

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Estudio comparativo de una edificación de período corto y período largo
con aislamiento de base elastomérico y sin aislamiento de base**

José Sebastián Bustamante de los Ríos

Fabricio Yépez, PhD. Director de Tesis

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención
del título de Ingeniero Civil

Quito, Mayo de 2013

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Estudio comparativo de una edificación de período corto y período largo
con aislamiento de base elastomérico y sin aislamiento de base**

José Sebastián Bustamante de los Ríos

Fabricio Yépez, PhD.

Director de la Tesis y Miembro del Comité

Fernando Romo, MSc.

Director de la Carrera de Ingeniería Civil

Ximena Córdova, PhD.

Decana de la Escuela de Ingeniería

Colegio Politécnico

Quito, Mayo 2013

©Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: _____

Nombre: José Sebastián Bustamante de los Ríos

C.I: 010511243-7

Fecha: Mayo de 2013

Dedicatoria

Dedico la elaboración de este documento a mis padres Wilson y Consuelo, a mi hermana Sofía y en especial a mi hermano Wilson por quien obtuve la beca.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por las bendiciones recibidas, a mi familia por todo su cariño y apoyo brindado, a la Universidad San Francisco de Quito por darme la oportunidad de culminar mi profesión con beca de estudios, a mi director de tesis Fabricio Yépez por su guía y solidaridad profesional, a mi gran amigo Roberto Estévez y a todos mis compañeros y profesores que tuve la oportunidad de conocer y compartir tiempo durante mi vida universitaria.

Resumen.

En el presente documento se estudia el comportamiento dinámico de dos edificaciones, una de período corto, que es el modelo de un hospital, y otra de período largo, la cual fue diseñada únicamente para cumplir con los objetivos de este estudio. Ambas edificaciones se modelan con sistema de aislamiento de base elastomérico y sin aislamiento de base. El análisis tiempo historia realizado se ejecuta mediante el programa Sap2000 con 9 registros sísmicos obtenidos de la base de datos PEER y un sismo artificial realizado por el Dr. Fabricio Yépez. En el presente estudios se analiza la respuesta de desplazamientos horizontales y de aceleración de cada uno de los cuatro modelos estructurales con los 9 registros sísmicos escogidos para el estudio. Los resultados obtenidos indican la eficiencia del aislamiento de base elastomérico en edificios de período corto y a su vez, la ineficiencia de su uso en edificios de períodos largos.

Abstract

This thesis study the dynamic behavior of two structures, a short period building which is a hospital, and a long period structure designed according to this study's objectives. Both buildings are modeled using elastomeric base isolators and without them. Time - history analysis is performed with structural analysis software – Sap2000; for this analysis, 9 seismic records from the PEER database and an artificial earthquake record by Dr. Fabricio Yépez are considered. This study analyses the dynamic responses in terms of horizontal displacements and accelerations, due to the seismic records, acting on the structures. Results show that the use of elastomeric base isolators is more efficient when applied to short period buildings rather than long period structures.

Antecedentes.

El peligro sísmico existente en distintas zonas del Ecuador ha hecho necesario generar códigos y normas de construcción sismo resistente. La normativa ecuatoriana vigente propone un espectro elástico de diseño basado en aceleraciones, el cual es resultado de análisis estocