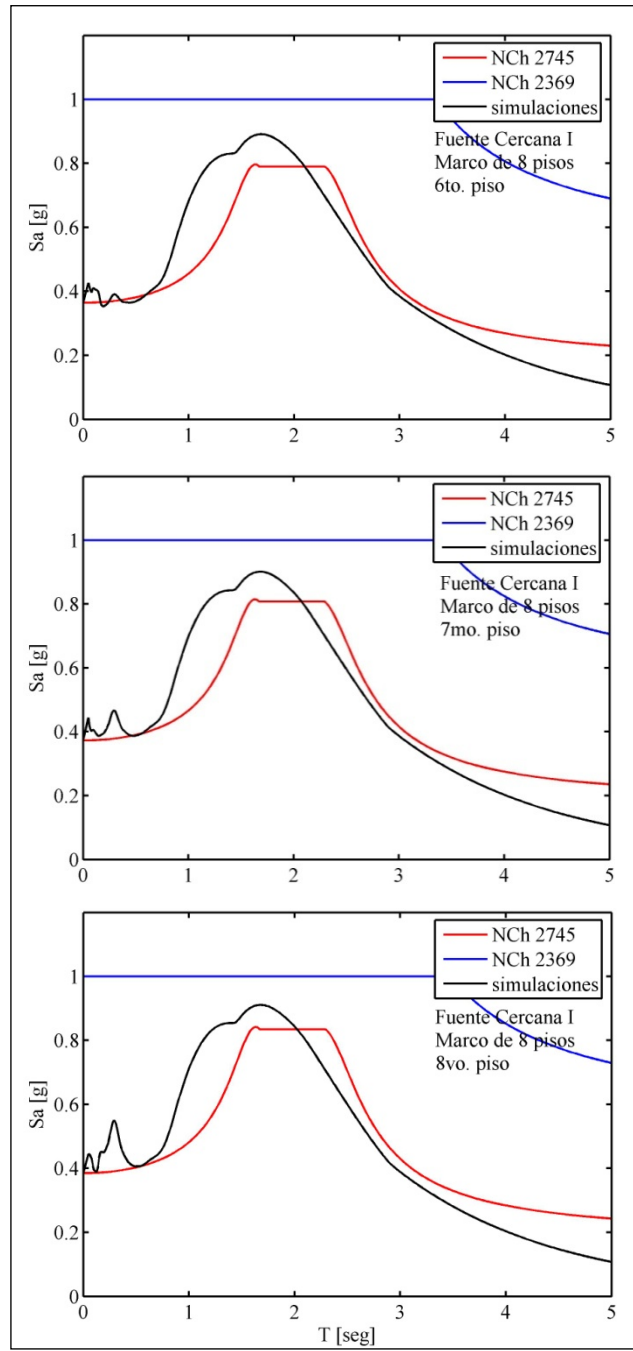


Figura 5-9 (continuación).

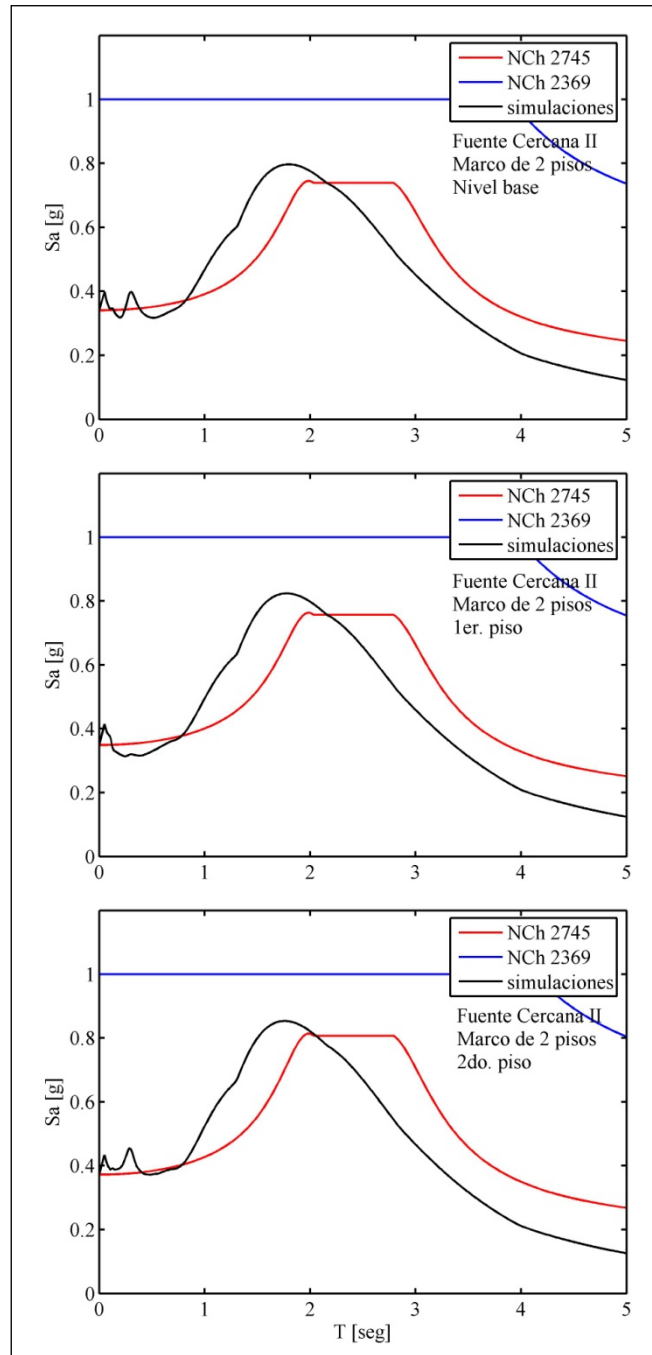


Figura 5-10 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.05).

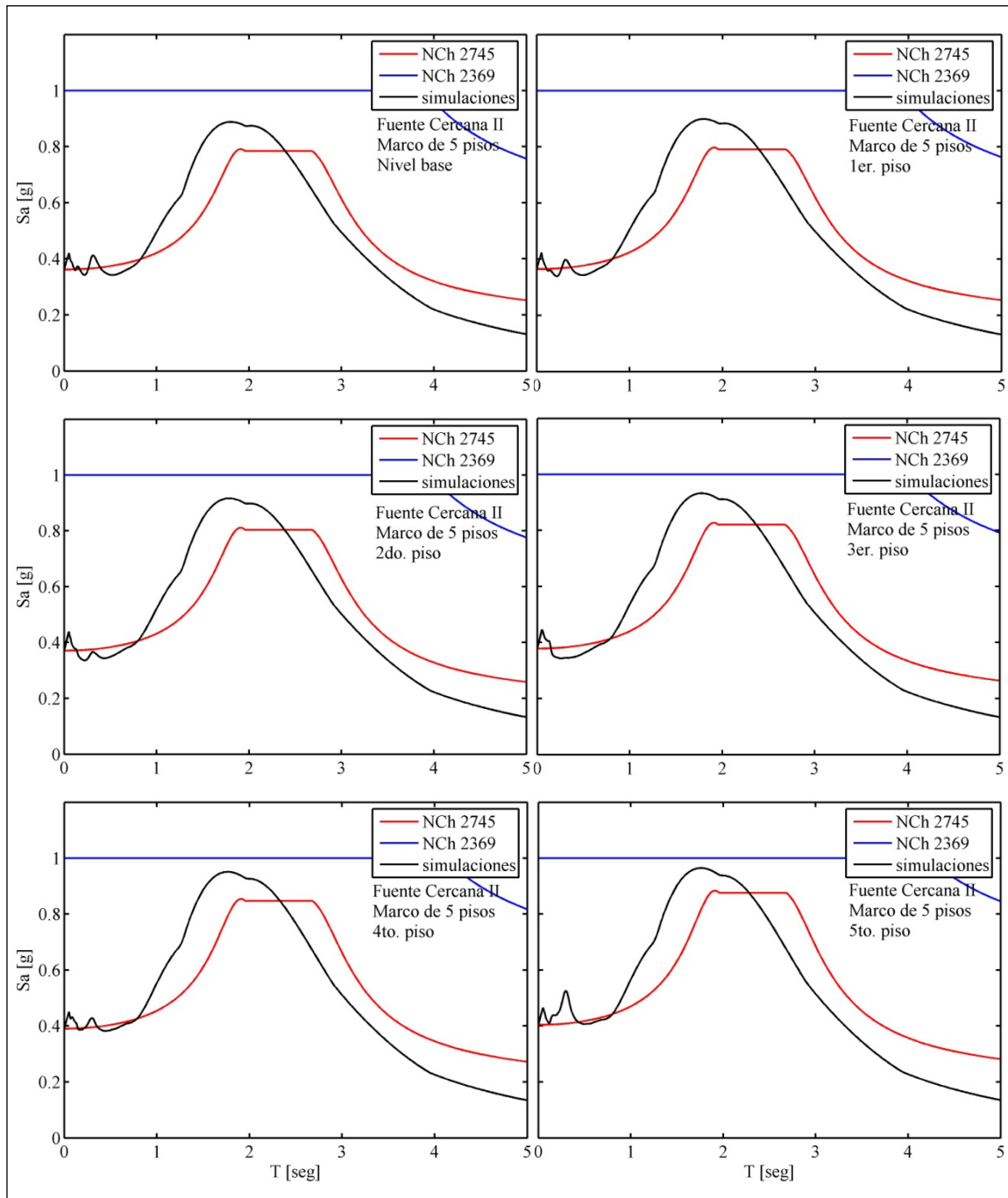


Figura 5-11 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.05).

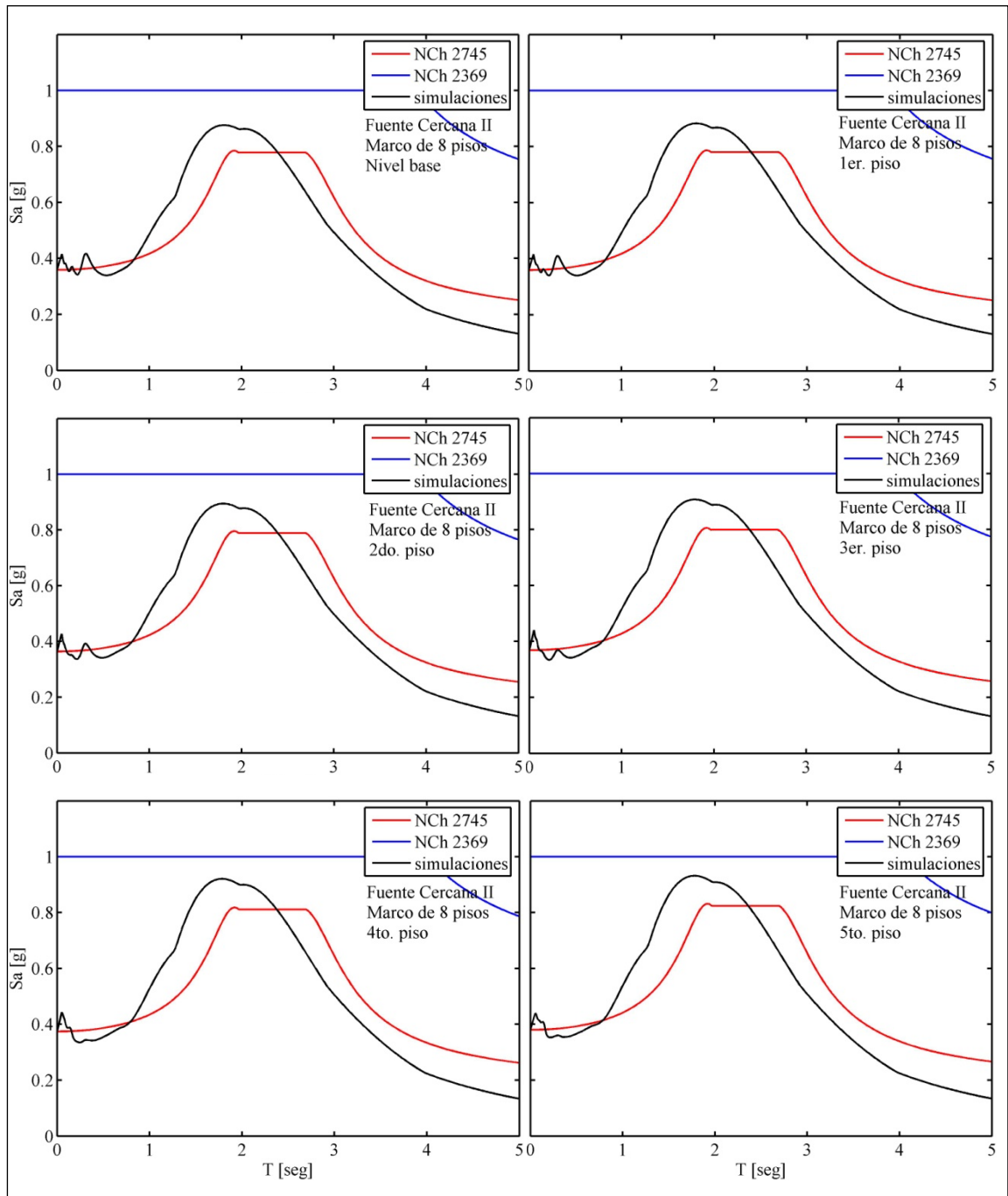


Figura 5-12 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.05).

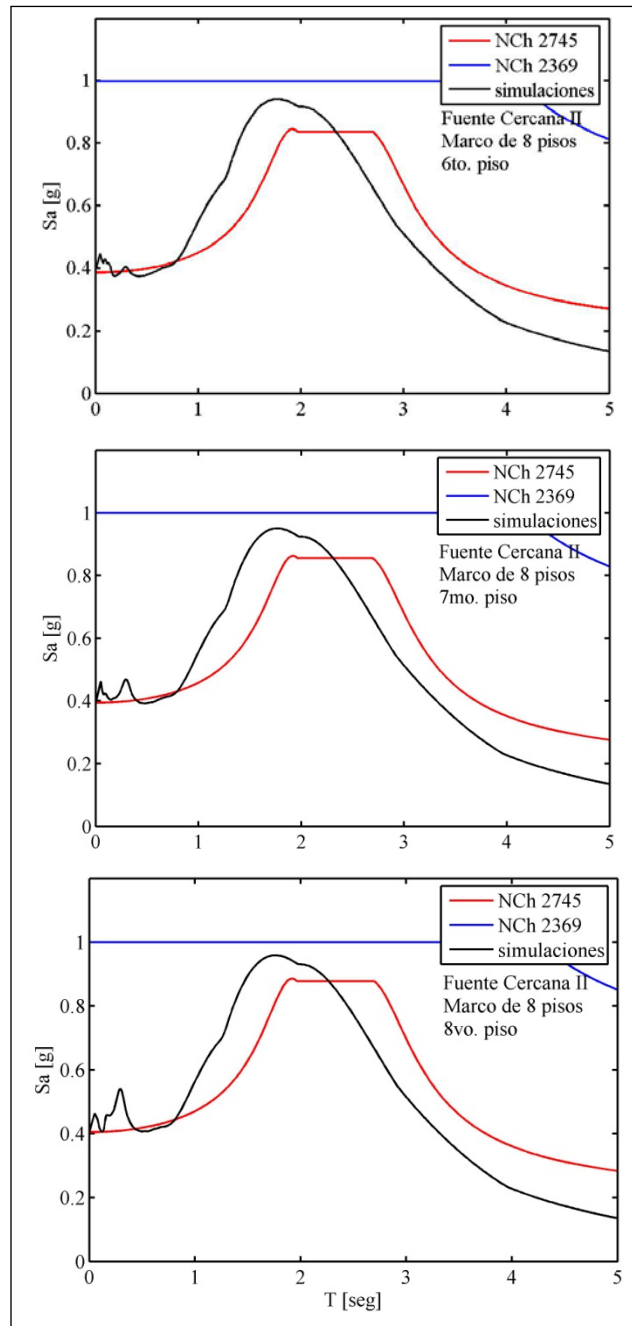


Figura 5-12 (continuación).

5.2 Sistemas No Lineales

Cabe aclarar que, debido a que las propiedades de los sistemas de aislación lineal son iguales a las propiedades efectivas de los correspondientes sistemas de aislación no lineal, los valores de la relación PFA/PGA obtenidos mediante AE y AME para excitaciones de fuente Lejana (Sección 5.2.1) y de fuente Cercana (Sección 5.2.2) son idénticos a los mostrados en la Figura 5-1, la Figura 5-5 y la Figura 5-6, respectivamente. En consecuencia, las conclusiones del análisis realizado en las secciones 5.1.1 y 5.1.2 acerca del número de modos que es necesario considerar en el AME también son válidas para el caso de sistemas de aislación no lineal (los resultados correspondientes son idénticos, y no es necesario mostrarlos nuevamente). Finalmente, debe tenerse en cuenta que, cuando en esta sección se haga referencia al “período fundamental” y a los “períodos superiores” de la estructura, se trata en realidad del período fundamental efectivo y los períodos superiores efectivos.

5.2.1 Respuesta a la Excitación de Fuente Lejana

En la Figura 5-13 se pueden observar los valores de las relaciones PFA/PGA de todas las estructuras sujetas a la excitación de fuente Lejana. Se grafican las relaciones obtenidas en el proceso de simulación numérica y las obtenidas conforme la norma NCh2745 (AME y AE). En general, se mantienen las mismas tendencias observadas en los sistemas lineales.

En la Figura 5-14 a la Figura 5-16 se muestran los espectros de piso de todas las estructuras (amortiguamiento = 5%). Adicionalmente, se muestran los espectros de piso obtenidos con las normativas NCh2745 y NCh2369. Se observa que la estimación de la norma NCh2745 en la zona del período fundamental de la estructura no es tan precisa como en el caso de los sistemas lineales (Sección 5.1.1). Además, la estimación de la norma NCh2745 en la zona de los períodos superiores de la estructura es, en general, no conservadora, sobre todo en los pisos superiores. Por otro lado, la norma NCh2369

sobreestima, en general, las aceleraciones de piso, excepto en algunos pisos intermedios y superiores en la zona de los períodos superiores.

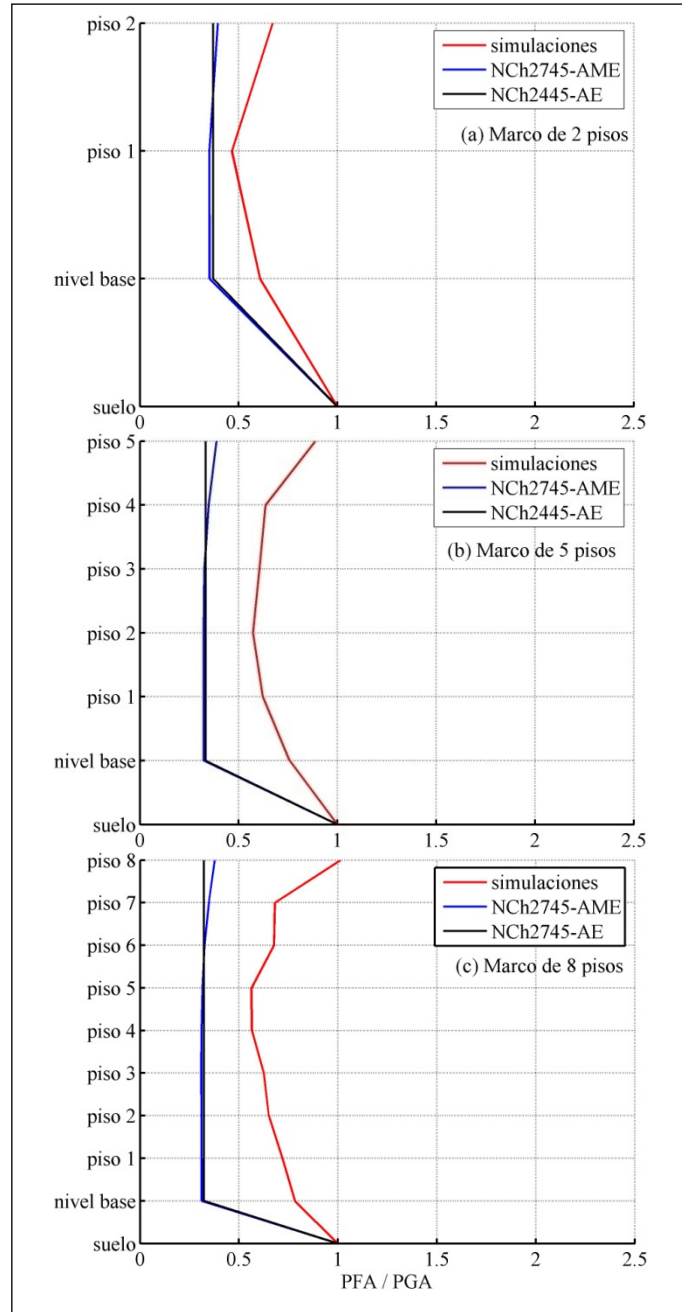


Figura 5-13 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: valores de la relación PFA/PGA : evaluación de la norma NCh2745.

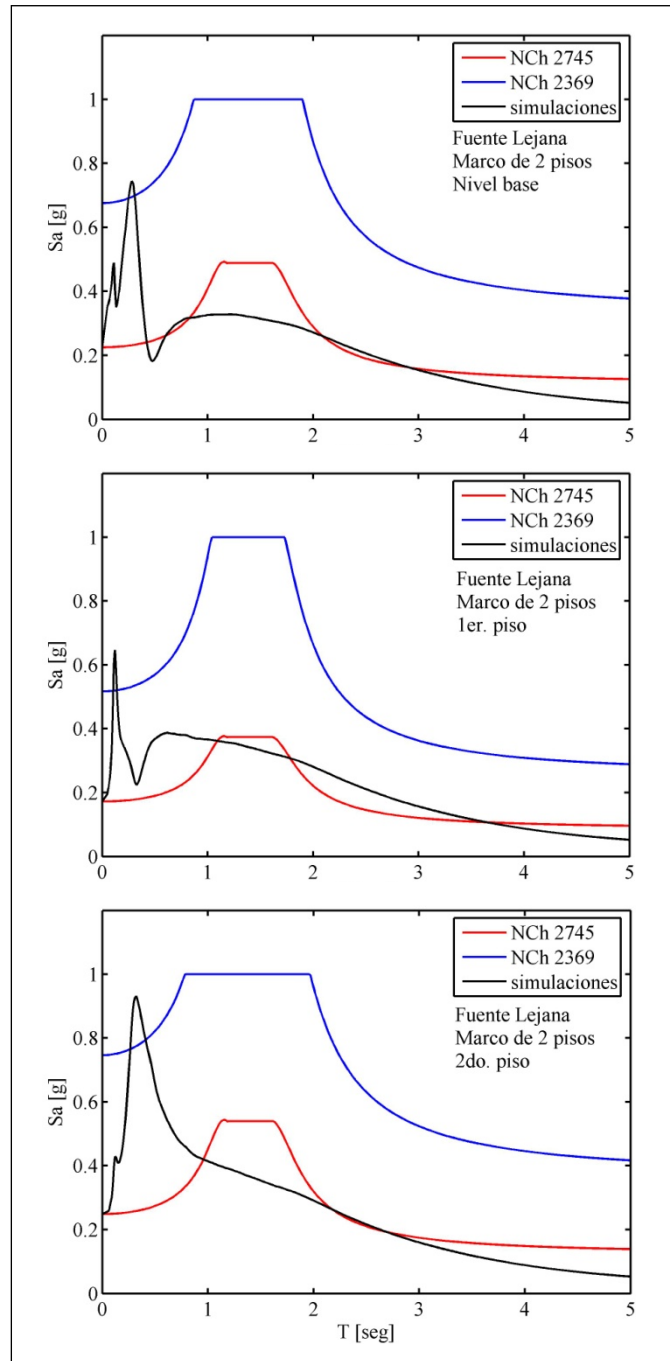


Figura 5-14 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.05).

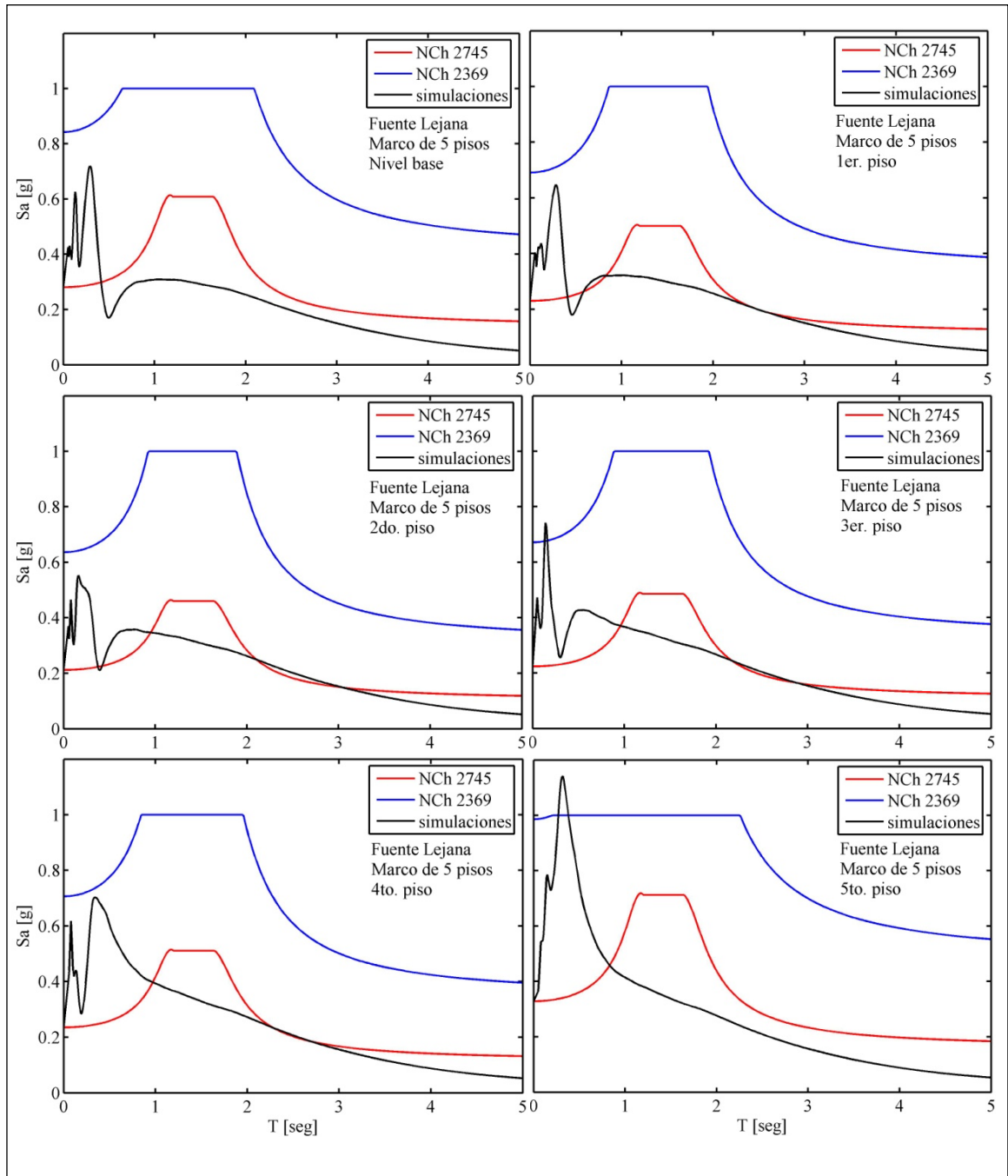


Figura 5-15 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.05).

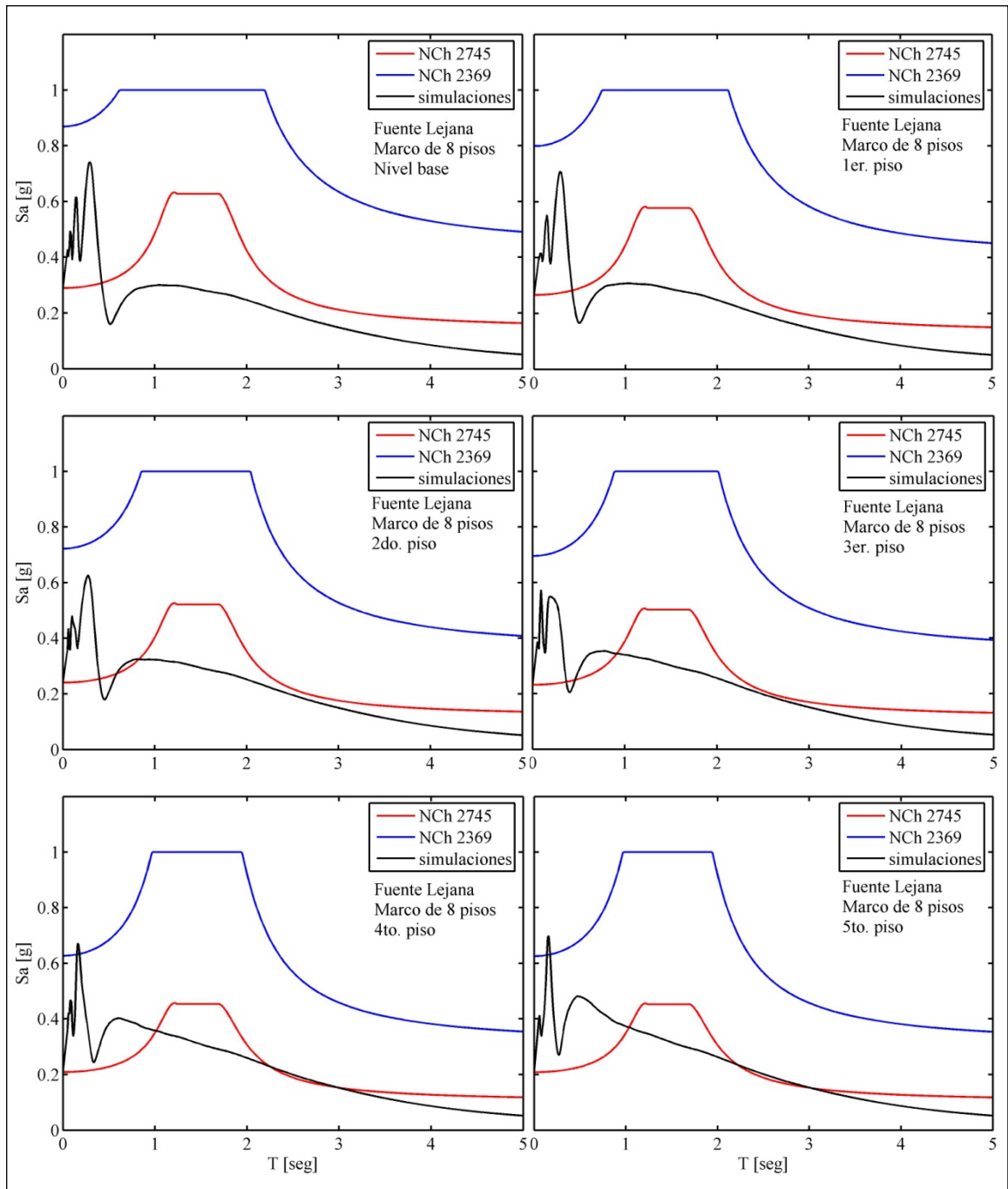


Figura 5-16 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.05).

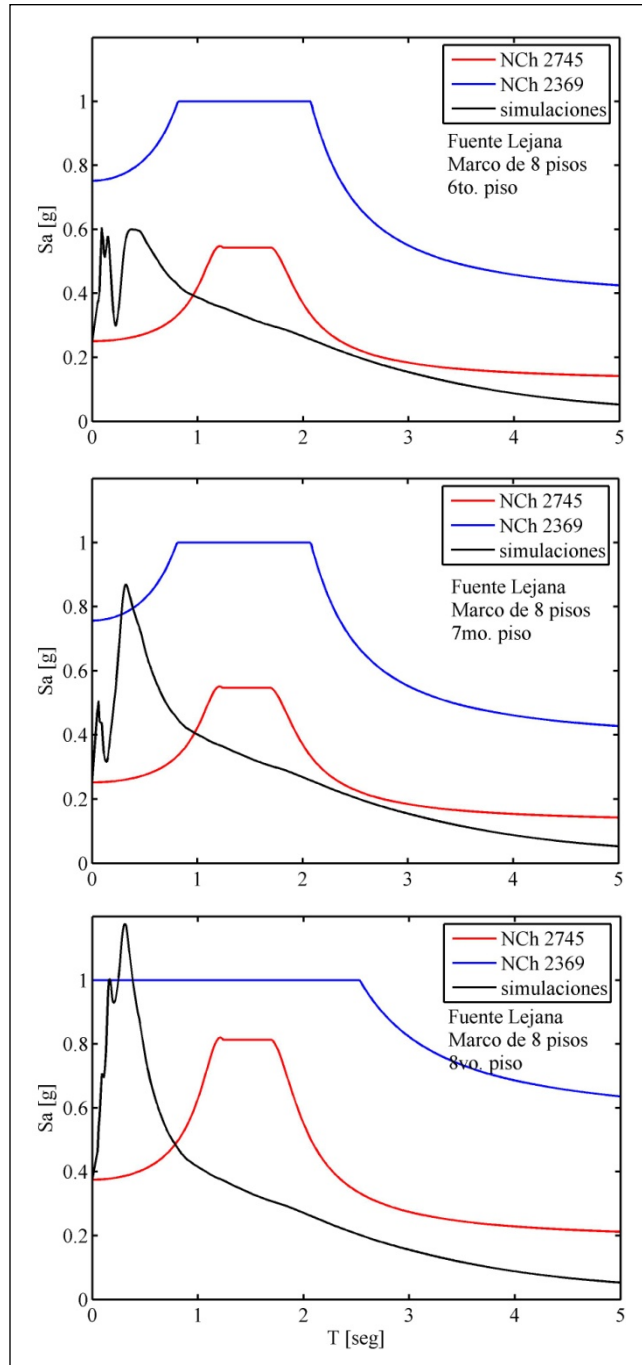


Figura 5-16 (continuación).

5.2.2 Respuesta a las Excitaciones de Fuente Cercana

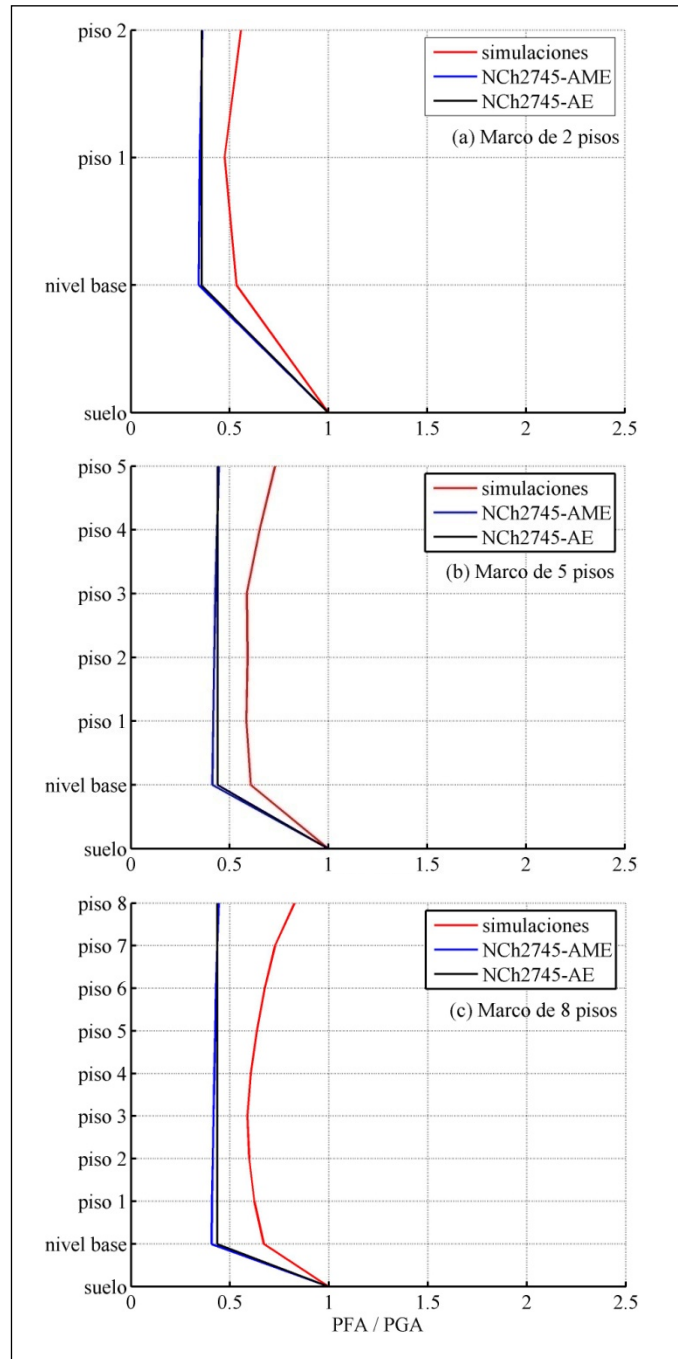


Figura 5-17 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I: valores de la relación PFA/PGA : evaluación de la norma NCh2745.

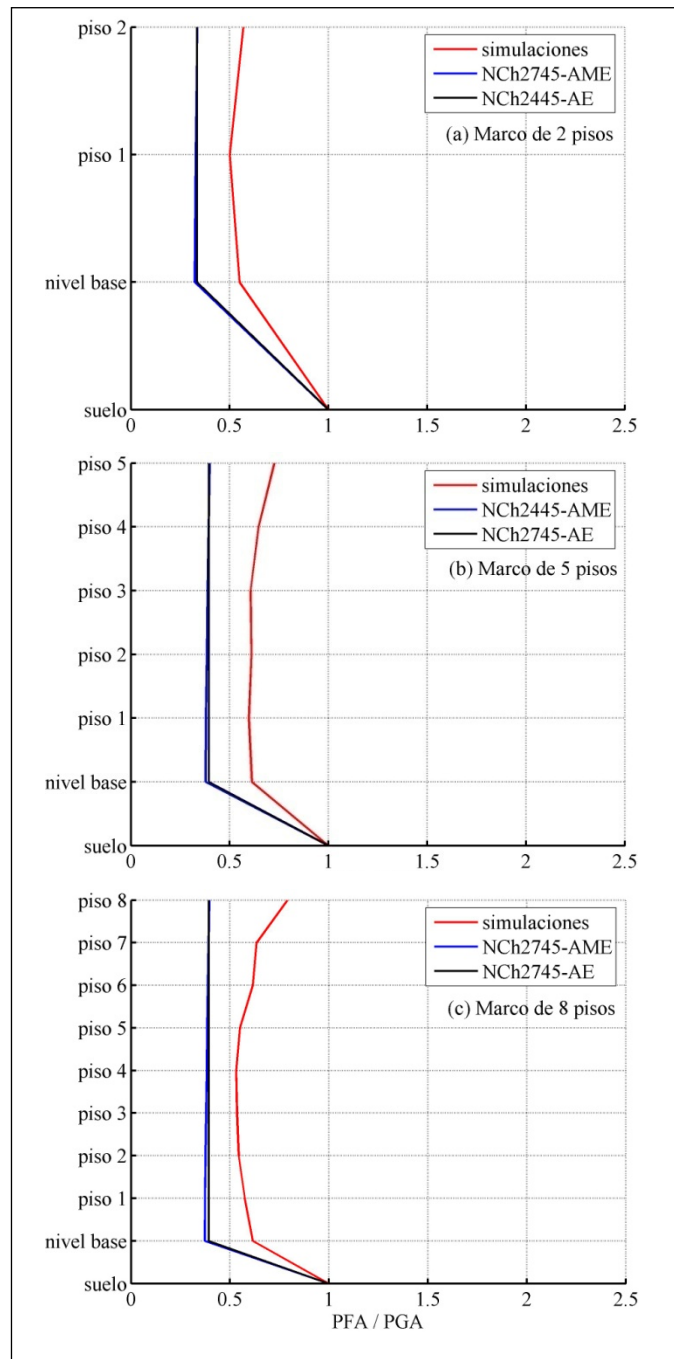


Figura 5-18 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II: valores de la relación PFA/PGA : evaluación de la norma NCh2745.

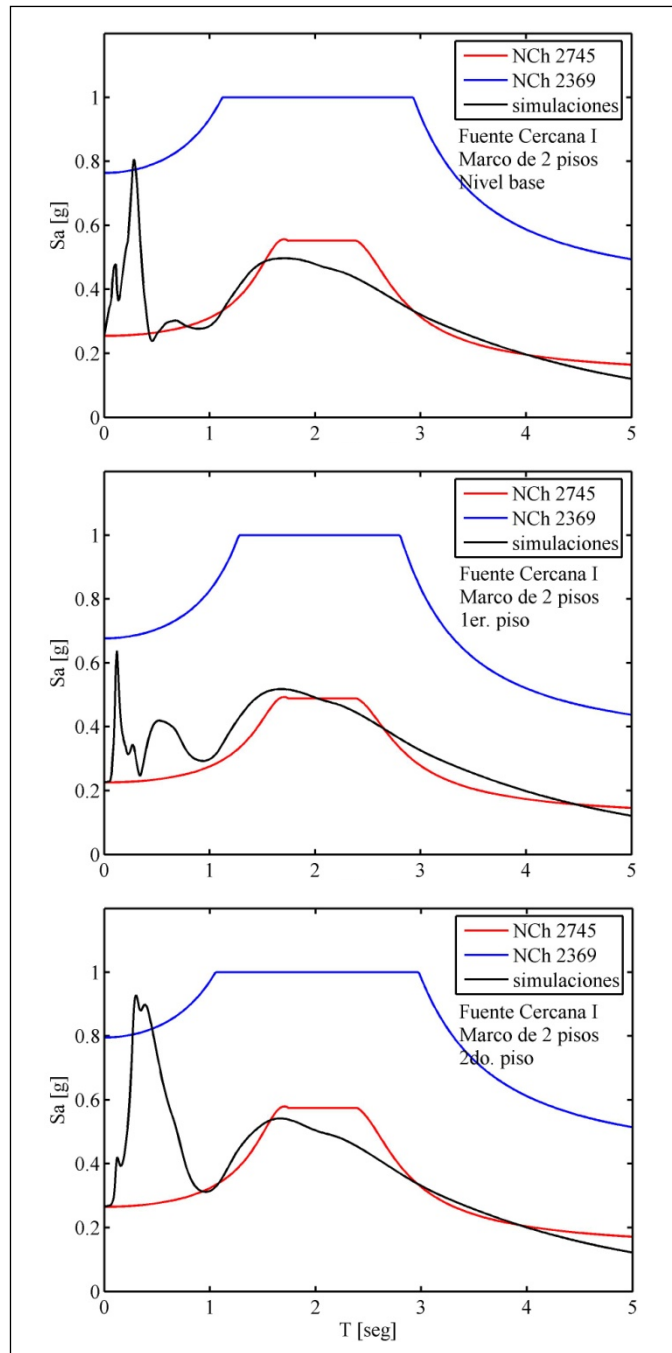


Figura 5-19 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.05).

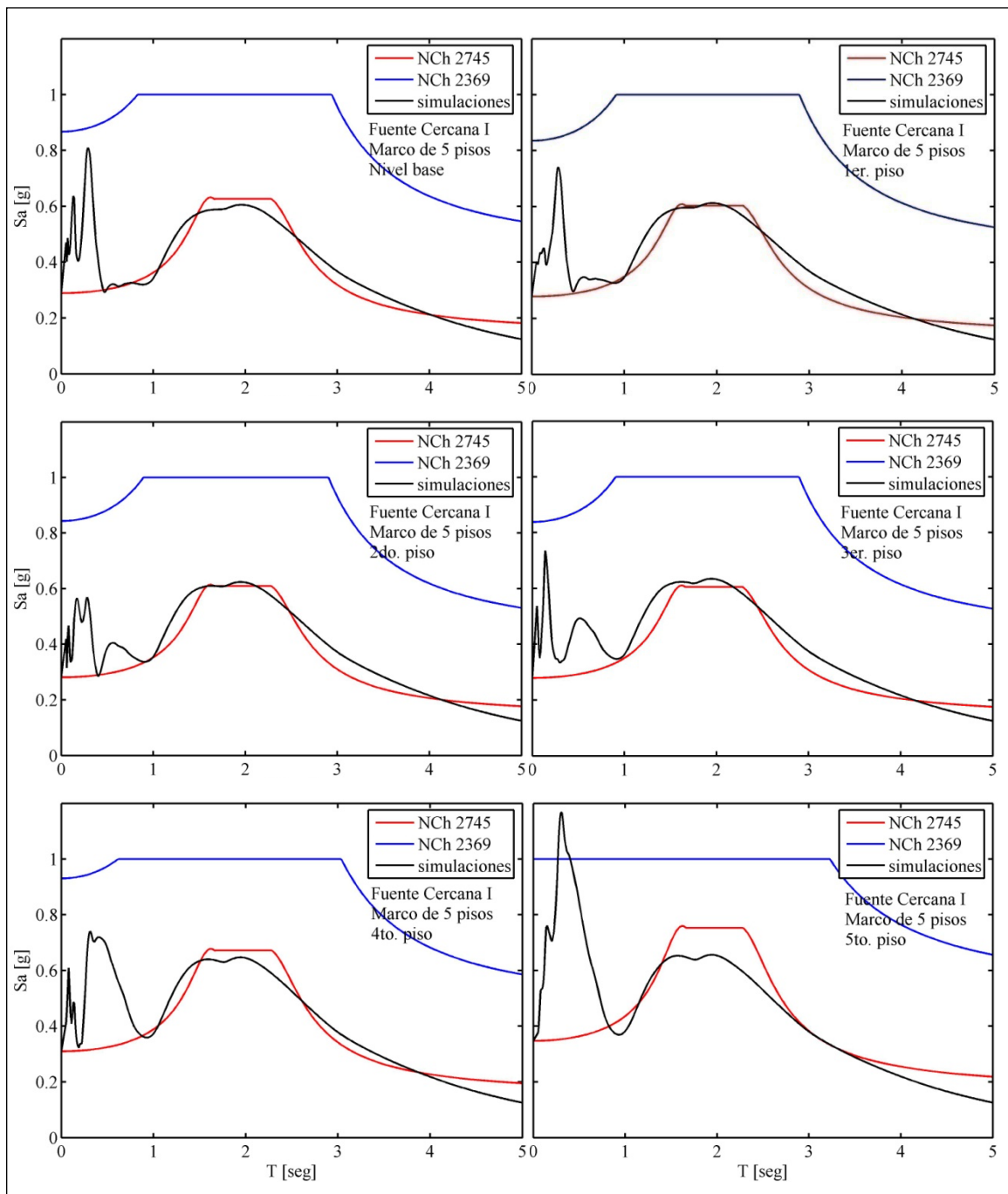


Figura 5-20 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.05).

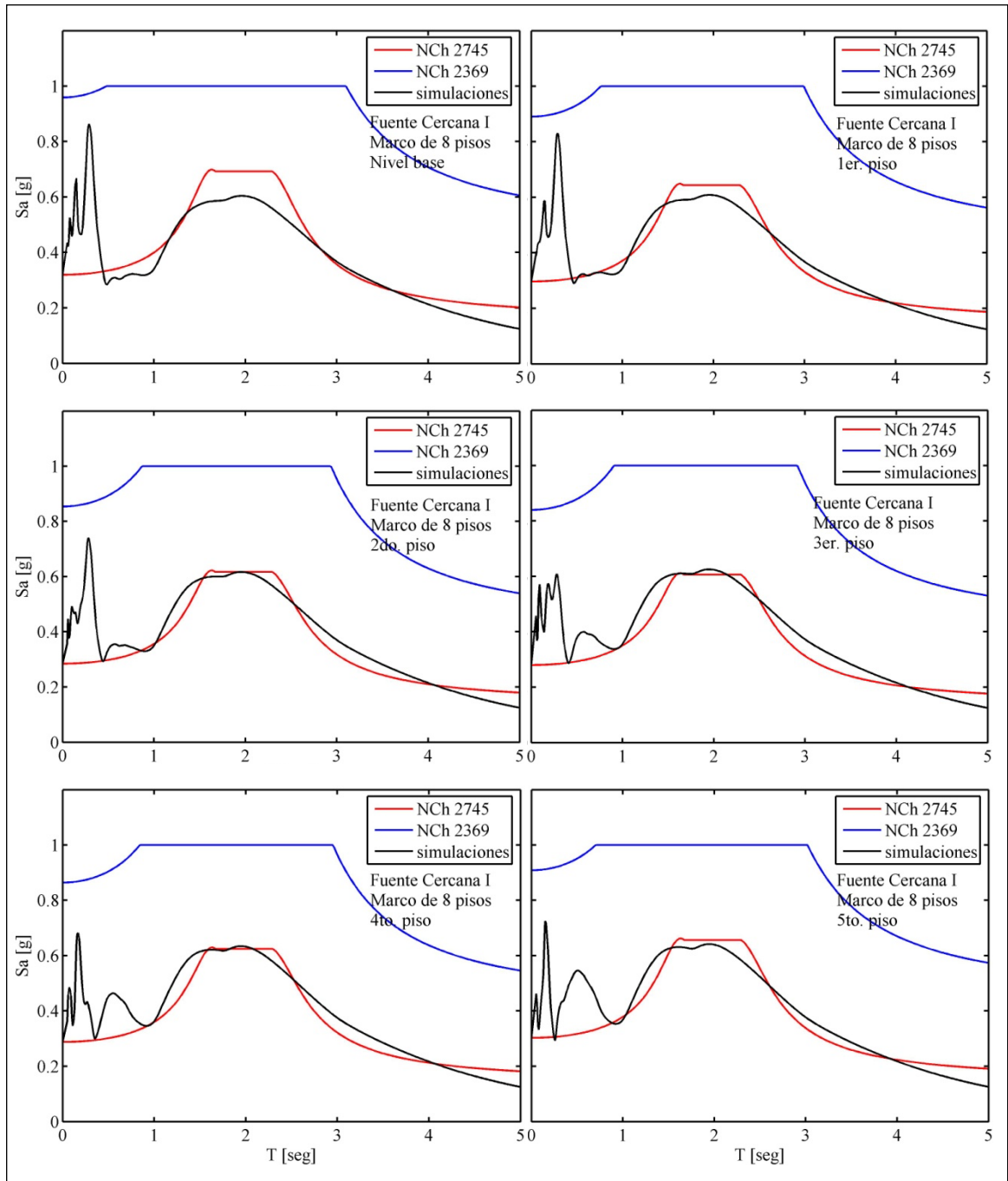


Figura 5-21 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.05).

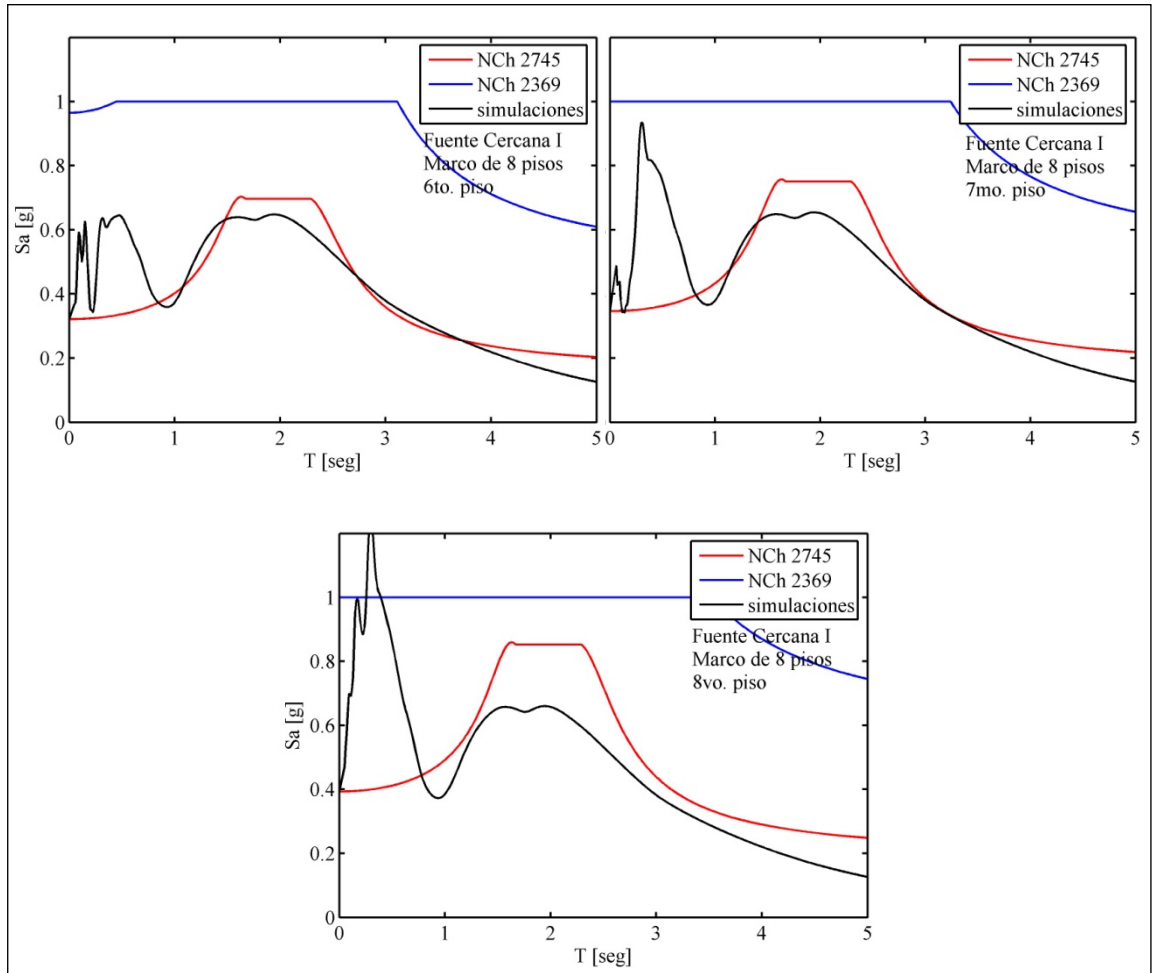


Figura 5-21 (continuación).

En la Figura 5-17 y en la Figura 5-18 se pueden observar los valores de las relaciones PFA/PGA de todas las estructuras sujetas a las excitaciones de fuente Cercana I y fuente Cercana II, respectivamente. Se grafican las relaciones PFA/PGA obtenidas del proceso de simulación numérica y las obtenidas conforme a la norma NCh2745 usando el AME y el AE. Las observaciones realizadas para el caso de sistemas lineales (Sección 5.1.1) siguen siendo válidas.

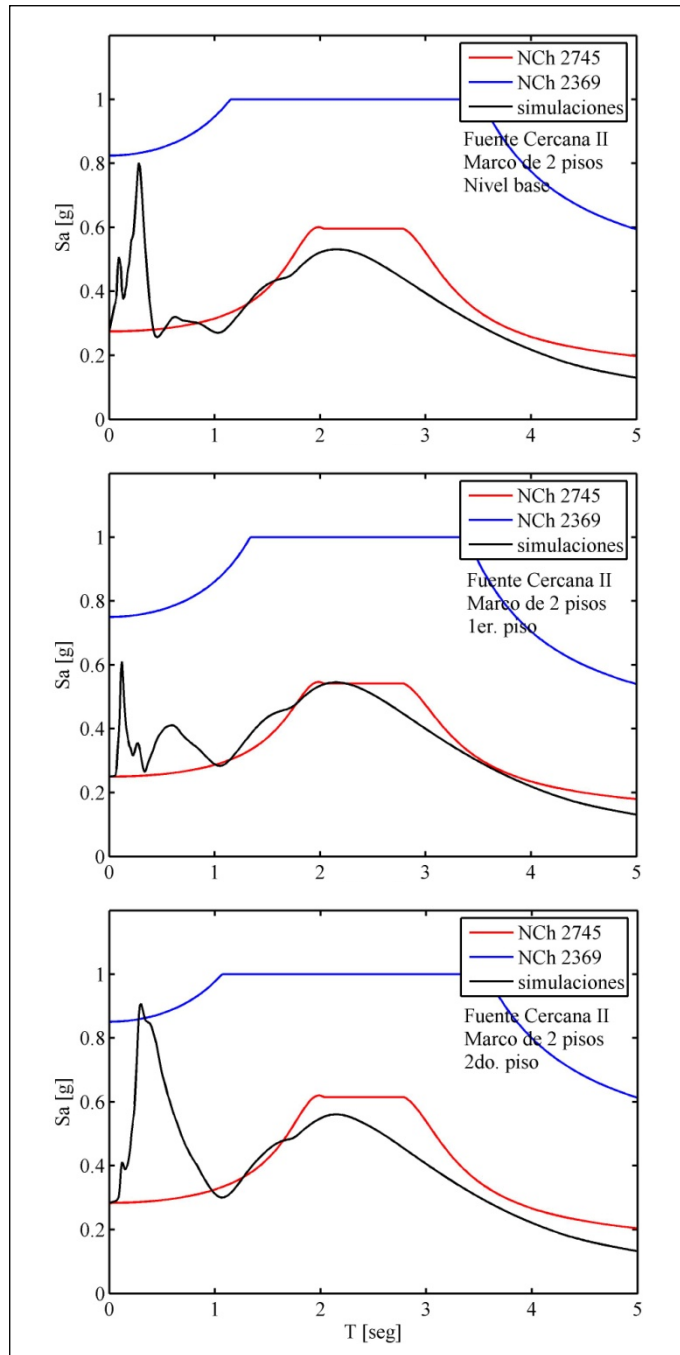


Figura 5-22 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.05).

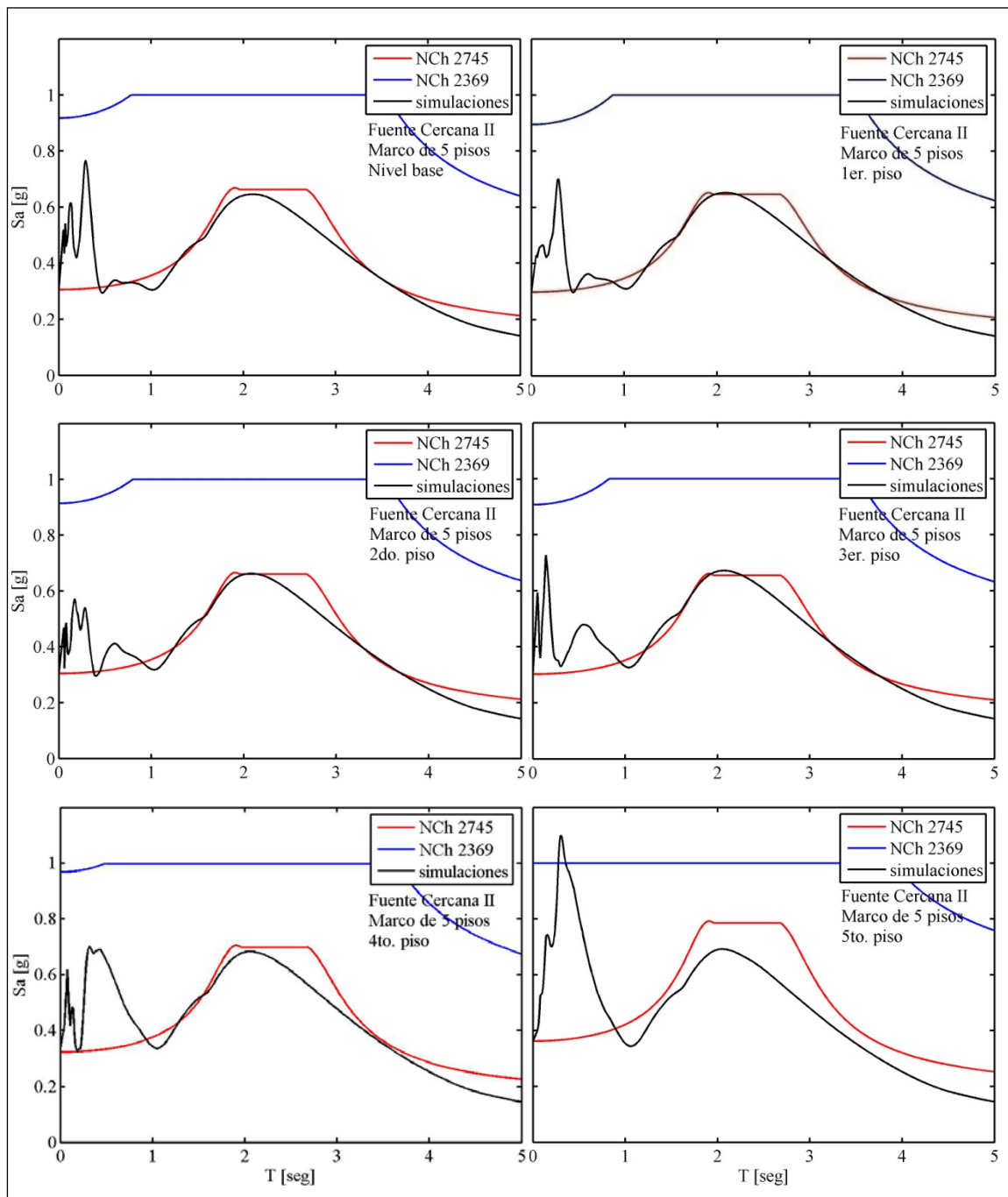


Figura 5-23 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.05).

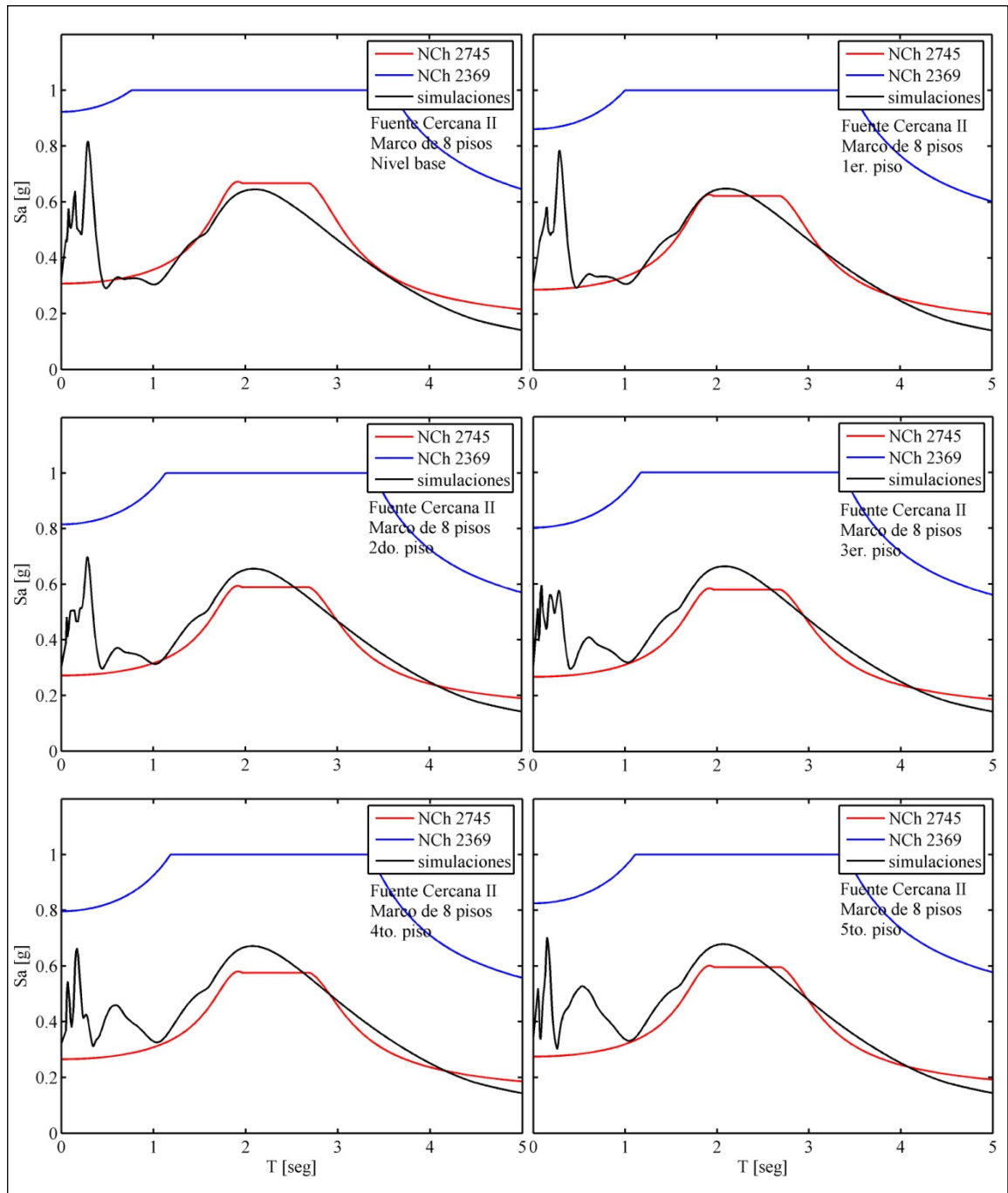


Figura 5-24 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.05).

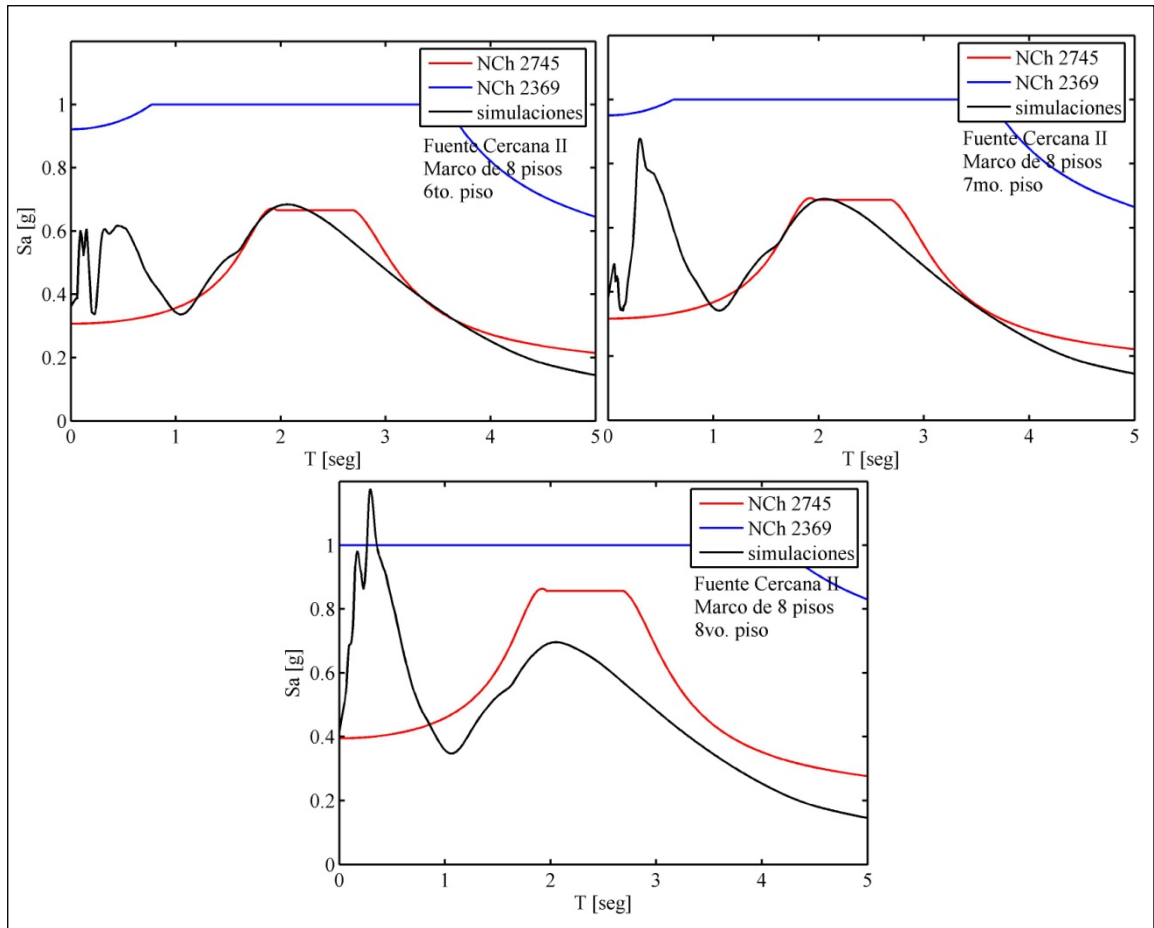


Figura 5-24 (continuación).

La Figura 5-19 a la Figura 5-24 son análogas a la Figura 5-14 a la Figura 5-16. La estimación de la norma NCh2745 en la zona del período fundamental de la estructura es, curiosamente, más precisa que en el caso de la excitación de fuente Lejana (Sección 5.2.1). En la zona de los períodos superiores, en cambio, las observaciones realizadas en la Sección 5.2.1 siguen siendo válidas para el caso de excitaciones impulsivas. La norma NCh2369 sigue proporcionando, en todo el rango de períodos, valores de aceleración de piso en general muy conservadores.

5.3 Discusión de resultados

En este capítulo una comparación entre las predicciones de las aceleraciones de piso indicadas en las normas NCh2745/NCh2369 y los resultados obtenidos del proceso de simulación numérica fue realizada. De este análisis se puede concluir que: (1) el procedimiento descrito en la norma NCh2745 para los casos en que se permite análisis estático (AME) y/o análisis modal (AME) siempre indica valores no conservativos del *PFA*; (2) en general, el espectro de piso (normalizado por el valor del *PFA*) indicado por la norma NCh2745 proporciona estimaciones razonables únicamente en la zona del período fundamental de la estructura, y sólo en el caso en que el sistema de aislación es lineal y la excitación tiene características de fuente lejana; (3) el espectro de piso normalizado indicado por la norma NCh2745 proporciona estimaciones no conservativas en la zona de los períodos modales superiores, notoriamente en algunos casos; y (4) el espectro de piso normalizado indicado por la norma NCh2369 es conservativo en prácticamente todos los casos, y muy conservativo en muchas situaciones. Cabe aclarar que también se observó que el espectro de piso normalizado indicado por la norma NCh2745 proporciona estimaciones razonables en la zona del período fundamental de la estructura en el caso en que el sistema de aislación es no lineal y la excitación es de tipo impulsiva, aunque debido a las limitaciones del modelo de excitaciones impulsivas considerado en este estudio no es posible generalizar la validez de esta observación.

Se concluye entonces que las disposiciones incluidas en la norma NCh2745 podrían ser revisadas, para lo cual algunas alternativas se exploran en el Capítulo 6. Posibles procedimientos para obtener estimaciones más razonables de las aceleraciones máximas de piso se desarrollarán teniendo en cuenta conceptos fundamentales de dinámica estructural. En el caso de los espectros de piso, se analizarán posibles aplicaciones del procedimiento indicado en el documento *Seismic Design Guidelines for Essential Buildings* (US Army, 1988), el cual predice razonablemente los espectros de piso de estructuras convencionales (Pino, 2010, Goldschmidt, 2010, Steib, 2010).

6. ESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA DE ACELERACIÓN ABSOLUTA MEDIANTE PROCEDIMIENTOS APROXIMADOS

En el Capítulo 4 se analizaron las características de las aceleraciones de piso en estructuras equipadas con sistemas de aislación sísmica de base, y en el Capítulo 5 se evaluaron las estimaciones que indican los procedimientos aproximados mencionados en la norma NCh2745. Los resultados de la evaluación sugieren que las demandas sísmicas en elementos no estructurales requeridas por la norma NCh2745 no siempre son satisfactorias. Por este motivo, en este capítulo se examinan posibles criterios alternativos para estimar más apropiadamente las aceleraciones de piso, de manera que sea posible calcular razonablemente las demandas sísmicas en elementos no estructurales sin realizar análisis dinámico tiempo historia. La aplicación de los criterios examinados en este capítulo requiere el conocimiento previo de las propiedades dinámicas de la estructura, de las características de la excitación sísmica, y de los resultados del análisis estático ó del análisis modal espectral.

6.1 Estimación de la Aceleración Máxima de Piso (PFA)

En la Figura 5-1, en la Figura 5-5, en la Figura 5-6, en la Figura 5-13, en la Figura 5-17 y en la Figura 5-18 se puede observar que en todos los casos las aceleraciones máximas de piso estimadas conforme a la norma NCh2745 (mediante el AME y/o el AE) son siempre no conservativas. En el caso de los sistemas lineales, los valores de los errores correspondientes *al nivel base* pueden apreciarse en la Tabla 6-1.

6.1.1 Sistemas Lineales

En la Figura 6-1 y en la Figura 6-2 se observa que la variación en altura de los valores normalizados del *PFA* es esencialmente independiente del número de pisos de la estructura, y puede considerarse esencialmente lineal. En consecuencia, si se conocen

los valores del *PFA* en el nivel base y en el nivel de techo, es posible entonces estimar razonablemente el valor del *PFA* en todos los pisos de la estructura.

6.1.1.1 Estimación de la Aceleración Absoluta Máxima en el Nivel Base

Los resultados descritos en el Capítulo 4 indican que una estructura aislada se comporta en gran medida como un sistema de 1 GDL cuyas propiedades de rigidez y amortiguamiento son las correspondientes al sistema de aislación, y cuyas propiedades de masa son las correspondientes a la superestructura. Luego, una aproximación de la variación en el tiempo de la aceleración absoluta en el nivel base está dada por:

$$a(t) = \ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t) = -2\xi\omega\dot{x}(t) - \omega^2x(t) \quad (6.1)$$

en donde $a(t)$ es la historia de la aceleración absoluta, $\ddot{x}_g(t)$ es la historia de la excitación sísmica; $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t)$ son, respectivamente, las historias del desplazamiento, de la velocidad y de la aceleración del nivel base relativas al suelo; y ω y ξ son, respectivamente, la frecuencia y el factor de amortiguamiento del sistema de aislación. El primer término del lado derecho de la Ecuación (6.1) está asociado a las propiedades de amortiguamiento ($a_{F_D}(t) = 2\xi\omega\dot{x}(t)$) y el segundo término está asociado a las propiedades de rigidez ($a_{F_S}(t) = \omega^2x(t)$). Si el valor de ξ es relativamente pequeño, el valor de $a_{F_D,máx}$ es mucho menor que el valor de $a_{F_S,máx}$, y normalmente su valor es nulo en el instante en que $a_{F_S}(t) = a_{F_S,máx}$ debido a que las cantidades $a_{F_D}(t)$ y $a_{F_S}(t)$ están fuera de fase. En consecuencia, si el valor de ξ es relativamente pequeño, una estimación razonable del valor máximo de la aceleración absoluta en el nivel base está dada por:

$$a_{máx} = \omega^2x_{máx} \quad (6.2)$$

Luego, dado que $x_{m\acute{a}x} = SD$ y que $\omega^2 SD = Sa$, donde SD es el desplazamiento espectral, se tiene entonces que:

$$a_{m\acute{a}x} = Sa \quad (6.3)$$

En otras palabras, si el valor de ξ es relativamente pequeño, es posible asumir que el valor del PFA en el nivel base es directamente igual al valor de Sa correspondiente a T . Se trata de una aproximación de mucho valor práctico debido a que las normas de diseño sísmico siempre indican valores de Sa .

Tabla 6-1 Sistemas lineales: Valores de la relación PFA/PGA en el nivel base.

	Fuente Lejana		
	marco de	marco de	marco de
	2 pisos	5 pisos	8 pisos
Simulación numérica	0.593	0.572	0.564
NCh2745 – AME	0.357	0.324	0.311
% de estimación	60%	57%	55%

	Fuente Cercana I		
	marco de	marco de	marco de
	2 pisos	5 pisos	8 pisos
Simulación numérica	0.646	0.718	0.712
NCh2745 – AME	0.343	0.439	0.407
% de estimación	53%	61%	57%

	Fuente Cercana II		
	marco de	marco de	marco de
	2 pisos	5 pisos	8 pisos
Simulación numérica	0.682	0.725	0.719
NCh2745 – AME	0.324	0.378	0.373
% de estimación	48%	52%	52%

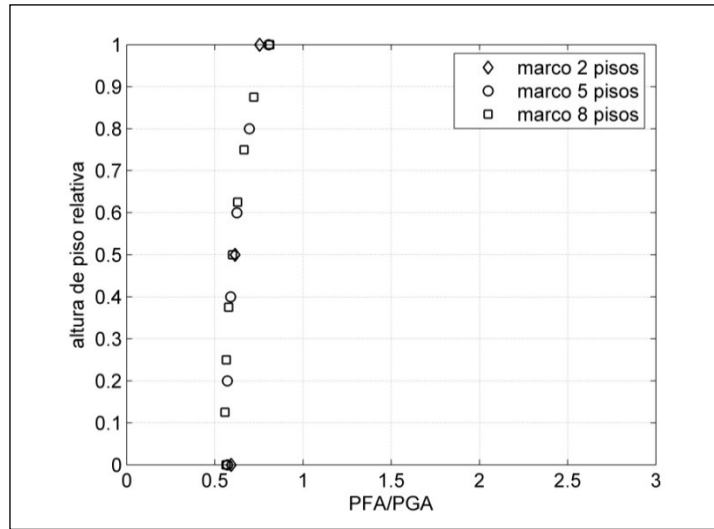


Figura 6-1 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: valores de la relación PFA/PGA .

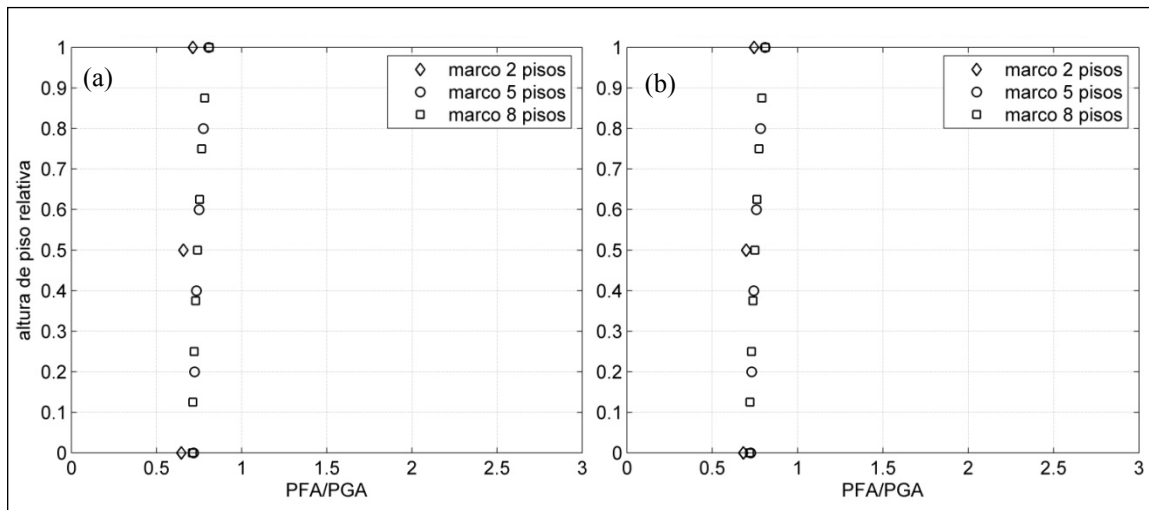


Figura 6-2 Sistemas lineales sujetos a las excitaciones de fuente Cercana: valores de la relación PFA/PGA ; a) fuente Cercana I; y b) fuente Cercana II.

La validez de la Ecuación (6.3), sin embargo, disminuye a medida que aumenta el valor de ξ . La Figura 6-3 muestra los espectros de respuesta de pseudo-aceleración y de

aceleración absoluta correspondientes al registro sintético de fuente Lejana número 725 para varios valores del factor de amortiguamiento. Se observa que conforme se incrementa el valor del factor de amortiguamiento, aumentan las diferencias entre los valores de Sa y $a_{máx}$. Estas diferencias pueden en principio cuantificarse de la siguiente manera. Dado que $a_{F_D}(t)$ y $a_{F_S}(t)$ están fuera de fase, una estimación razonable de $a_{máx}$ para valores relativamente grandes de ξ está dada por:

$$a_{máx} = \sqrt{a_{F_Dmáx}^2 + a_{F_Smáx}^2} \quad (6.4)$$

que es equivalente a:

$$a_{máx} = \sqrt{(-2\xi\omega\dot{x}_{máx})^2 + (-\omega^2x_{máx})^2} \quad (6.5)$$

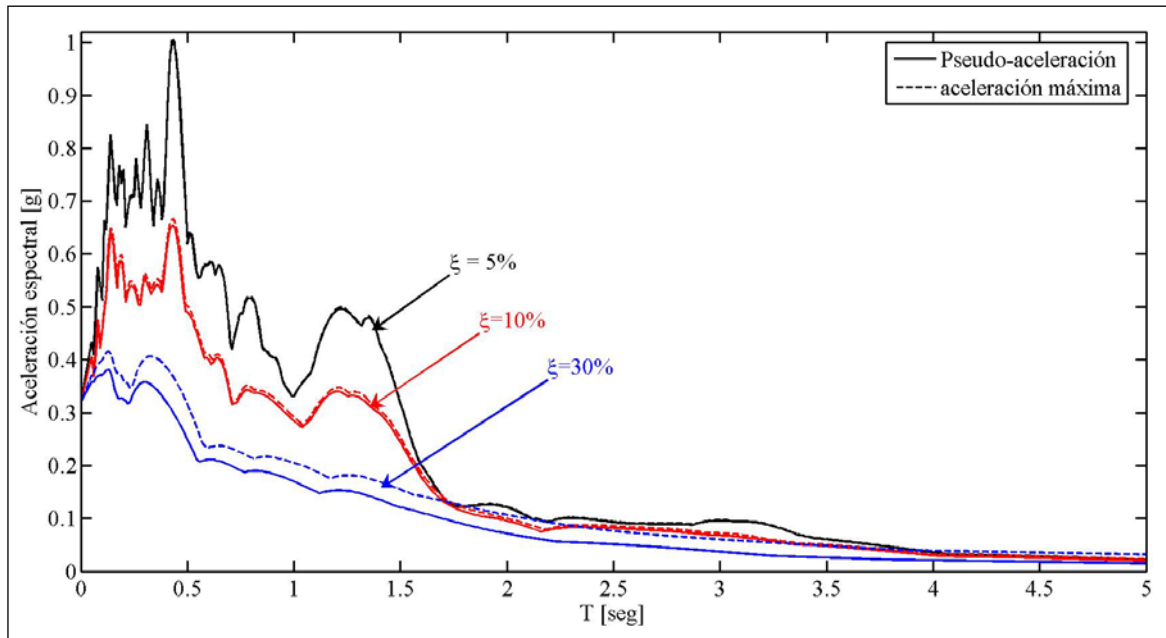


Figura 6-3 Espectros de respuesta de pseudo-aceleración y aceleración absoluta para varios valores del factor de amortiguamiento. Excitación de fuente Lejana nro. 725.

Luego, teniendo en cuenta que la respuesta de un sistema lineal de 1 GDL tiene características armónicas, se tiene entonces que $\dot{x}_{m\acute{a}x} \approx x_{m\acute{a}x} \omega$, con lo cual:

$$a_{m\acute{a}x} = \sqrt{4\xi^2 \omega^4 x_{m\acute{a}x}^2 + \omega^4 x_{m\acute{a}x}^2} \quad (6.6)$$

$$a_{m\acute{a}x} = \omega^2 x_{m\acute{a}x} \sqrt{4\xi^2 + 1} \quad (6.7)$$

La Ecuación (6.7) es idéntica a la Ecuación (6.2) excepto por el término $\sqrt{4\xi^2 + 1}$. Se identifica entonces el factor $F_a = \sqrt{4\xi^2 + 1}$, el cual toma en cuenta la influencia del amortiguamiento en la relación entre $a_{m\acute{a}x}$ y Sa . En consecuencia, la Ecuación (6.7) se puede escribir como:

$$a_{m\acute{a}x} = F_a \cdot Sa \quad (6.8)$$

Para valores de ξ relativamente bajos el valor de F_a es muy cercano a 1.0 (por ejemplo, $F_a = 1.005$ cuando $\xi = 5\%$), pero para valores relativamente altos de ξ el valor de F_a no es despreciable. Por ejemplo, $F_a = 1.22$ cuando $\xi = 35\%$. Es interesante notar que Constantinou, Soong, & Dargush (1998) indican que la relación entre la aceleración absoluta y la pseudo-aceleración está dada por:

$$a_{m\acute{a}x} = (f_1 + 2\xi f_2) Sa \quad (6.9)$$

en donde:

$$f_1 = \cos[\tan^{-1}(2\xi)] \quad (6.10)$$

$$f_2 = \sin[\tan^{-1}(2\xi)] \quad (6.11)$$

y conviene denominar F_b al factor $f_1 + 2\xi f_2$. En la Figura 6-4 se muestran los valores que toman los factores F_a y F_b en función del valor del factor de amortiguamiento. Se

observa que los valores de ambos factores son prácticamente iguales hasta un valor de ξ aproximadamente igual a 0.35. Para valores mayores de ξ , en cambio, los valores de F_a y F_b exhiben tendencias muy diferentes: mientras que el valor de F_a continúa creciendo de manera monótonica, el valor de F_b exhibe una naturaleza oscilante. Debido a que la relación entre $a_{m\acute{a}x}$ y S_a no puede, por definición, ser negativa, en este trabajo se considera que el factor F_a expresa de manera más apropiada la relación entre $a_{m\acute{a}x}$ y S_a para cualquier valor de ξ perteneciente al rango de valores que puede tomar en la práctica (i.e., $\xi < 1$).

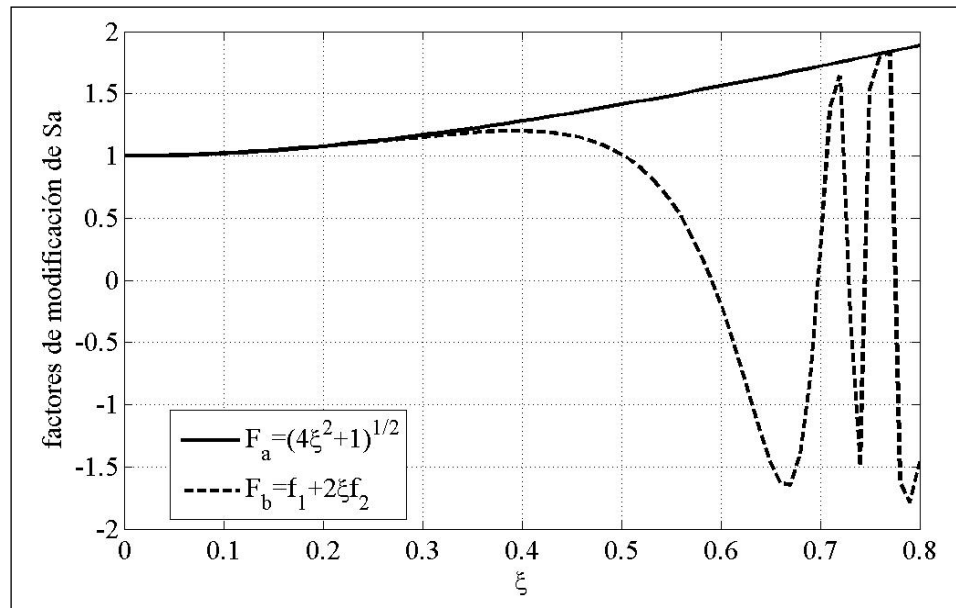


Figura 6-4 Factores que relacionan los valores de S_a con los valores de $a_{m\acute{a}x}$ en función del factor de amortiguamiento.

Conviene entonces introducir un nuevo factor denominado B_A , el cual relaciona las ordenadas de aceleración absoluta máxima para $\xi = 5\%$ y las ordenadas correspondientes a otros valores de ξ , i.e.:

$$B_A = \frac{a_{\max}(\xi = 5\%)}{a_{\max}(\xi)} \quad (6.12)$$

Teniendo en cuenta la Ecuación (6.8), se tiene entonces que:

$$B_A = \frac{a_{\max}(\xi = 5\%)}{F_a \cdot Sa(\xi)} \quad (6.13)$$

y teniendo en cuenta también la definición del factor B_D indicado en la norma NCh2745, se tiene entonces que:

$$B_A = \frac{a_{\max}(\xi = 5\%) \cdot B_D}{F_a \cdot Sa(\xi = 5\%)} \quad (6.14)$$

Como $a_{\max}(\xi = 5\%) \approx Sa(\xi = 5\%)$ (Figura 6-3), el factor B_A propuesto en este trabajo está dado por:

$$B_A = \frac{B_D}{F_a} = \frac{B_D}{\sqrt{4\xi^2 + 1}} \quad (6.15)$$

En la Figura 6-5 (I) se muestran valores empíricos de la relación B_A correspondientes a cada una de las excitaciones sísmicas descritas en el Capítulo 3. A diferencia del factor B_D (Figura 4-1 (I)), claramente, los valores del factor B_A son fuertemente dependientes del valor del período natural.

En la Figura 6-5 (II) se pueden observar los valores del factor B_A calculados con la Ecuación (6.15) teniendo en cuenta: (a) los valores de B_D indicados en la norma NCh2745; y (b) los valores de B_D obtenidos empíricamente (Figura 4-1 (II)). Para efectos comparativos, en esta figura también se incluyen valores empíricos del factor B_A , los cuales se obtuvieron promediando, para cada valor de ξ , los valores de B_A correspondientes a valores del período natural T comprendidos entre 0.5 seg y 2.5 seg. En el caso de la excitación de fuente Lejana, la comparación entre valores empíricos de

B_A y valores de B_A calculados con la Ecuación (6.15) y con valores empíricos de B_D indica que el factor F_a propuesto es ciertamente apropiado, sobre todo cuando el valor de ξ es relativamente pequeño. Los valores de B_A calculados con la Ecuación (6.15) pero con valores de B_D indicados por la NCh2745 son cualitativamente similares, aunque algo distintos en términos cuantitativos. En el caso de las excitaciones de fuente Cercana, se observan, como era de esperar, diferencias más importantes.

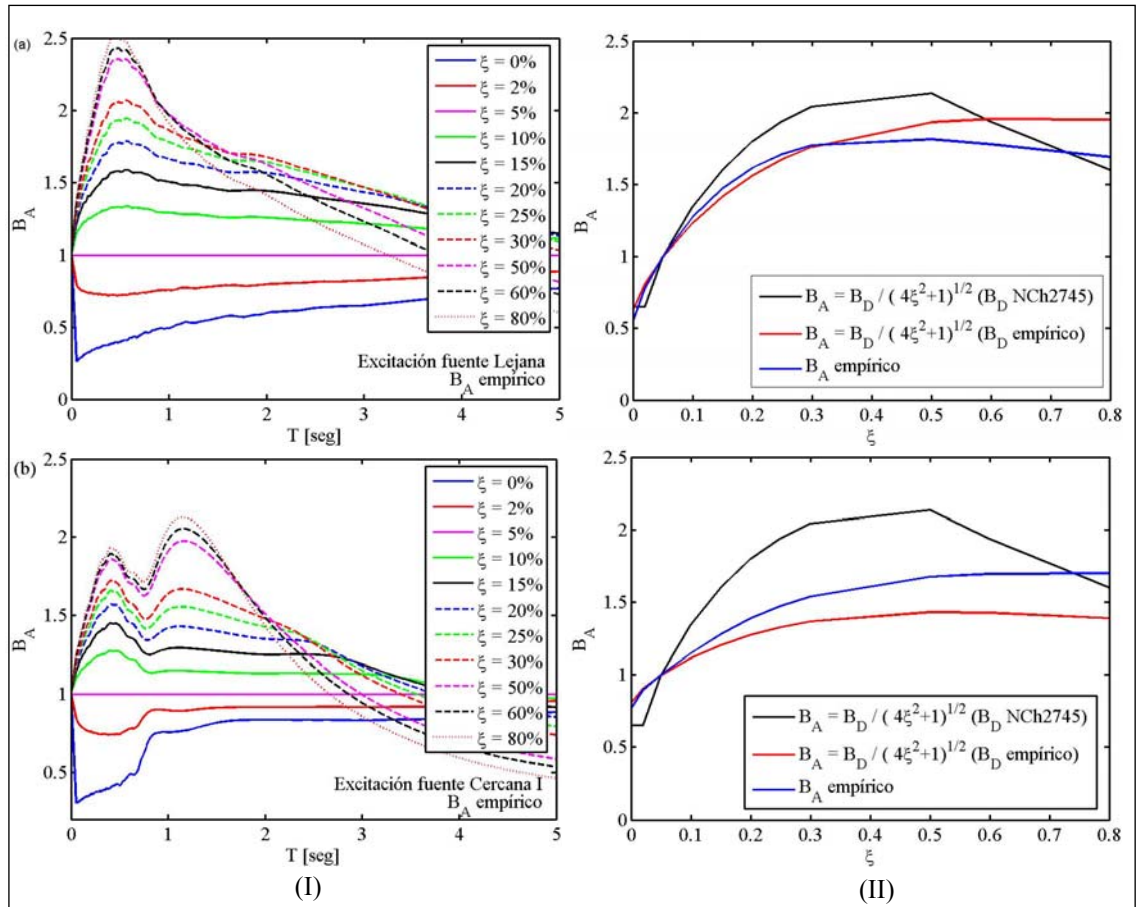


Figura 6-5 Valores del factor B_A : I) valores empíricos: II) valores promedio a) Excitación de fuente Lejana; b) Excitación de fuente Cercana I; y c) Excitación de fuente Cercana II.

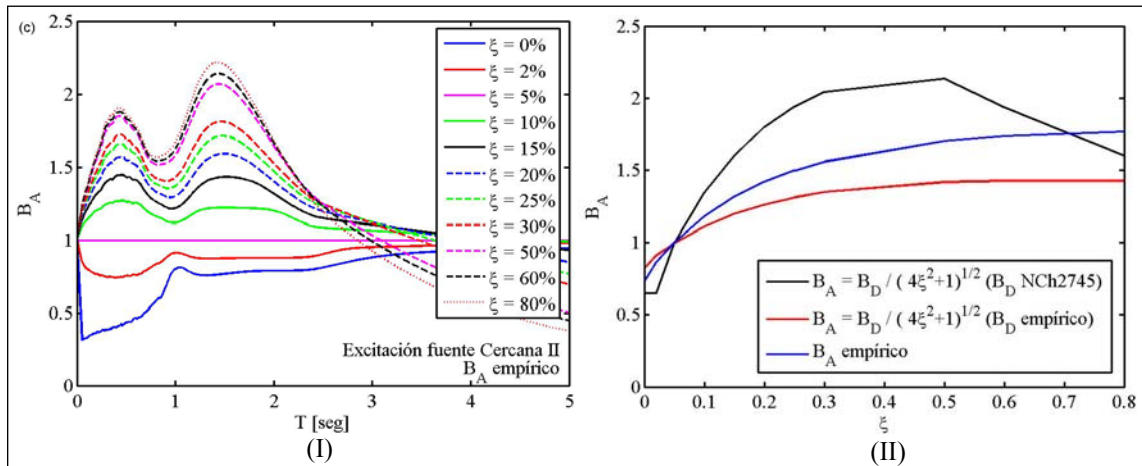


Figura 6-5 (continuación).

Se propone entonces que el valor del *PFA* en el nivel base sea estimado mediante la siguiente ecuación:

$$a_{\max}[g] = \frac{F}{P_p} B_A \quad (6.16)$$

donde los términos F y P_p son los mismos definidos en la norma NCh2745 (Ecuación (1.2)).

La Tabla 6-2 y Tabla 6-3 presentan una comparación entre los valores normalizados del *PFA* obtenidos de las simulaciones numéricas y los estimados a través de: (a) el procedimiento indicado por la norma NCh2745; y (b) la Ecuación (6.16). Puede observarse que las estimaciones que proporciona la Ecuación (6.16) son adecuadas para fines de diseño, ya que son conservativas (para el caso de excitaciones de fuente Lejana y fuente Cercana I) ó levemente no conservativas (para el caso de las excitaciones de fuente Cercana II).

Tabla 6-2 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: Valores de la relación PFA/PGA en el nivel base.

	<i>PFA / PGA</i>		
	marco de 2 pisos	marco de 5 pisos	marco de 8 pisos
Simulación numérica	0.593	0.572	0.564
NCh2745 (AME)	0.357	0.324	0.311
Propuesto (Ecuación (6.16))	0.733	0.665	0.645
% de estimación de NCh2745 (AME)	60%	57%	55%
% de estimación de Ecuación (6.16)	124%	116%	114%

Tabla 6-3 Sistemas lineales sujetos a las excitaciones de fuente Cercana: Valores de la relación PFA/PGA en el nivel base.

	Fuente Cercana I		
	<i>PFA / PGA</i>		
	marco de 2 pisos	marco de 5 pisos	marco de 8 pisos
Simulación numérica	0.646	0.718	0.712
NCh2745 (AME)	0.343	0.439	0.407
Propuesto (Ecuación (6.16))	0.674	0.807	0.748
% de estimación de NCh2745 (AME)	53%	61%	57%
% de estimación de Ecuación (6.16)	104%	112%	105%

	Fuente Cercana II		
	<i>PFA / PGA</i>		
	marco de 2 pisos	marco de 5 pisos	marco de 8 pisos
Simulación numérica	0.682	0.725	0.719
NCh2745 (AME)	0.324	0.378	0.373
Propuesto (Ecuación (6.16))	0.640	0.708	0.699
% de estimación de NCh2745 (AME)	48%	52%	52%
% de estimación de Ecuación (6.16)	94%	98%	97%

6.1.1.2 Estimación de la Aceleración Absoluta Máxima en los Pisos Superiores

Tal como se indicó al comienzo de la sección 6.1, si se conocen los valores del *PFA* en el nivel base y en el nivel de techo, es posible entonces estimar razonablemente el valor del *PFA* en todos los pisos de la estructura debido a que la variación en altura del valor del *PFA* es de carácter esencialmente lineal.

En el caso de excitaciones de fuente Lejana, los resultados mostrados en la Figura 6-1 indican que puede asumirse que una estimación razonable del valor del *PFA* en el nivel de techo está dada por 1.5 veces el valor del *PFA* en el nivel base. Una comparación entre valores normalizados del *PFA* obtenidos de las simulaciones numéricas y los obtenidos teniendo en cuenta la variación lineal propuesta en este trabajo puede observarse en la Figura 6-6.

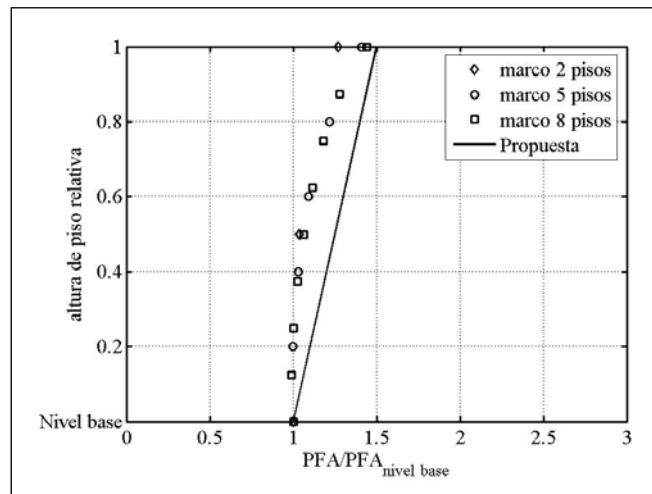


Figura 6-6 Sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: amplificación empírica del valor del *PFA* del nivel base y propuesta.

En el caso de excitaciones de fuente Cercana, los resultados mostrados en la Figura 6-2 y en la Figura 6-3 indican que puede asumirse que una estimación razonable del valor del *PFA* en el nivel de techo está dada por 1.2 veces el valor del *PFA* en el nivel base. Una comparación entre valores normalizados del *PFA* obtenidos de las simulaciones

numéricas y los obtenidos teniendo en cuenta la variación lineal propuesta en este trabajo puede observarse en la Figura 6-7.

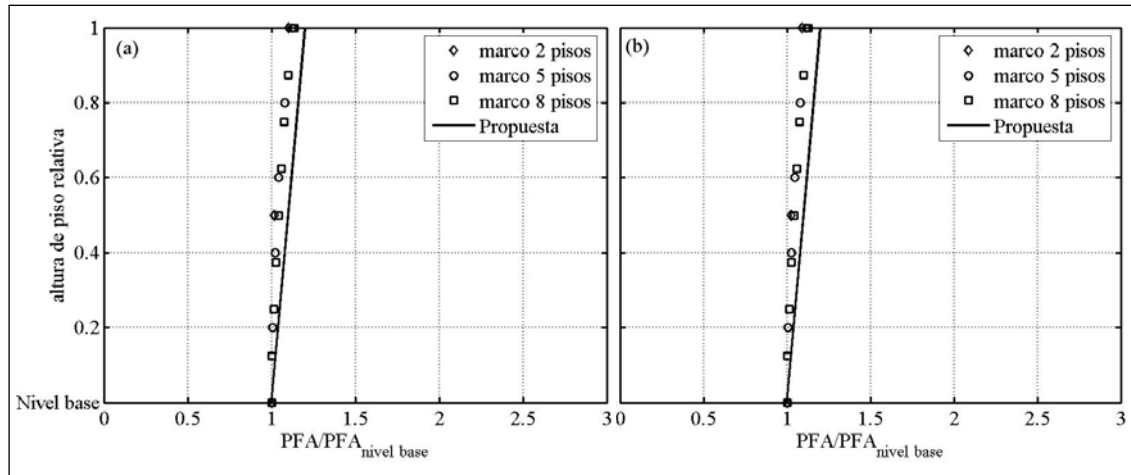


Figura 6-7 Sistemas lineales sujetos a las excitaciones de fuente Cercana: amplificación empírica del valor del PFA del nivel base y propuesta. a) fuente Cercana I; y b) fuente Cercana II.

6.1.2 Sistemas No Lineales

Dado que los valores normalizados del PFA en sistemas no lineales (Figura 6-8 y Figura 6-9) exhiben características similares a aquéllas correspondientes a sistemas lineales (sección 6.1.1), es posible asumir, al menos en principio, que el criterio adoptado en la sección 6.1.1 también puede adoptado para el caso de sistemas de aislación no lineal.

6.1.2.1 Estimación de la Aceleración Absoluta Máxima en el Nivel Base

La Ecuación (6.16) también es válida para sistemas no lineales, siempre y cuando el término ξ en la Ecuación (6.15) sea reemplazado por ξ_{eff} (i.e., el amortiguamiento *efectivo* del sistema de aislación no lineal). La Tabla 6-4 y la Tabla 6-5 presentan una comparación entre los valores normalizados del PFA obtenidos de las simulaciones

numéricas y los estimados a través de: (a) el procedimiento indicado por la norma NCh2745; y (b) la Ecuación (6.16). Puede observarse que las estimaciones que proporciona la Ecuación (6.16) son definitivamente más adecuadas que aquéllas proporcionadas por la norma NCh2745, y en la mayoría de los casos son conservativas.

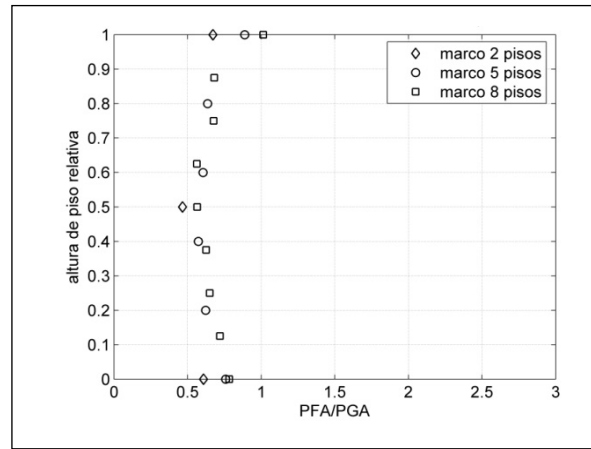


Figura 6-8 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: valores de la relación PFA/PGA .

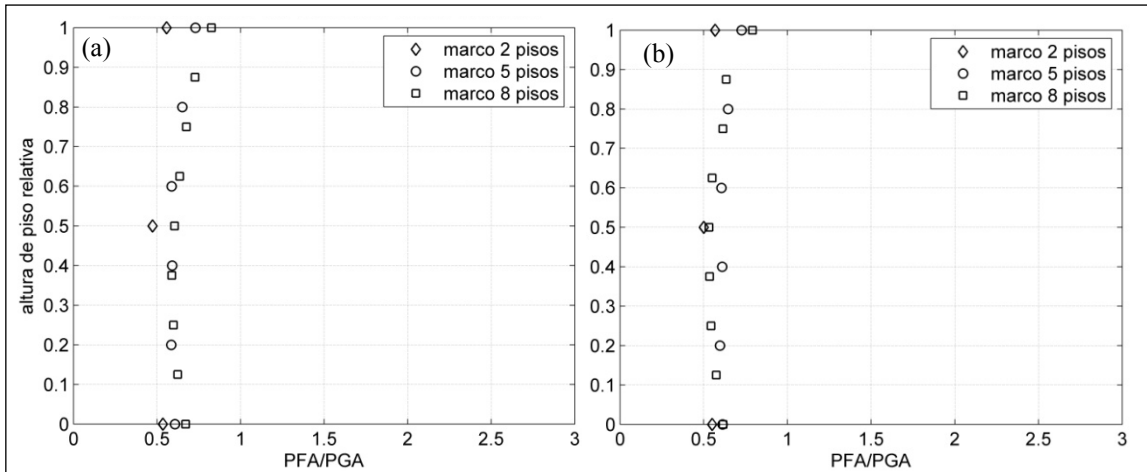


Figura 6-9 Sistemas no lineales sujetos a las excitaciones de fuente Cercana: valores de la relación PFA/PGA ; a) fuente Cercana I; y b) fuente Cercana II.

Tabla 6-4 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: Valores de la relación PFA/PGA en el nivel base.

	PFA/PGA		
	marco de 2 pisos	marco de 5 pisos	marco de 8 pisos
Simulación numérica	0.609	0.759	0.783
NCh2745 (AME)	0.357	0.324	0.311
Propuesto (Ecuación (6.16))	0.733	0.665	0.645
% de estimación de NCh2745 (AME)	59%	60%	59%
% de estimación de Ecuación (6.16)	120%	88%	82%

Tabla 6-5 Sistemas lineales sujetos a las excitaciones de fuente Cercana: Valores de la relación PFA/PGA en el nivel base.

	Fuente Cercana I		
	marco de 2 pisos	marco de 5 pisos	marco de 8 pisos
Simulación numérica	0.535	0.663	0.712
NCh2745 (AME)	0.343	0.439	0.407
Propuesto (Ecuación (6.16))	0.674	0.807	0.748
% de estimación de NCh2745 (AME)	64%	66%	57%
% de estimación de Ecuación (6.16)	126%	122%	105%

	Fuente Cercana II		
	marco de 2 pisos	marco de 5 pisos	marco de 8 pisos
Simulación numérica	0.550	0.635	0.634
NCh2745 (AME)	0.324	0.378	0.373
Propuesto (Ecuación (6.16))	0.640	0.708	0.699
% de estimación de NCh2745 (AME)	59%	60%	59%
% de estimación de Ecuación (6.16)	116%	112%	110%

6.1.2.2 Estimación de la Aceleración Absoluta Máxima en los pisos superiores

Tal como se indicó al comienzo de la sección 6.1, si se conocen los valores del *PFA* en el nivel base y en el nivel de techo, es posible entonces estimar razonablemente el valor del *PFA* en todos los pisos de la estructura debido a que la variación en altura del valor del *PFA* puede considerarse, a los fines prácticos, esencialmente independiente del número de pisos de la estructura.

Los resultados mostrados en la Figura 6-8 y en la Figura 6-9 indican que puede asumirse que una estimación conservativa del valor del *PFA* en el nivel de techo está dada por 1.3 veces el valor del *PFA* en el nivel base. Debido a que en sistemas no lineales la variación en altura del valor del *PFA* no es de carácter marcadamente lineal, se propone entonces considerar que: (a) en los pisos ubicados hasta una altura igual a 0.75 veces la altura total de la estructura, el valor del *PFA* sea igual al valor del *PFA* en el nivel base; y (b) en los pisos ubicados a alturas superiores a 0.75 veces la altura total de la estructura, el valor del *PFA* varía linealmente entre el valor del *PFA* en el nivel base y el valor del *PFA* en el nivel del techo. Una comparación entre valores normalizados del *PFA* obtenidos de las simulaciones numéricas y los obtenidos teniendo en cuenta la variación en altura propuesta en este trabajo puede observarse en la Figura 6-10 y en la Figura 6-11. La propuesta realizada proporciona valores algo conservativos en el caso de la excitación de fuente Lejana, pero es una estimación adecuada para fines de diseño y tiene la ventaja de ser aplicable tanto a excitaciones de fuente Lejana como de fuente Cercana.

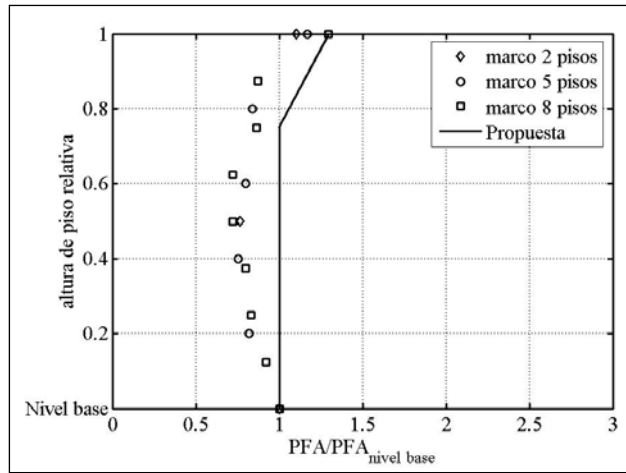


Figura 6-10 Sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana: amplificación empírica del valor del PFA del nivel base y propuesta.

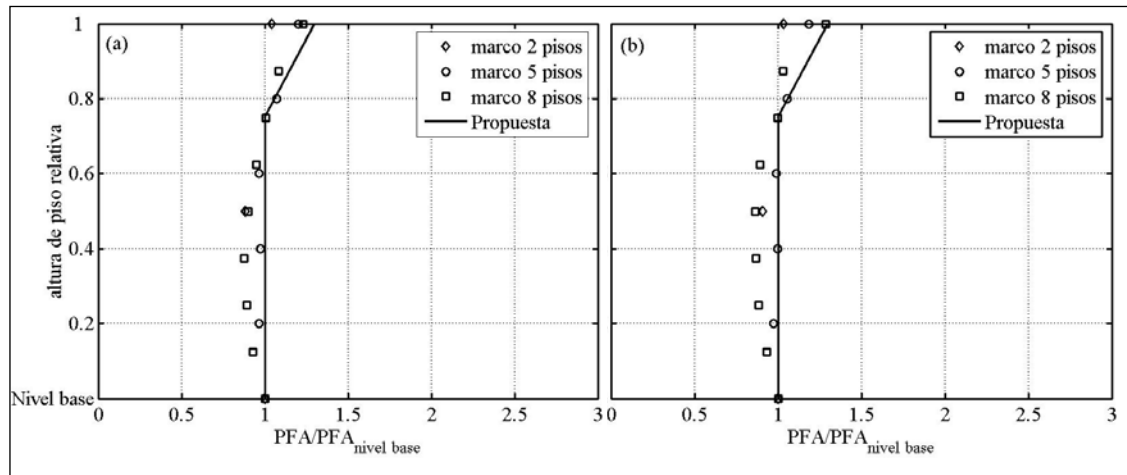


Figura 6-11 Sistemas no lineales sujetos a las excitaciones de fuente Cercana: amplificación empírica del valor del PFA del nivel base y propuesta. a) fuente Cercana I; y b) fuente Cercana II.

6.2 Espectro de Piso

En el Capítulo 5, una comparación entre los espectros de piso que proporcionan las normativas chilenas y los obtenidos a partir del proceso de simulación numérica desarrollado en este trabajo fue realizada. Se advirtió que el procedimiento de la norma NCh2369 sobreestima, en general, los espectros de piso en todo el rango de periodos, y que el procedimiento de la norma NCh2745 predice de manera aceptable las ordenadas espectrales en la zona de periodos correspondiente al período fundamental, pero sólo si el sistema de aislamiento es lineal y la excitación tiene características de fuente Lejana.

Con el propósito de lograr una mejor estimación en los espectros de piso obtenidos a partir de las normativas chilenas, un procedimiento alternativo indicado en el manual técnico *Seismic Design Guidelines for Essential Buildings* (US Army, 1988), denominado TM 5-809-10-1 en adelante, será evaluado debido a que es capaz de predecir razonablemente los espectros de piso en estructuras convencionales (Pino, 2010, Goldschmidt, 2010, Steib, 2010). Cabe aclarar que el procedimiento fue desarrollado teniendo en cuenta las características de estructuras convencionales, algunas de las cuales son distintas de aquéllas típicas de estructuras equipadas con sistemas de aislación sísmica de base (por ejemplo, el amortiguamiento siempre es de tipo clásico o “proporcional” en estructuras convencionales, y siempre es de tipo no-clásico o “no-proporcional” en estructuras sísmicamente aisladas).

El TM 5-809-10-1 proporciona una metodología para el cálculo de espectros de piso sólo para un valor de amortiguamiento igual a 0.02. En este método, un análisis modal del edificio es requerido para determinar sus períodos y formas modales. Para cada modo, la aceleración máxima de piso en cada nivel debe ser estimada como el producto de la aceleración espectral de dicho modo y el factor de participación modal del piso. Para todo valor del periodo, el valor mínimo del espectro (límite inferior) se asume igual a la aceleración máxima del piso, la cual a su vez es calculada como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS) de las máximas aceleraciones de piso para cada modo

considerado. El método resulta interesante ya que es capaz de incorporar el efecto de resonancia entre el período del elemento no estructural y los distintos periodos modales del sistema estructural soportante.

El procedimiento define un *factor de magnificación* que es dependiente del período; este factor amplifica la aceleración máxima de piso modal para tomar en cuenta la resonancia entre el componente no estructural y los períodos modales del edificio. En la Figura 6-12 se indica la forma que adopta este factor de magnificación. En esta figura T_a es el período del elemento no estructural y T es un período modal del edificio. El factor de amplificación tiene una meseta de $\pm 20\%$ el período de resonancia para tomar en cuenta la incertidumbre en la determinación del período del elemento no estructural y de los períodos modales del edificio que los contiene.

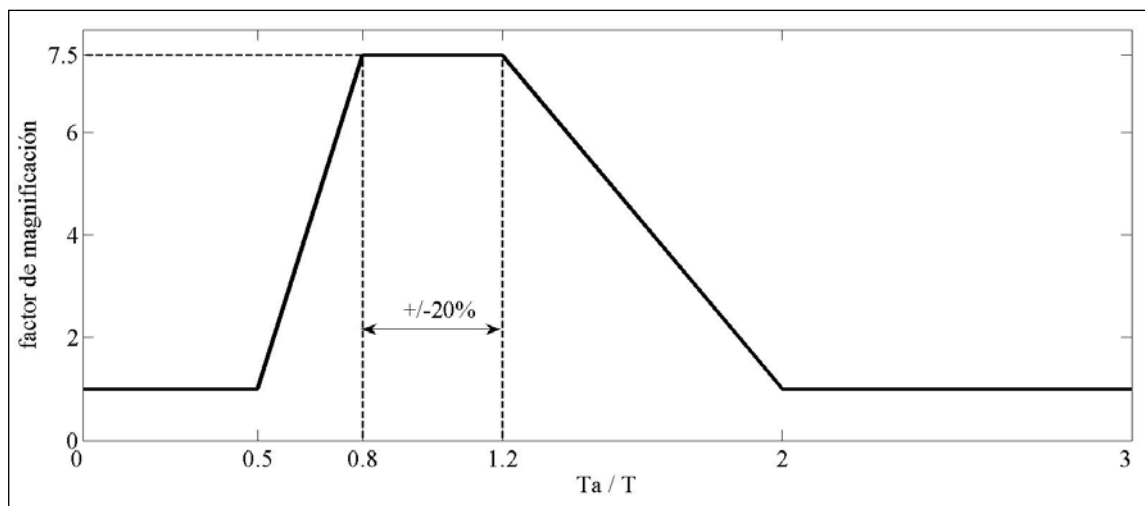


Figura 6-12 Factor de magnificación de la aceleración máxima de piso indicado en el TM 5-809-10-1.

Para cada período modal del edificio, la aceleración máxima de cada piso es afectada por el factor de magnificación (Figura 6-12). Por otro lado, los períodos normalizados T_a/T de la Figura 6-12 son multiplicados por dicho período modal. De esta manera se puede construir un “espectro de respuesta modal de piso”. Los espectros modales de cada

modo son luego combinados y el espectro de diseño de piso está dado por la envolvente de los espectros anteriores, teniendo en cuenta el valor mínimo (límite inferior) indicado anteriormente. Un ejemplo de este procedimiento se muestra en la Figura 6-13.

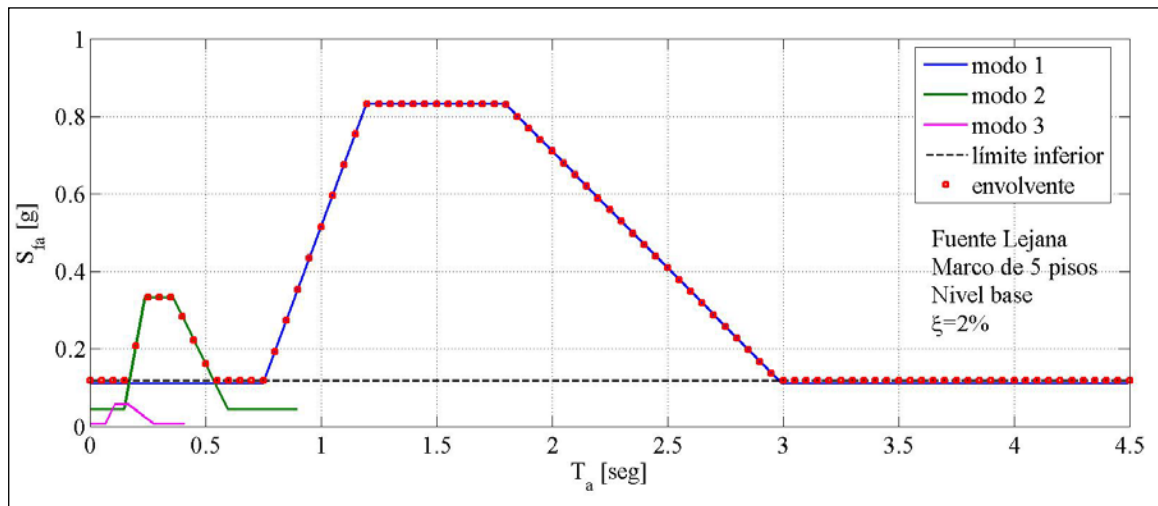


Figura 6-13 Ejemplo de espectro de piso usando el procedimiento indicado en TM 5-809-10-1

Dado que el análisis modal considerado en esta evaluación es el mismo análisis modal indicado en la norma NCh2745, las aceleraciones máximas de piso obtenidas mediante el procedimiento TM 5-809-10-1 son iguales a las obtenidas mediante la norma NCh2745, las cuales resultaron ser consistentemente no-conservativas (Figuras 5-1, 5-6, 5-7, 5-13, 5-17 y 5-18). Debido a que interesa evaluar la *forma* espectral, los espectros de piso obtenidos mediante el procedimiento indicado en el TM 5-809-10-1 fueron normalizados por las aceleraciones máximas de piso obtenidas de las simulaciones numéricas (se trata del mismo criterio adoptado exitosamente en el caso de estructuras convencionales). Cabe aclarar que el análisis modal indicado en la norma NCh2745 puede ser aplicado con la regla de combinación modal SRSS ó con la regla de combinación modal CQC, pero debido a que, tal como se indicó antes, la respuesta de estructuras sísmicamente aisladas es en gran medida la respuesta de un sistema de un

grado de libertad, ambas reglas de combinación modal arrojan esencialmente los mismos resultados.

6.2.1 Sistemas Lineales

6.2.1.1 Respuesta a la Excitación de Fuente Lejana

Los espectros de piso obtenidos con el procedimiento indicado en el TM 5-809-10-1 y los espectros obtenidos con las simulaciones numéricas se muestran en la Figura 6-14 a la Figura 6-16 . Se puede notar que la predicción es aceptable en la zona del segundo período modal, excepto en los pisos intermedios en donde las formas modales asociadas son de poca amplitud. En la zona del período fundamental, la estimación que proporciona el procedimiento indicado en el TM 5-809-10-1 es bastante deficiente en todos los casos.

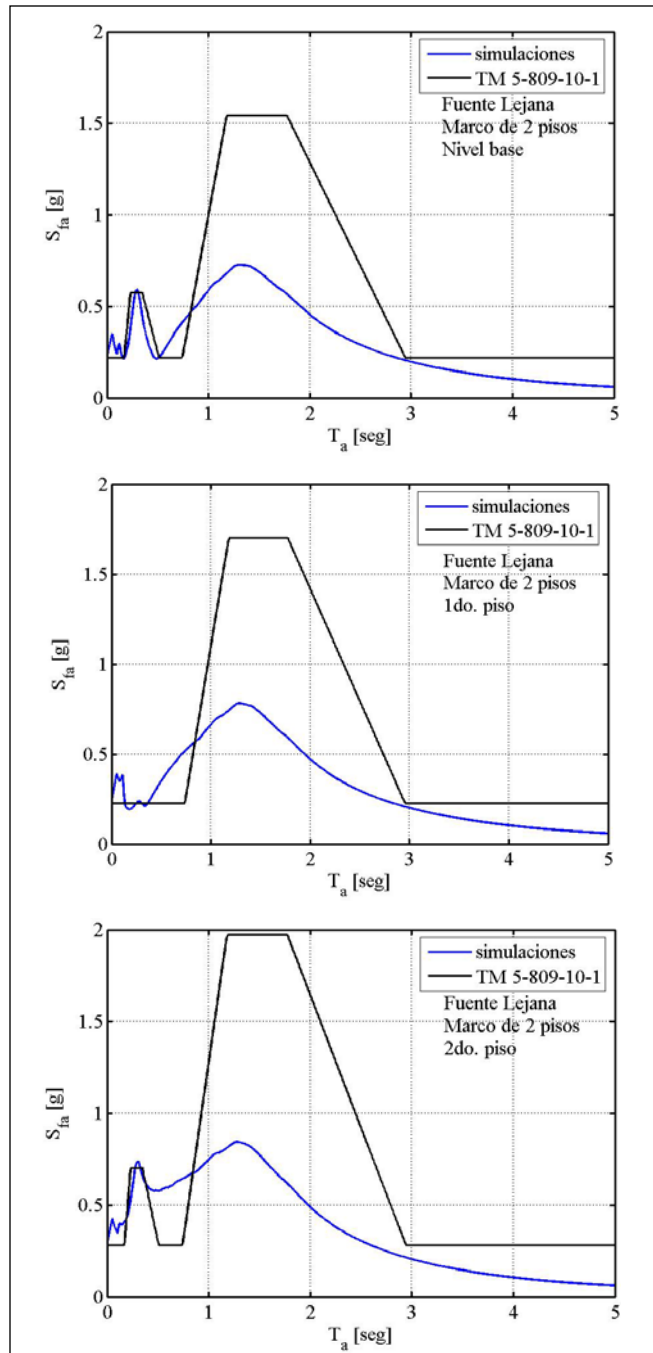


Figura 6-14 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.02).

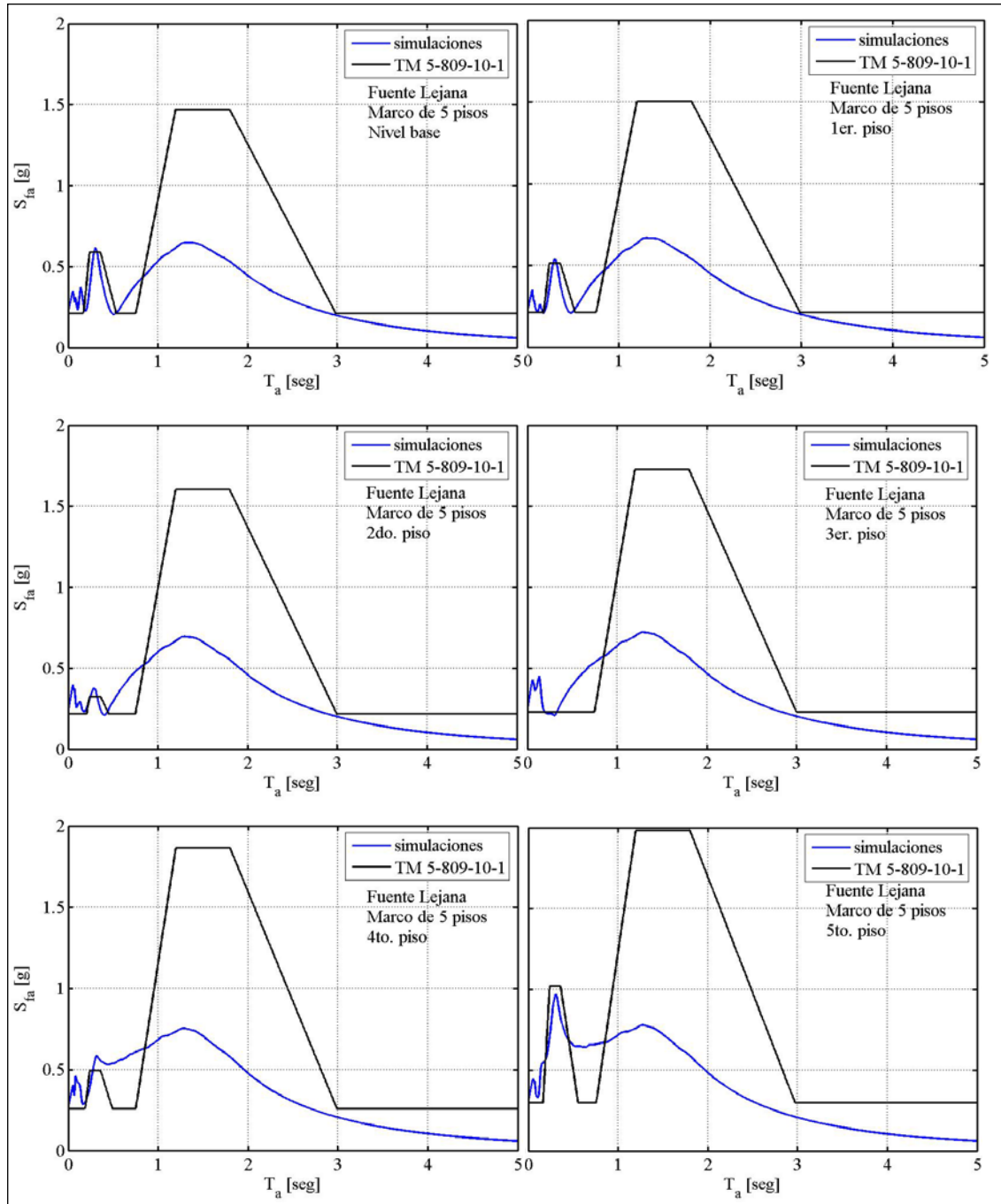


Figura 6-15 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.02).

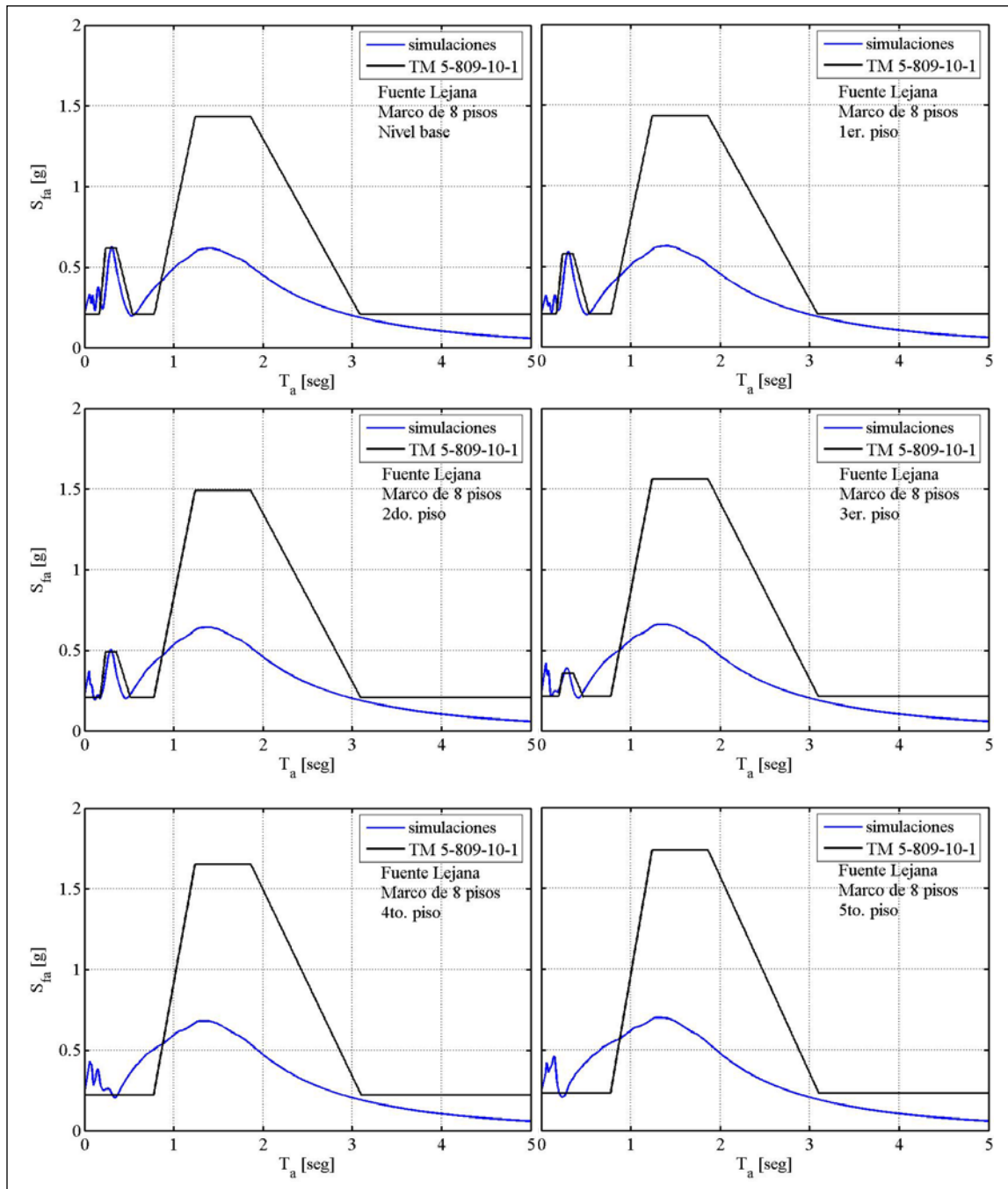


Figura 6-16 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.02).

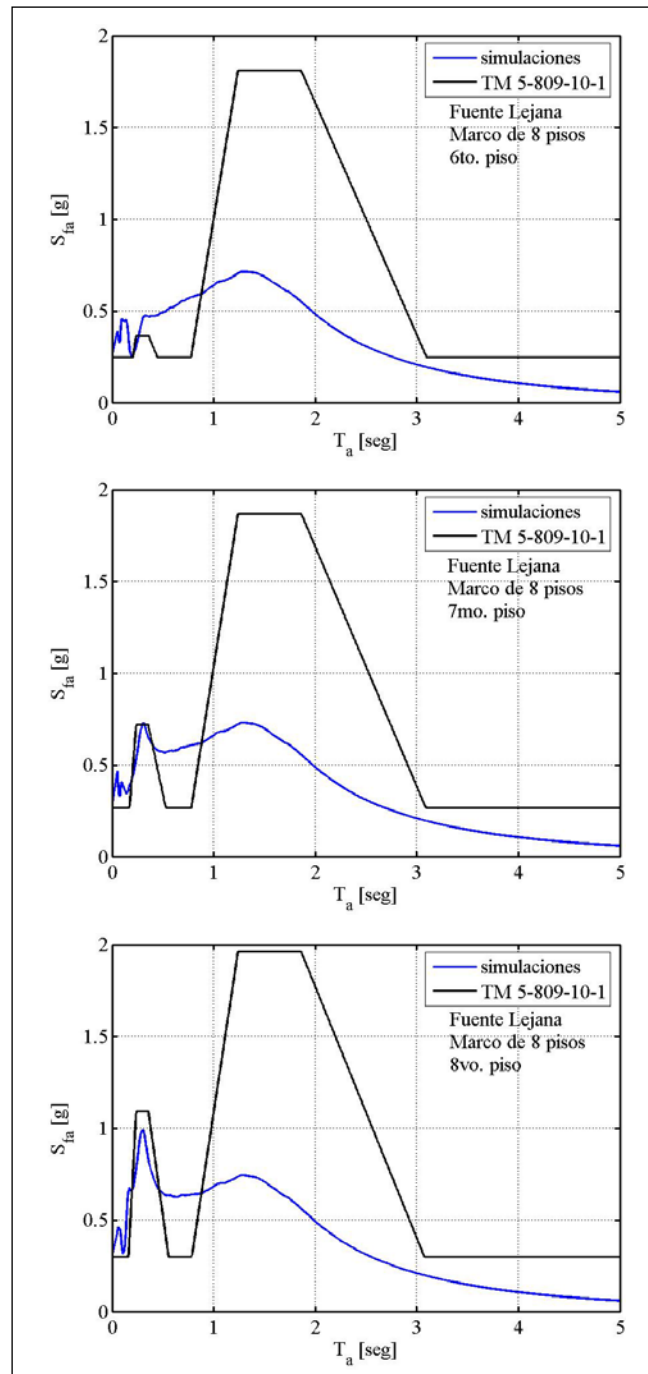


Figura 6-16 (continuación)

6.2.1.2 Respuesta a las Excitaciones de Fuente Cercana

Los espectros de piso obtenidos con el procedimiento del TM 5-809-10-1 y los espectros obtenidos con las simulaciones numéricas se muestran en la Figura 6-17 a la Figura 6-22. Se advierte que el procedimiento indicado en el TM 5-809-10-1 no es adecuado en ningún caso, y su deficiencia es más significativa en la zona del período fundamental del sistema soportante.

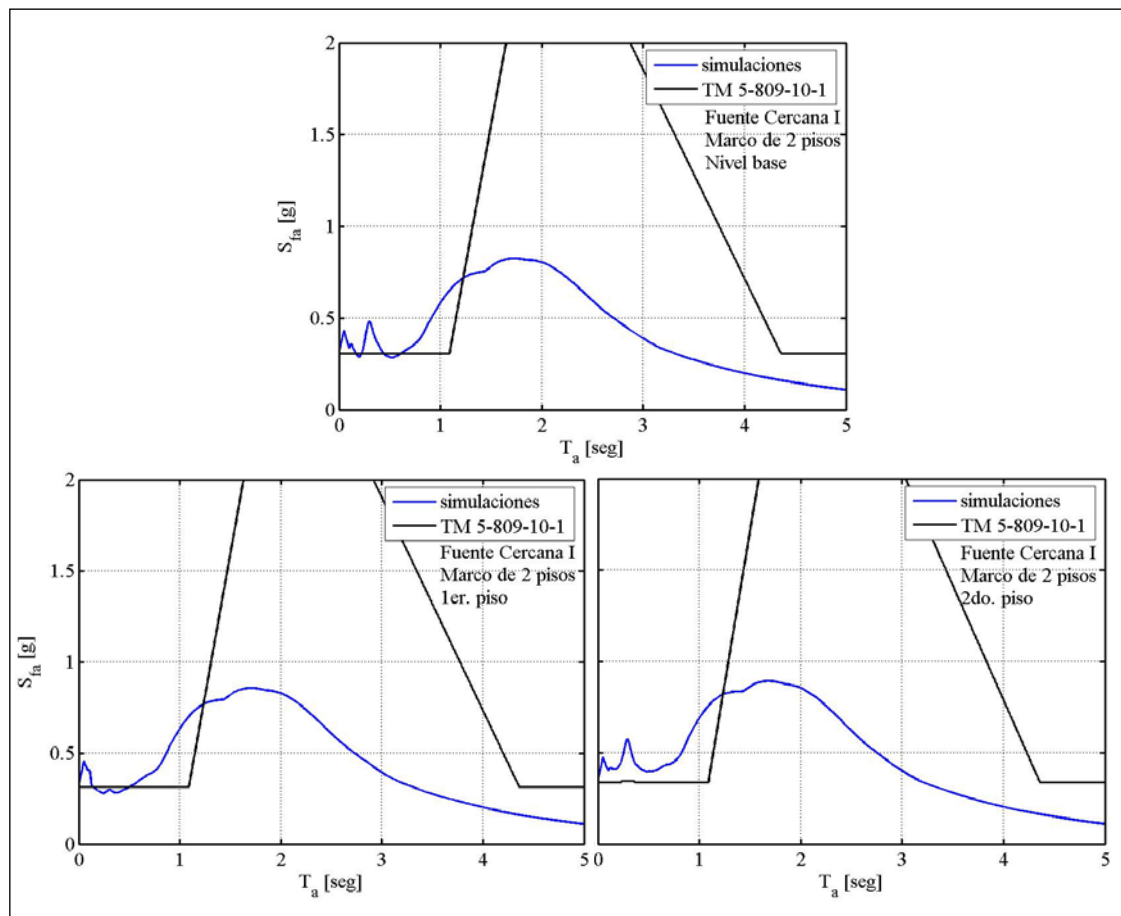


Figura 6-17 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.02).

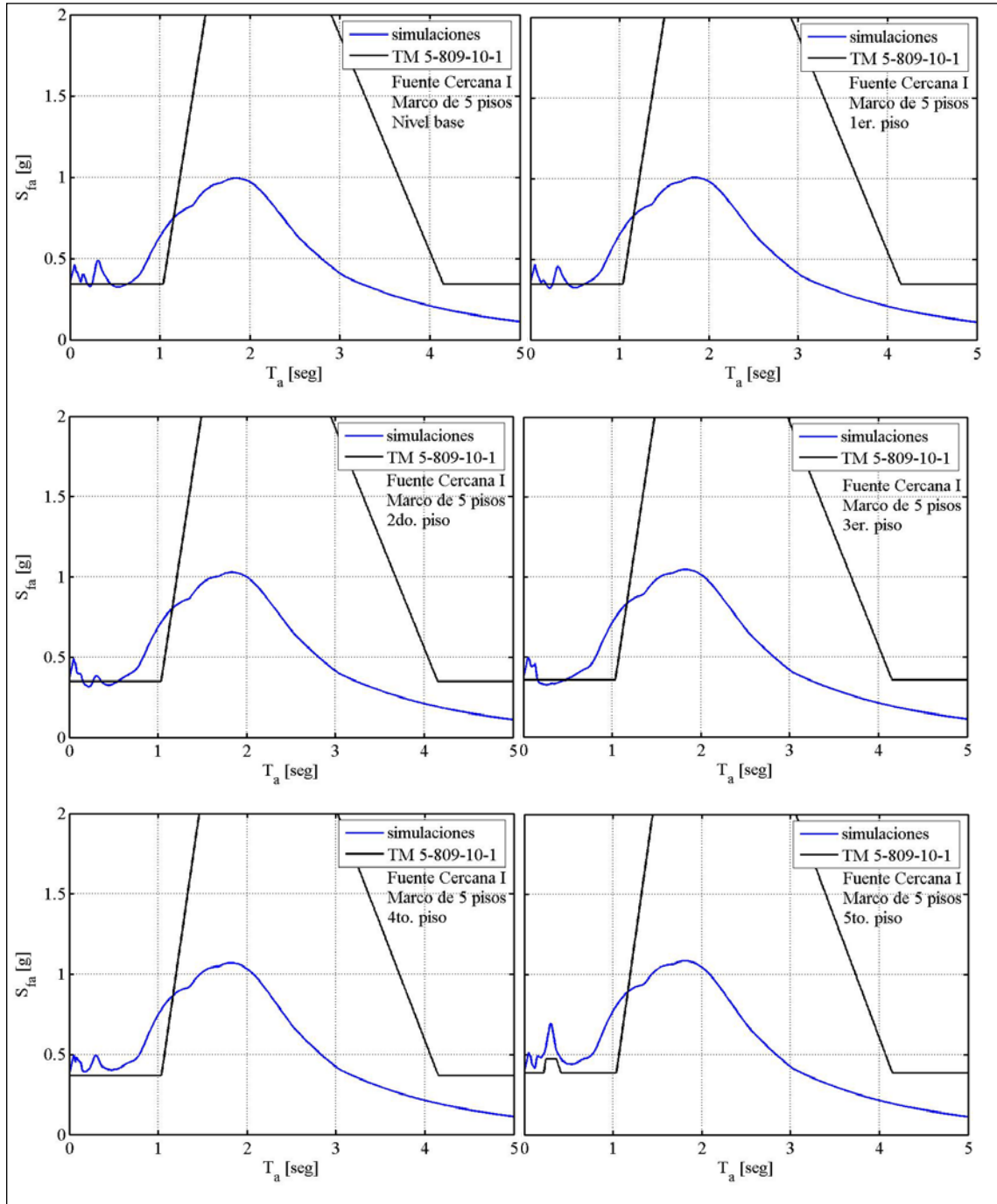


Figura 6-18 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.02).

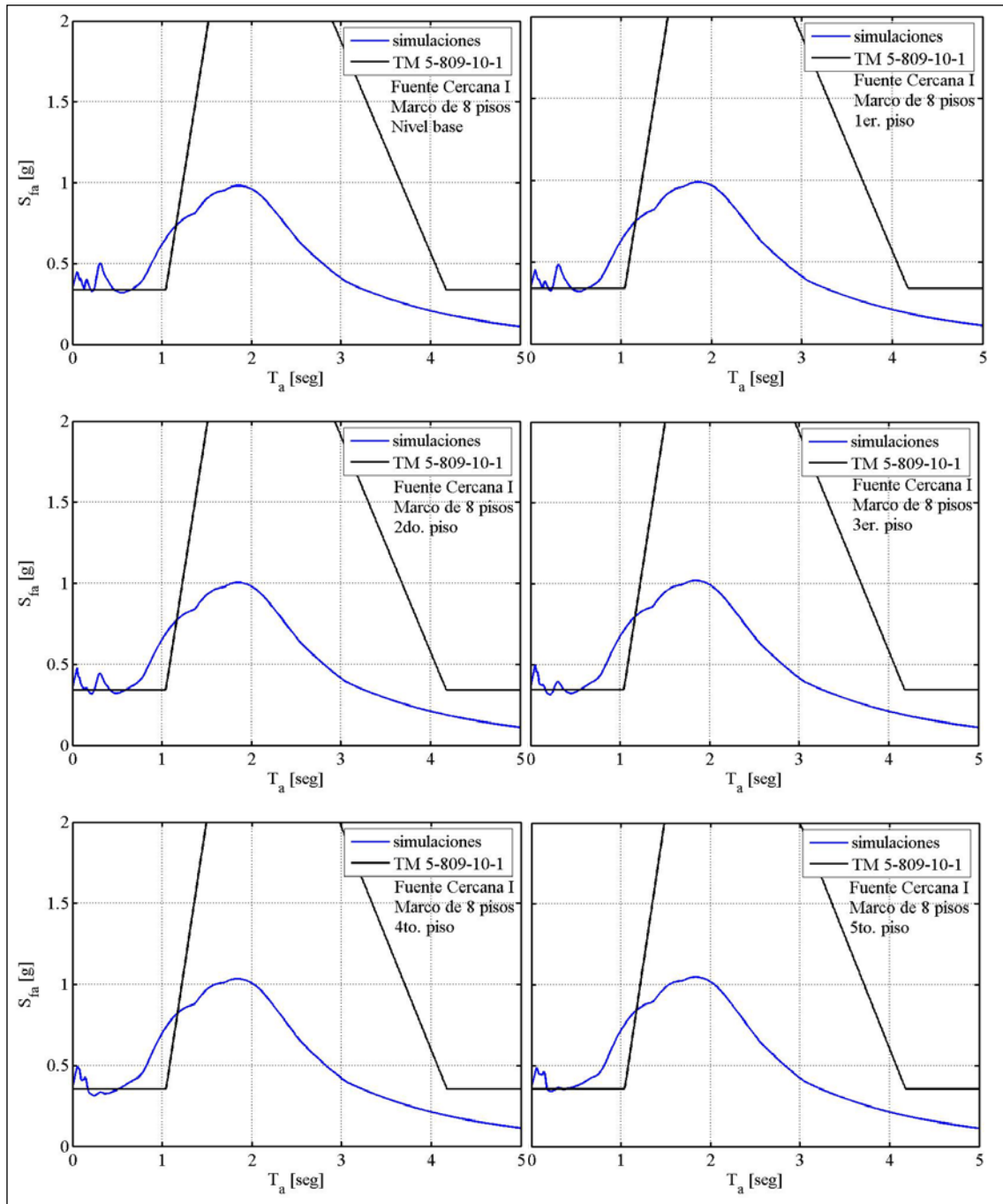


Figura 6-19 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.02).

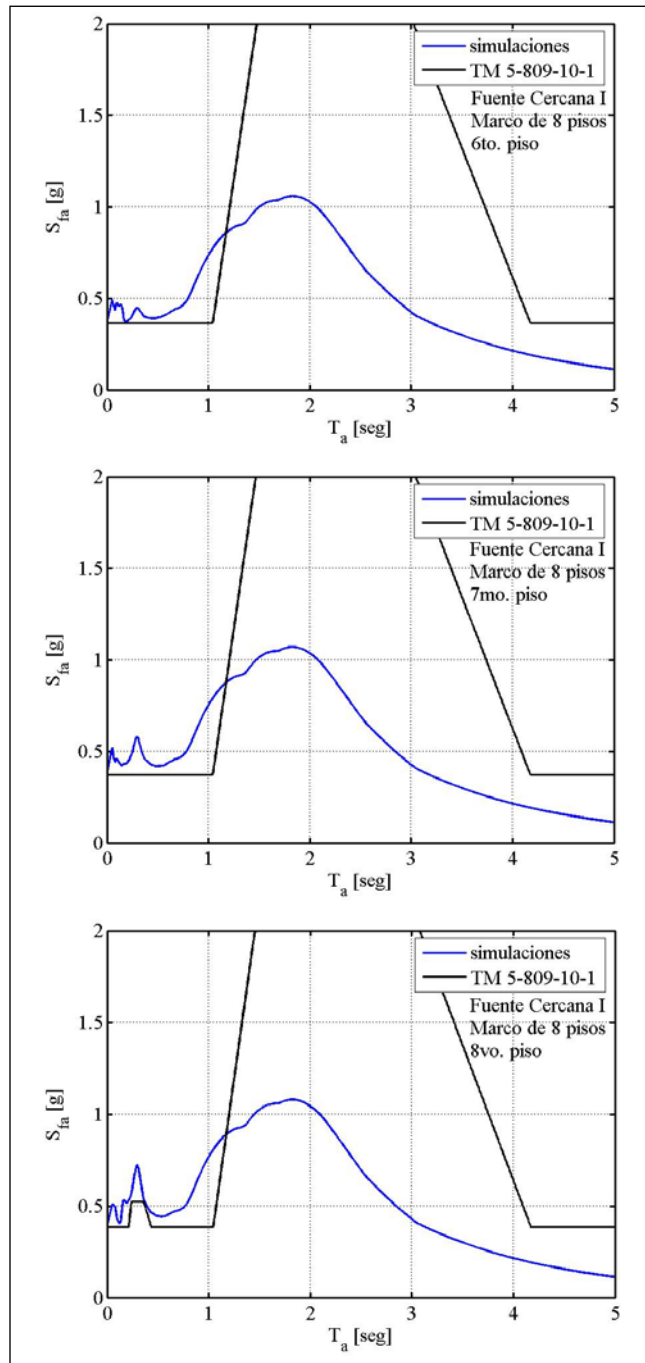


Figura 6-19 (continuación).

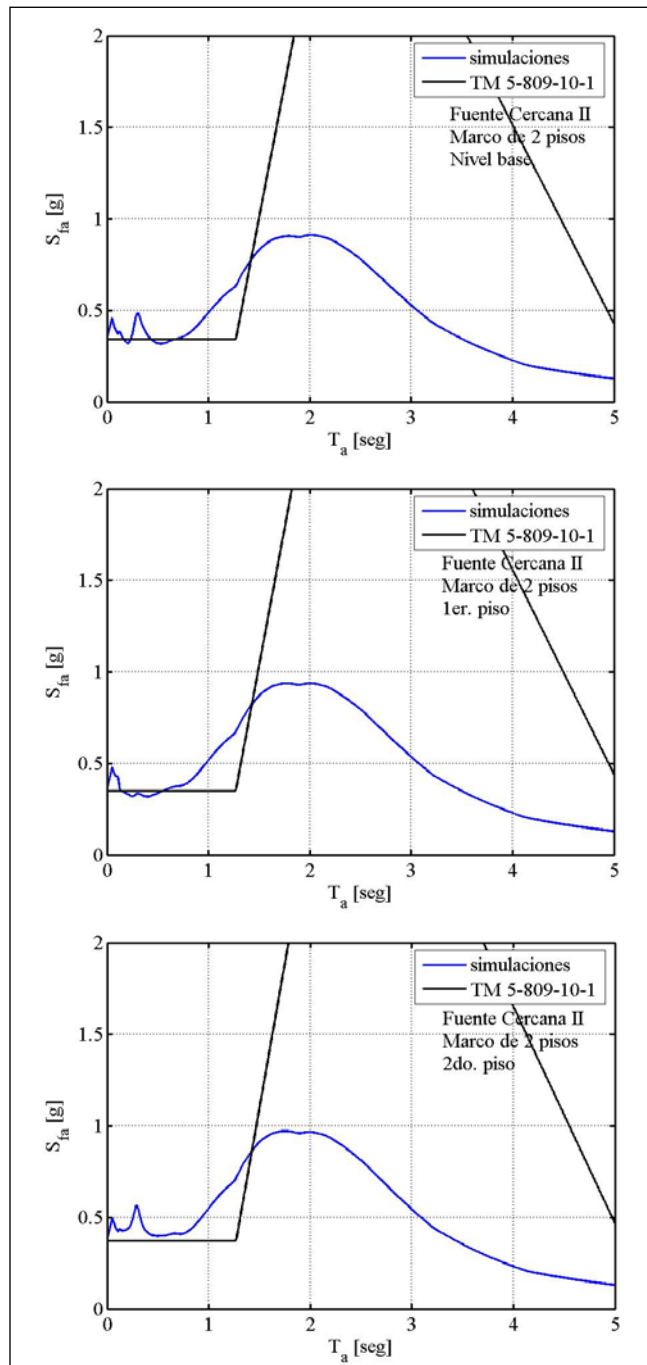


Figura 6-20 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.02).

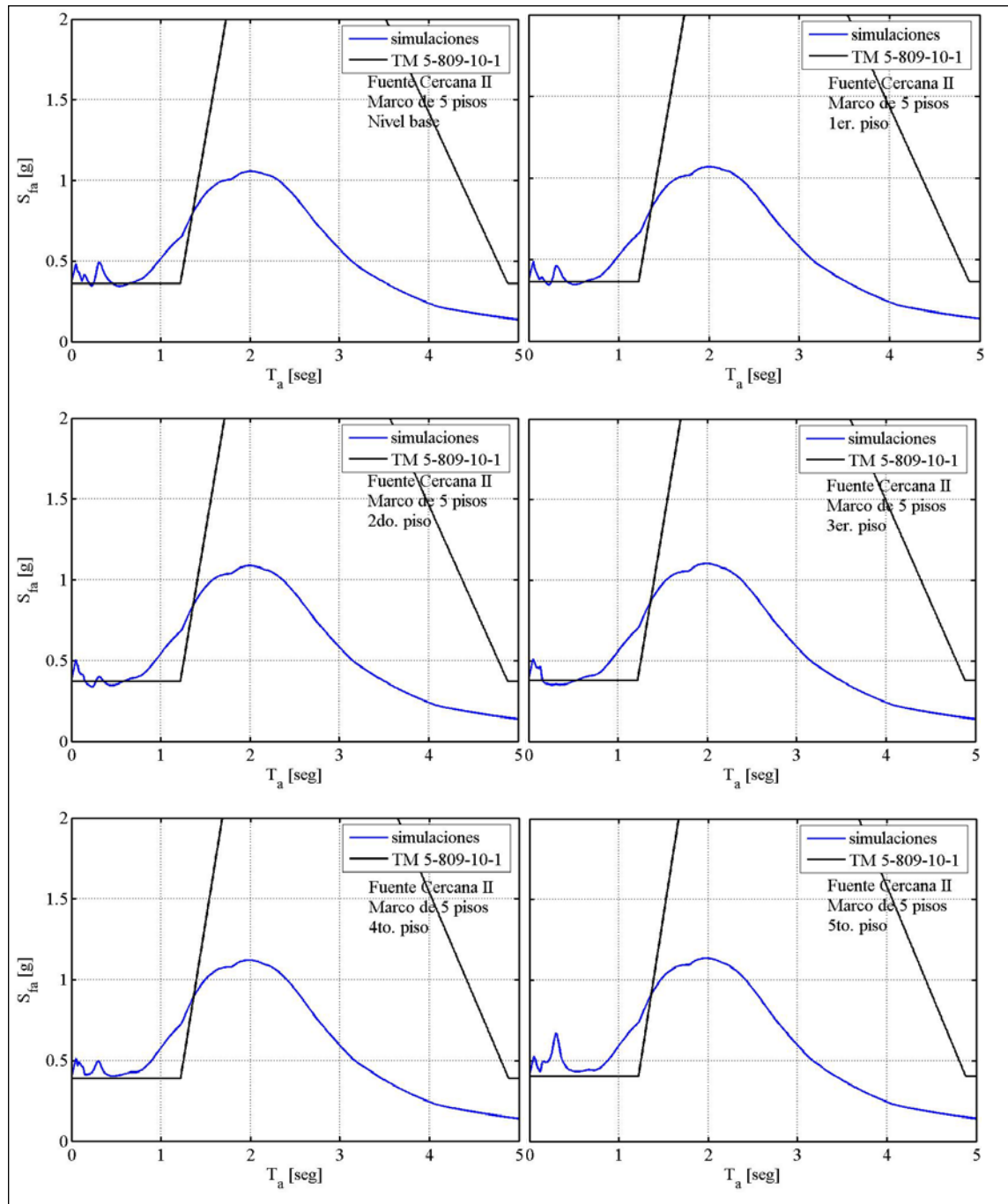


Figura 6-21 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.02).

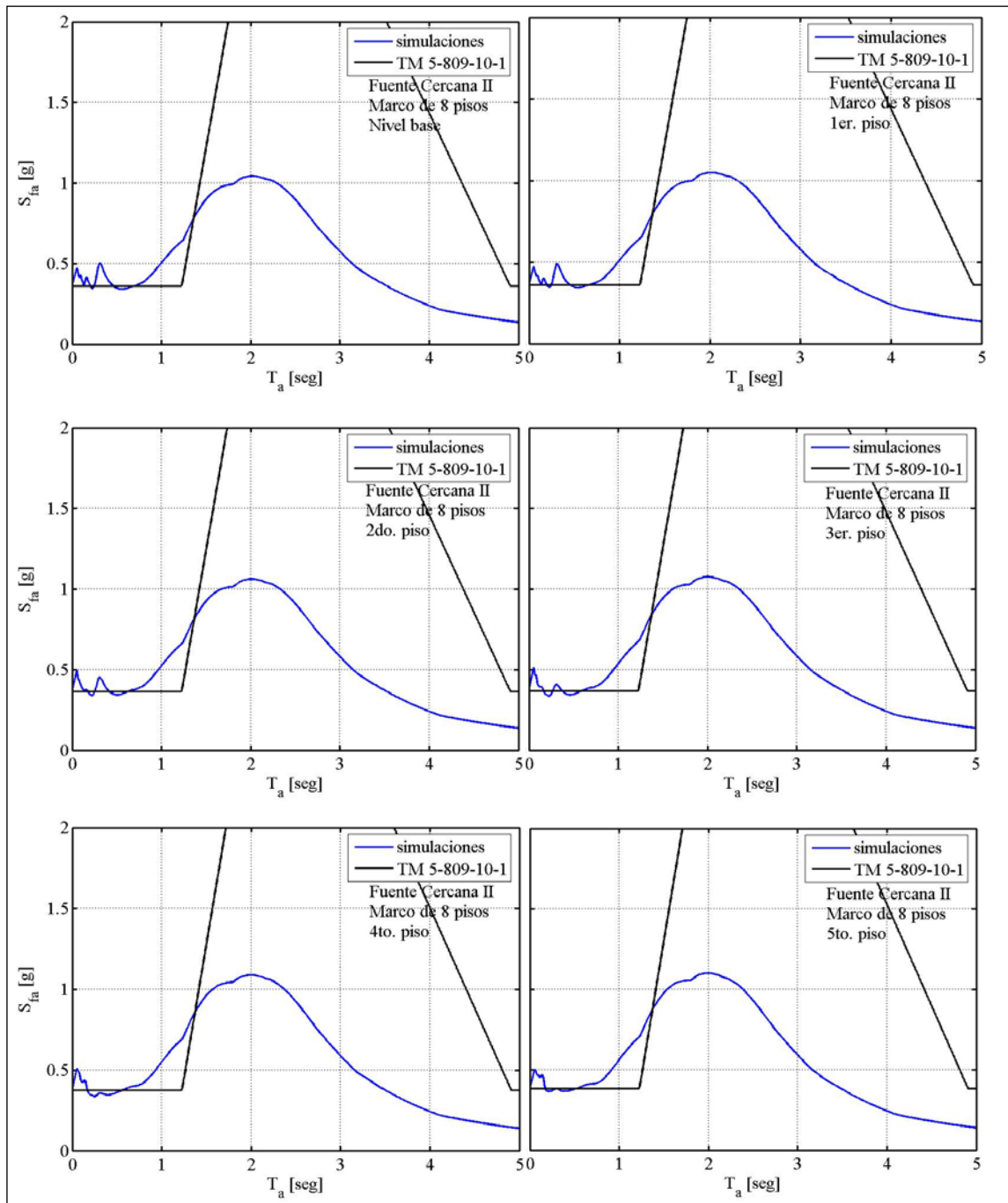


Figura 6-22 Espectros de piso de los sistemas lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.02).

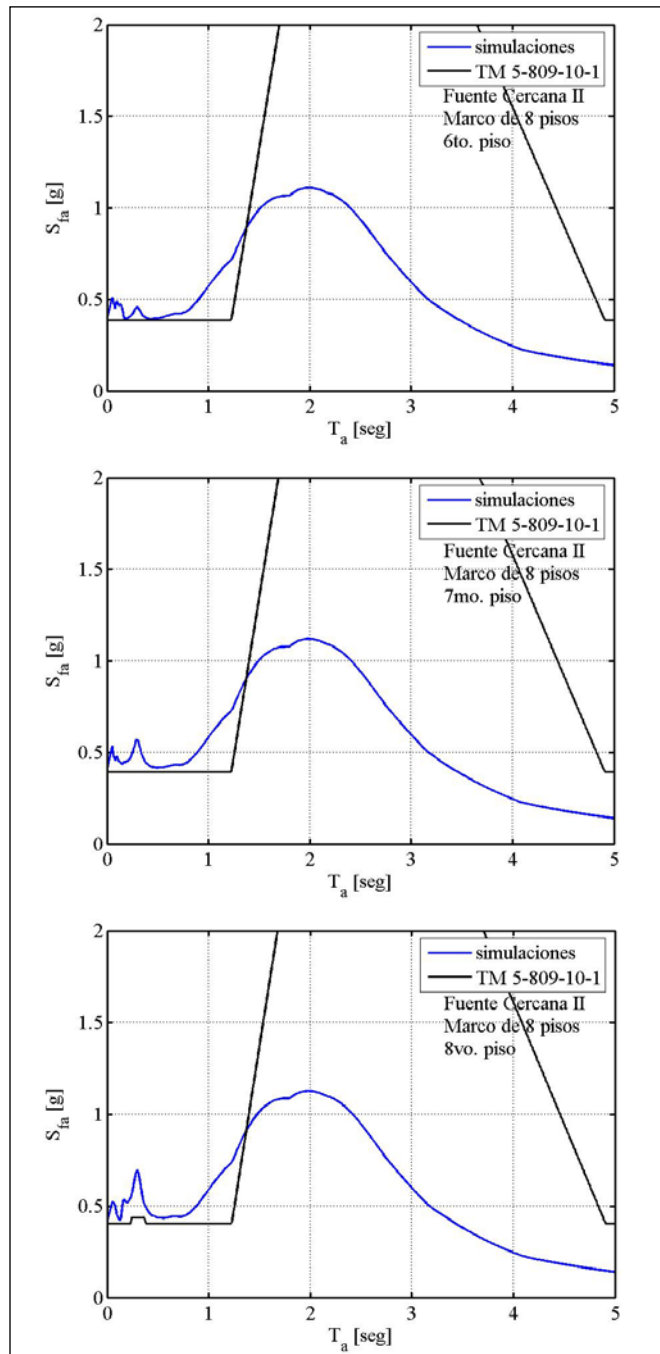


Figura 6-22 (continuación).

6.2.2 Sistemas No Lineales

6.2.2.1 Respuesta a la Excitación de Fuente Lejana

Los espectros de piso obtenidos con el procedimiento del TM 5-809-10-1 y los espectros obtenidos con las simulaciones numéricas se muestran en la Figura 6-23 a la Figura 6-25. Se observa que para ciertos casos, la predicción en la zona del segundo período modal en los pisos superiores e inferiores es relativamente aceptable. Pero en general, el procedimiento indicado en el TM 5-809-10-1 no es adecuado y su deficiencia es más significativa en la zona del período fundamental del sistema soportante.

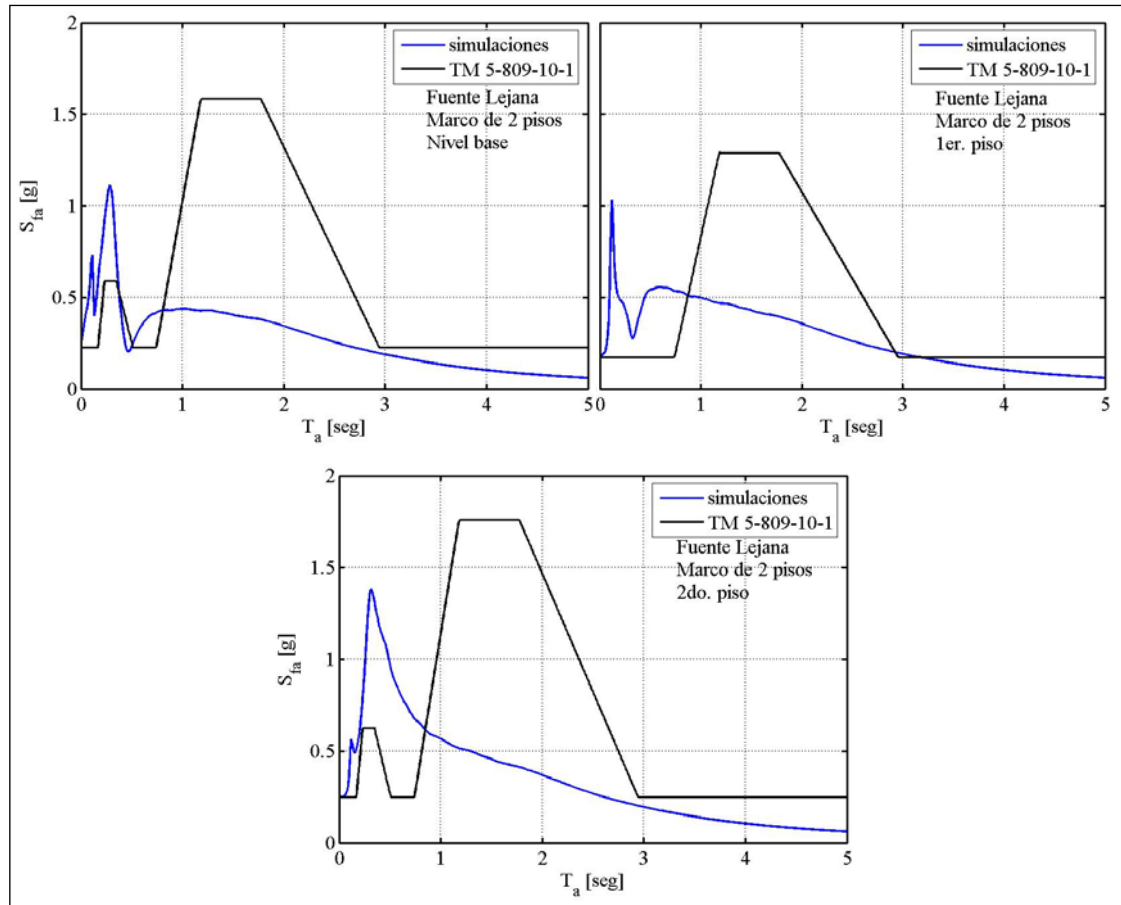


Figura 6-23 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.02).

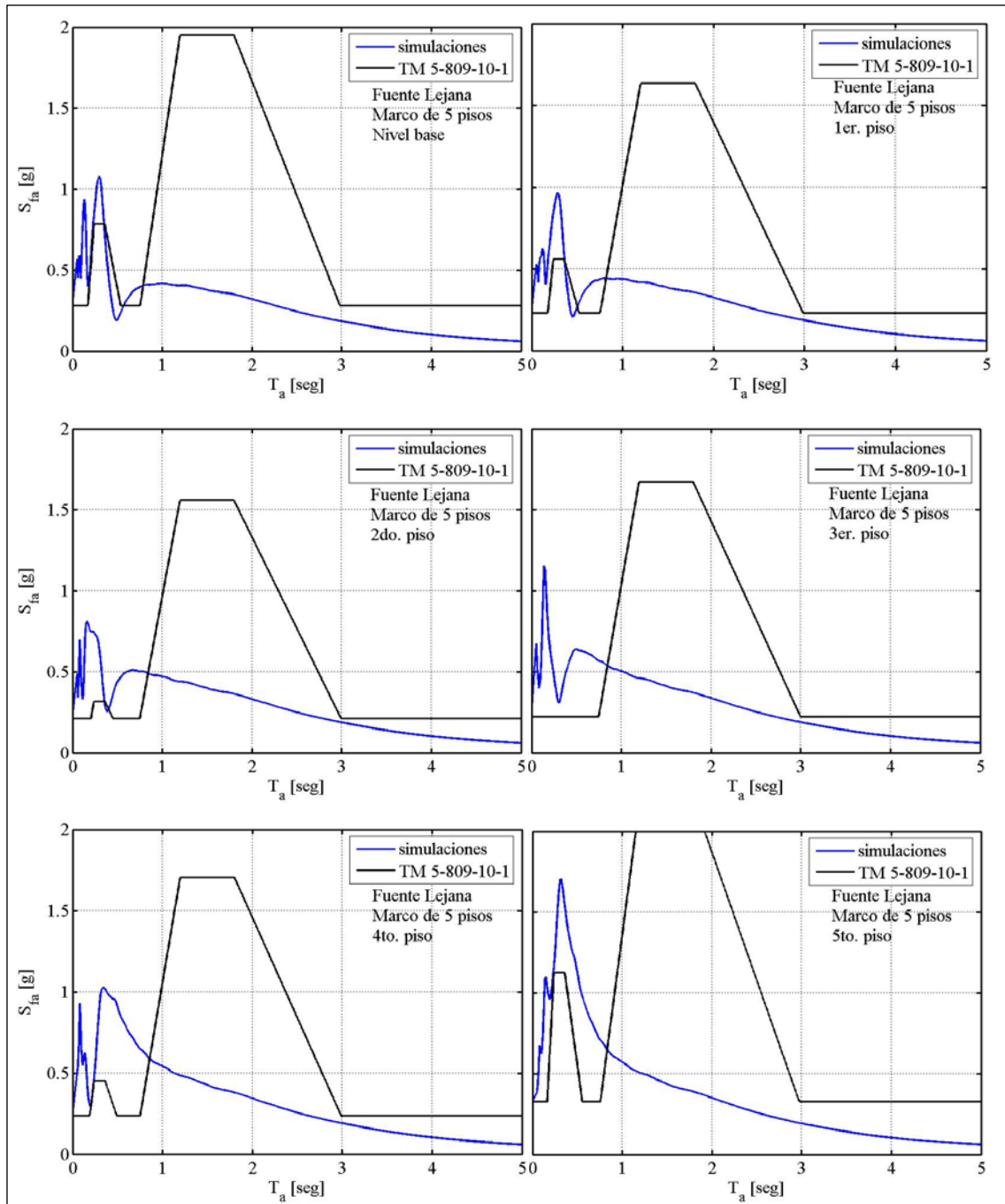


Figura 6-24 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.02).

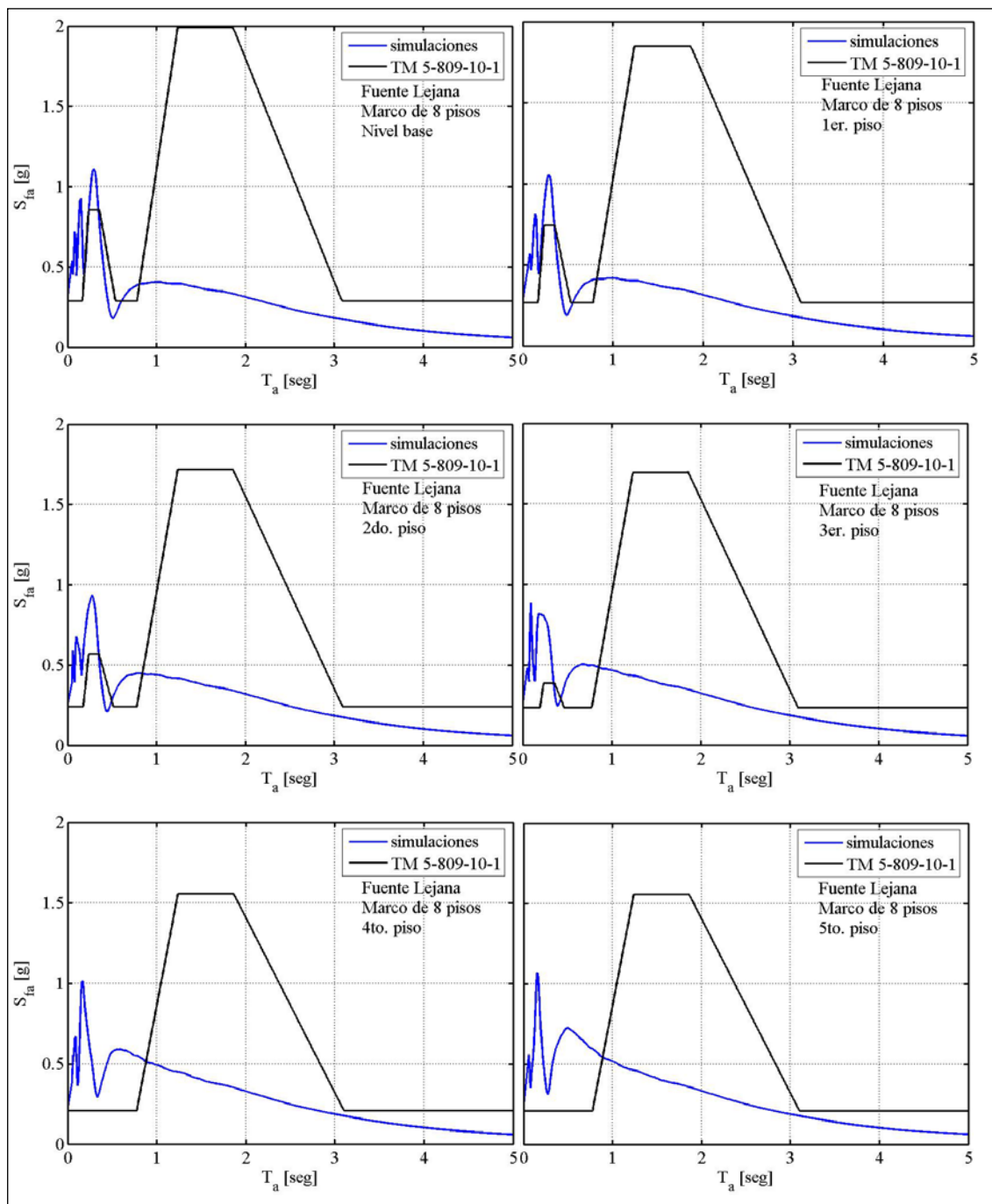


Figura 6-25 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Lejana. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.02).

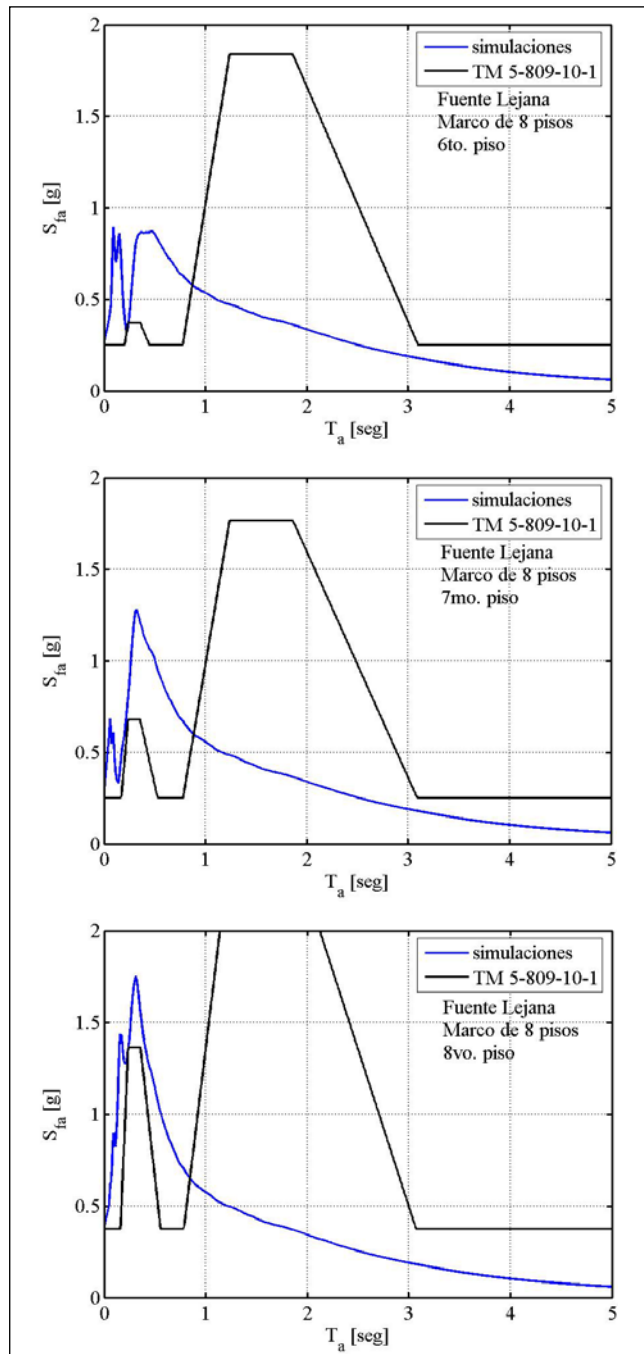


Figura 6-25 (continuación).

6.2.2.2 Respuesta a las Excitaciones de Fuente Cercana

Los espectros de piso obtenidos con el procedimiento del TM 5-809-10-1 y los espectros obtenidos con las simulaciones numéricas de los sistemas no lineales se muestran en la Figura 6-26 a la Figura 6-31. Se advierte que el procedimiento indicado en el TM 5-809-10-1 no es adecuado en ningún caso.

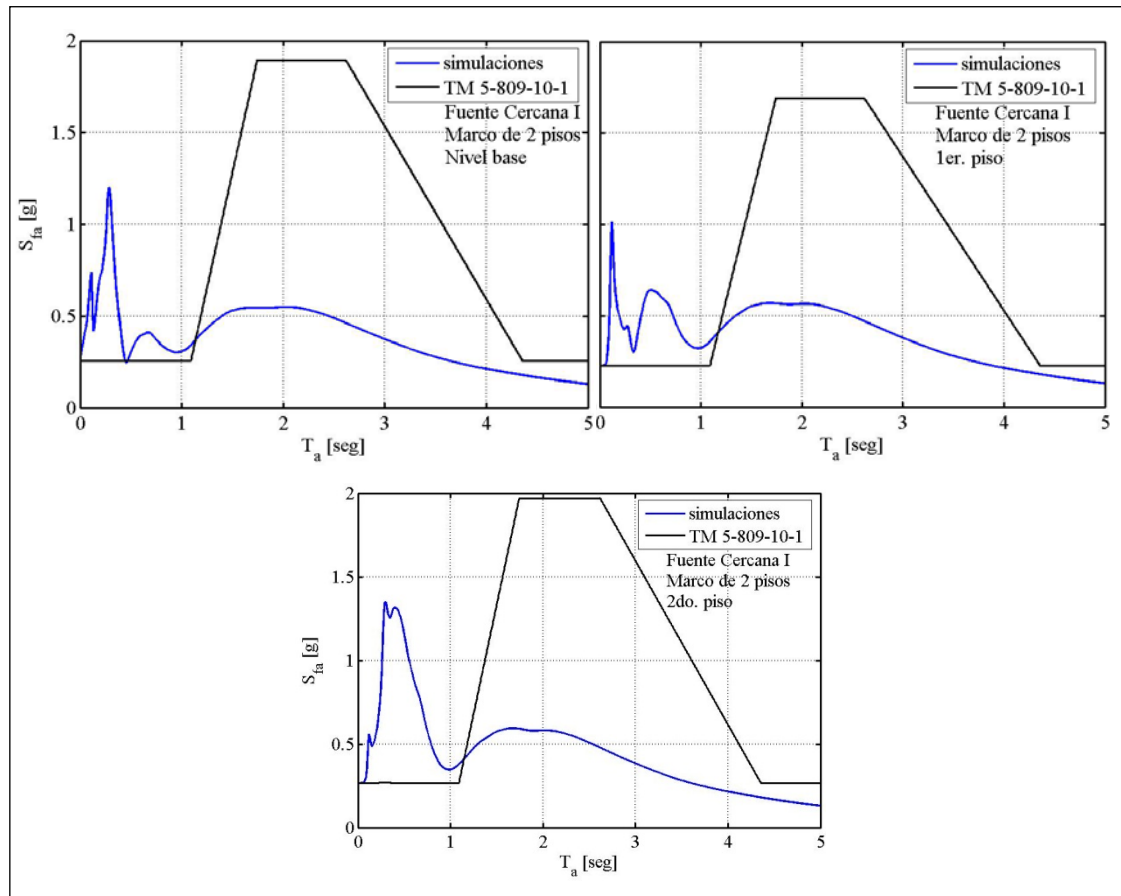


Figura 6-26 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.02).

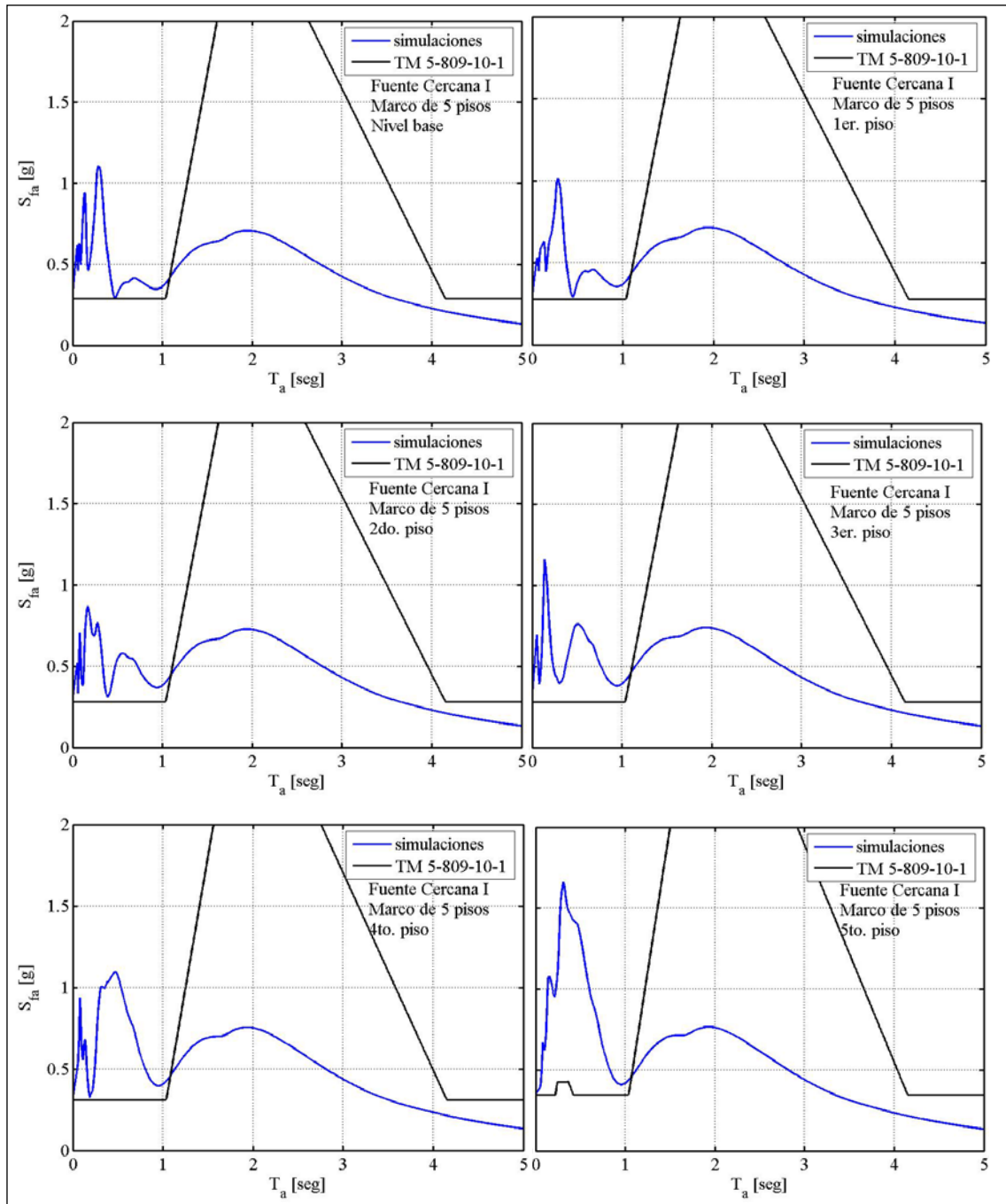


Figura 6-27 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.02).

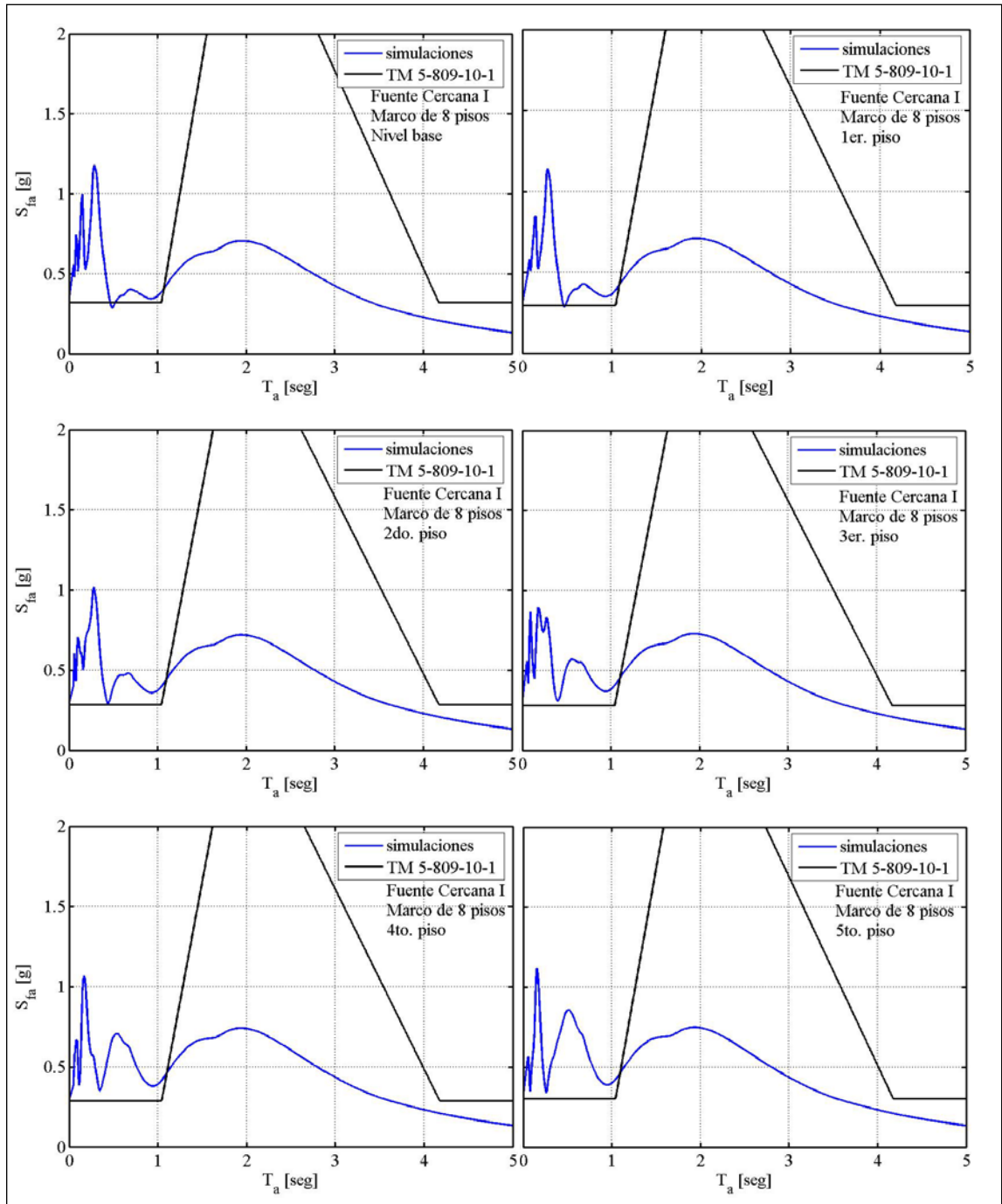


Figura 6-28 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana I. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.02).

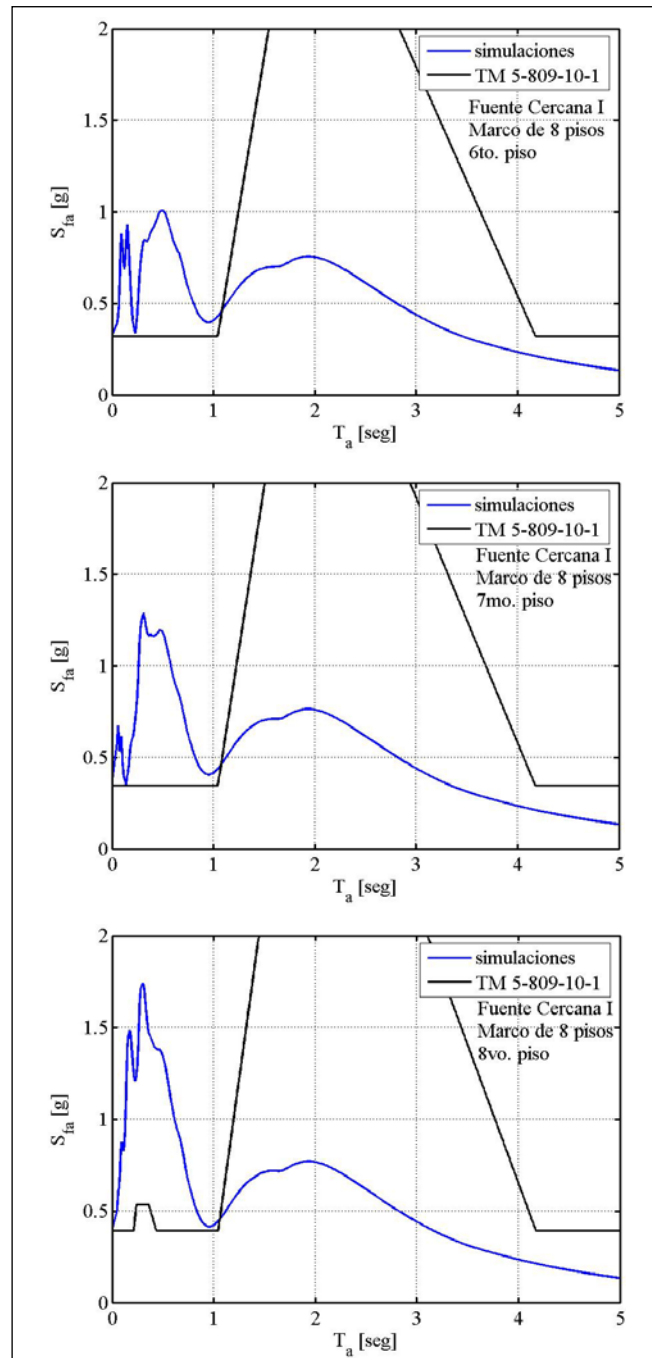


Figura 6-28 (continuación).

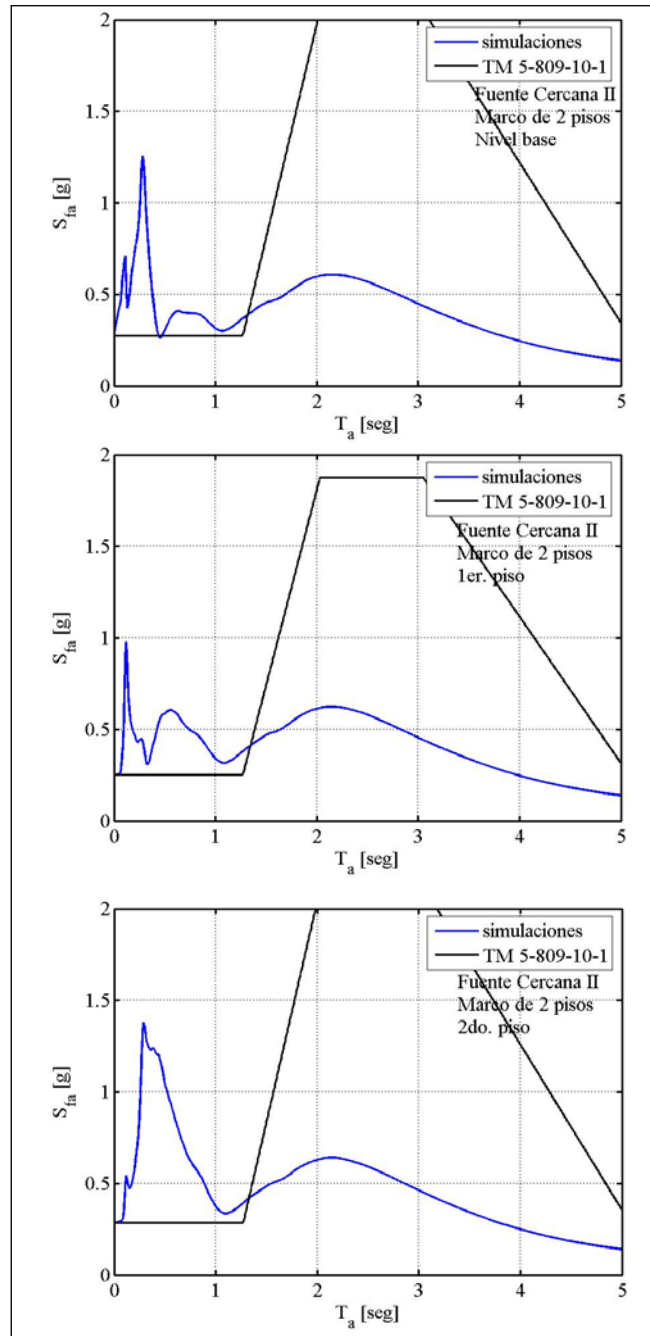


Figura 6-29 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 2 pisos (amortiguamiento=0.02).

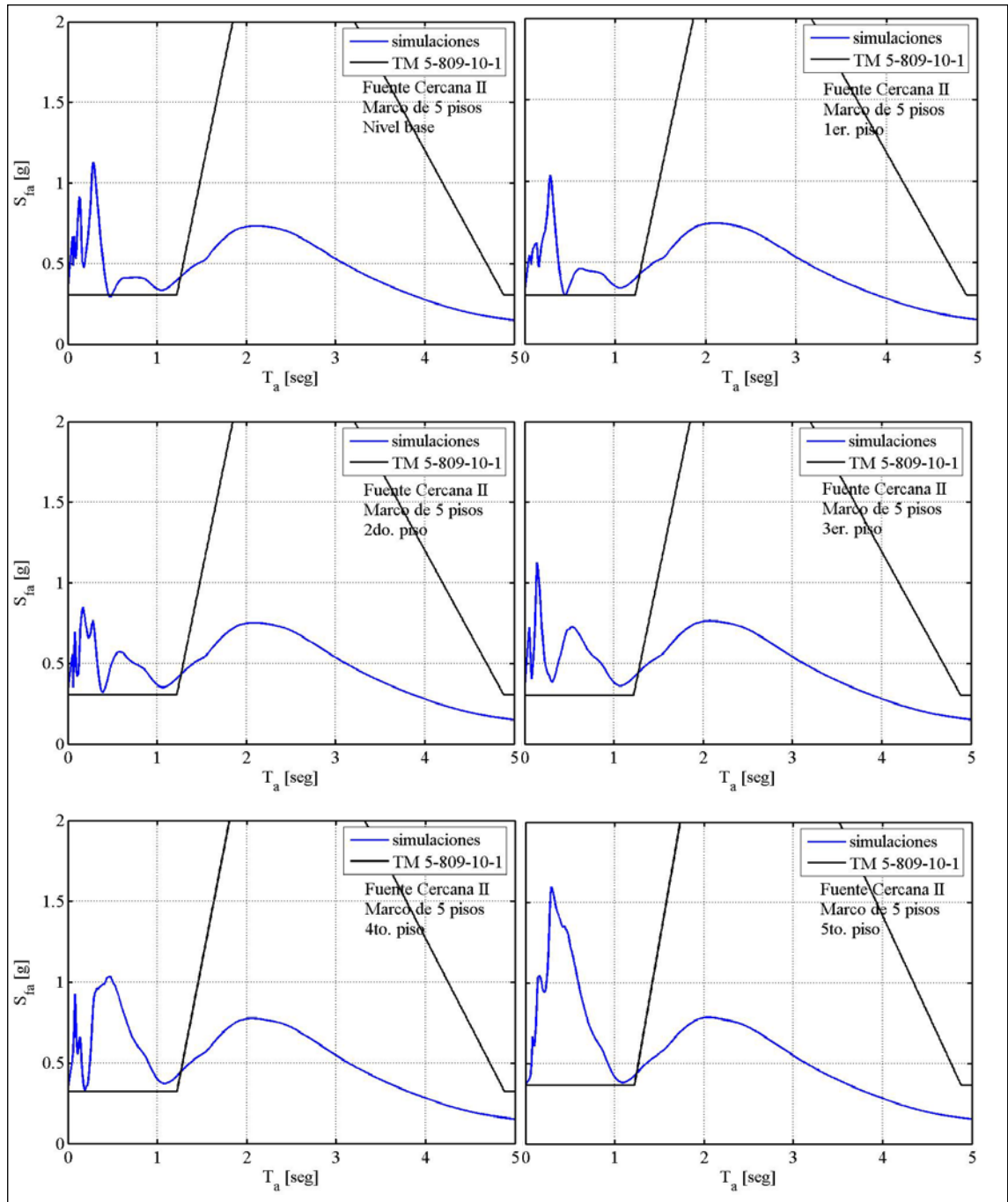


Figura 6-30 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 5 pisos (amortiguamiento=0.02).

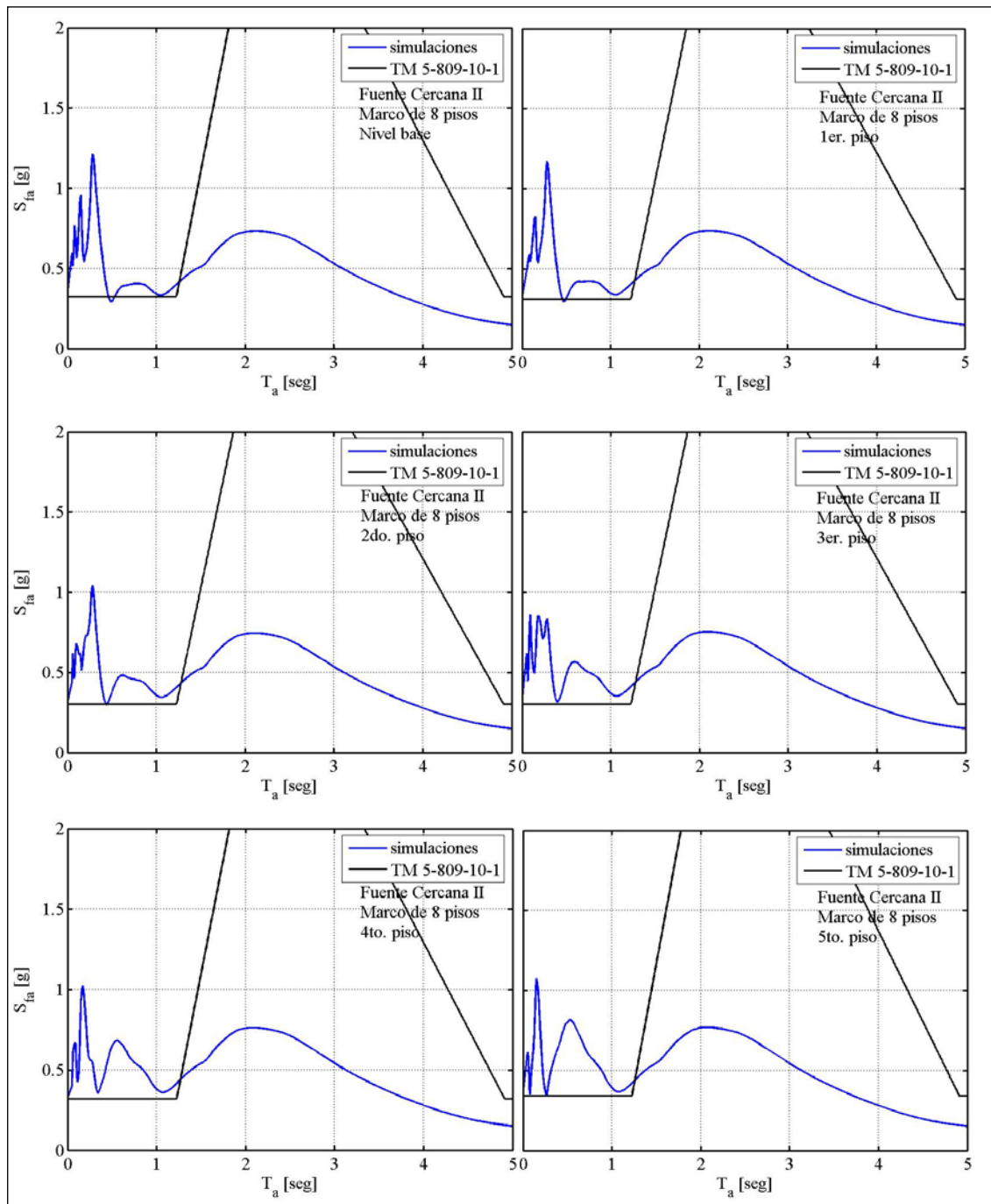


Figura 6-31 Espectros de piso de los sistemas no lineales sujetos a la excitación de fuente Cercana II. Marco de 8 pisos (amortiguamiento=0.02).

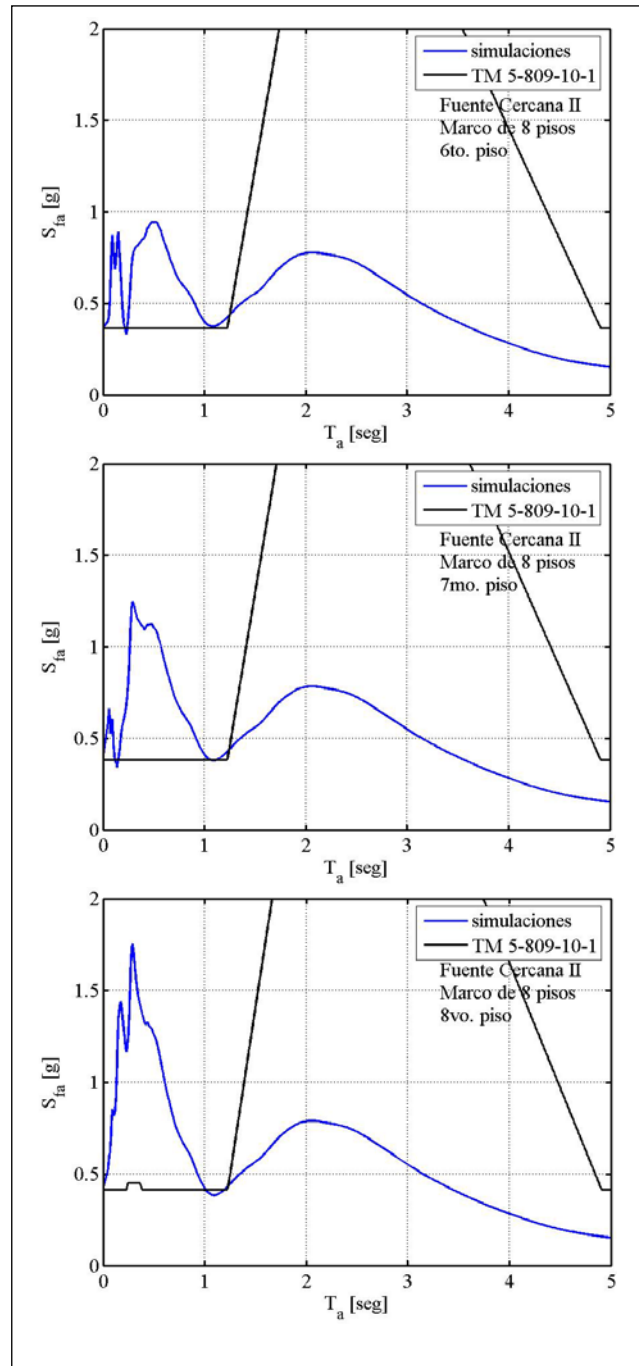


Figura 6-31 (continuación).

Contrario al caso de estructuras convencionales (Pino, 2010, Goldschmidt, 2010, Steib, 2010), la aplicación del procedimiento indicado en el TM 5-809-10-1 para la estimación de los espectros de piso en estructuras sísmicamente aisladas es, en general, deficiente.

Sólo se observan valores razonables de predicción en la zona del segundo período modal para el caso de sistemas lineales sometidos a excitación de fuente Lejana. Se concluye entonces que el procedimiento indicado en el TM 5-809-10-1 no conduce a estimaciones más razonables que las indicadas en la norma NCh2745, y en consecuencia se desaconseja su uso como procedimiento alternativo.

7. SUMARIO Y CONCLUSIONES

Una caracterización de las aceleraciones de piso en edificios equipados con aislación sísmica de base, sometidos a la acción sísmica de registros sintéticos representativos de excitaciones tanto de fuente Lejana (modelo modificado de Kanai-Tajimi) como de fuente Cercana (modelo de Mavroeidis y Papageorgiou), fue realizada. El estudio incluyó el análisis de la demanda sísmica en elementos no estructurales “rígidos”, para los cuales sólo es necesario conocer la aceleración máxima de piso, y en elementos no estructurales “flexibles”, para los cuales es necesario conocer el espectro de piso. Se consideraron 3 modelos bidimensionales de edificios de distinto número de pisos configurados en base a marcos de hormigón, y en cada uno de ellos se estudió: (a) un sistema de aislación sísmica no-lineal compuesto por aisladores tipo FPS; y (b) un sistema “ideal” de aislación sísmica lineal, el cual puede ser materializado de distintas maneras. Las excitaciones sísmicas fueron modeladas como procesos aleatorios no-estacionarios y la respuesta tiempo-historia de los modelos fue obtenida mediante integración directa.

Se encontró que los valores del *PFA* son siempre menores que el valor del *PGA*, independientemente del tipo de comportamiento del sistema de aislación y del tipo de excitación sísmica. Para la excitación de fuente Lejana no se observó una tendencia clara entre la relación del *PFA* de sistemas no lineales y aquéllos de sistemas lineales; pero para el caso de las excitaciones de fuente Cercana, en general, menores valores del *PFA* fueron obtenidos en los sistemas no lineales. También se encontró que las características de los espectros de piso dependen en gran medida del tipo de sistema de aislación de base (lineal o no lineal). Para la zona del período fundamental, las ordenadas espectrales de piso correspondientes a los sistemas lineales son mayores a las correspondientes a los sistemas no lineales, y para la zona de modos superiores la tendencia es contraria. Asimismo, se encontró que a partir de cierto período, las relaciones entre ordenadas

espectrales correspondientes a los sistemas no lineales y las correspondientes a los sistemas lineales de todos los pisos son prácticamente iguales entre sí.

Una evaluación de los criterios de diseño para elementos no estructurales contenidos en las normativas chilenas fue realizada, y se encontró que el procedimiento indicado en la norma NCh2745 proporciona resultados del *PFA* que son siempre menores que aquéllos obtenidos mediante análisis dinámico tiempo-historia, independientemente de si las fuerzas sísmicas efectivas son obtenidas mediante análisis estático o mediante análisis modal espectral, e independientemente del tipo de sistema de aislación y del tipo de excitación sísmica. Se encontró además que los espectros de piso indicados en la norma NCh2745 proporcionan valores aceptables sólo para el caso de sistemas lineales y excitación de fuente Lejana, y sólo en la zona de periodos correspondiente al período fundamental de la estructura soportante.

Se consideró que las disposiciones contenidas en la normativa chilena para la estimación de las demandas sísmicas en elementos no estructurales pueden ser mejoradas, y para ello una propuesta basada en la incorporación de un factor de corrección denominado B_A fue realizada. Con esta propuesta, el nivel de predicción de los valores normalizados del *PFA* que proporciona la normativa fue, en promedio, mejorado desde un 57% a un 118% para el caso de sistemas lineales sometidos a la excitación de fuente Lejana; para las excitaciones de fuente Cercana, la predicción fue mejorada, en promedio, desde un valor igual a 54% hasta un valor igual a 102%. En cuanto a los espectros de piso, un procedimiento contenido en US Army (1988) denominado TM 5-809-10-1 fue estudiado con el objetivo de incorporar el efecto de resonancia entre los modos superiores de la estructura soportante y el elemento no estructural. Se encontró que este procedimiento no es una alternativa superadora al procedimiento indicado en la norma NCh2745, ya que sólo proporciona una aceptable predicción de las ordenadas espectrales en la zona del segundo período modal de los sistemas lineales sometidos a la excitación de fuente Lejana.

REFERENCIAS

- Almazán, J., De la Llera, J. C., & Inaudi, J. (1998). Modeling Aspects of Structures Isolated with the frictional pendulum system. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* , 27, 845-867.
- ASCE/SEI 7-05. (2007). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Reston, USA.
- ATC. (2008). *Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage State-of-the-Art and Practice Report (ATC-69)*. Applied Technology Council. Redwood City, CA, EE.UU.
- ATC. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Report ATC-40*. Applied Technology Council. Redwood City, CA, EE.UU.
- Bertero, R. D., & Bertero, V. V. (2002). Performance-based seismic engineering: the need for a reliable conceptual comprehensive approach. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* , 31, 627–652.
- BSSC. (2004). *Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures (FEMA 450)*. Washington, USA.
- Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of Structures*. New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Christopoulos, C., & Filiatrault, A. (2008). *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*. Pavia, Italia: IUSS PRESS.
- Clough, R. W., & Penzien, J. (2003). *DYNAMICS OF STRUCTURES* (third ed.). Berkeley, CA, USA: Computers & Structures, Inc.
- Constantinou, M. C., Soong, T. T., & Dargush, G. F. (1998). *Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit*. Buffalo, NY, USA: MCEER.
- Constantinou, M., Mokha, A., & Reinhorn, A. (1990). Teflon Bearings in Base Isolation II: Modeling. *Journal of Structural Engineering, ASCE* , 116, 455-474.
- Fan, F.-G., & Ahmadi, G. (1990). Floor Response Spectra for Base-Isolated Multi-Storey Structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* , 19 (3), 377-388.
- Inaudi, J. A., & De la Llera, J. C. (1992). *Dynamic Analysis of Nonlinear Structures using State-Space Formulation and Partitioned Integration Schemes. Report No UCB/EERC-92/18*. Berkeley, CA, USA.
- INN. (2003). *Análisis y Diseño de edificios con aislación sísmica NCh 2745.Of2003*. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.

- INN. (2002). *Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales NCh 2369.Of2002*. Instituto Nacional de Normalización. Santiago.
- INN. (1996). *Diseño Sísmico de Edificios, NCh 433.Of96*. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- Jangid, R. S., & Kelly, J. M. (2001). Base isolation for near-fault motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* , 30 (5), 691-707.
- Kehoe, B., & Hachem, M. (2003). Procedures for Estimating Floor Accelerations. *Proceedings of Seminar on Seismic Design, Performance and Retrofit of Nonstructural Components in Critical Facilities (ATC-29-2)*, Applied Technology Council , 361-374.
- Kelly, J. M., & Tsai, H.-C. (1985). Seismic Response of Light Internal Equipment in Base-Isolated Structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* , 13 (6), 711-732.
- Lin, J., & Mahin, S. A. (1985). Seismic Response of Light Subsystems on Inelastic Structures. *Journal of Structural Engineering* , 111 (2), 400–417.
- Mavroeidis, G. P., & Papageorgiou, A. S. (2003). A Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions. *Bulletin of the Seismological Society of America* , 93 (3), 1099–1131, .
- Paulay, T., & Priestley, M. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. New York, USA: John Wiley.
- Pino, C. (2010). *Respuesta sísmica de aceleración máxima de pisos y espectros de pseudo-aceleraciones de piso en edificios estructurados con marcos de acero. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Especialización Ingeniería Estructural y Geotéc*. Santiago, Chile.
- Politopoulos, I., & Khac Pham, H. (2008). Sensitivity of seismically isolated structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* , DOI: 10.1002/eqe.879.
- The MathWorks. (2004). MATLAB.
- US Army. (1988). *Seismic Design Guidelines for Essential Buildings, TM 5-809-10-1*. USA.
- Villaverde, R. (2009). *Fundamental Concepts Of Earthquake Engineering*. Boca Raton, USA: CRC Press.
- Villaverde, R. (2004). *Seismic Analysis and Design of Nonstructural Elements. Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*, Bozorgnia Y. and Bertero V.V. (editors). Boca Raton, USA: CRC Press.

Villaverde, R. (1997b). Seismic design of secondary structures: state of the art. *Journal of Structural Engineering* , 123 (8), 1011-1019.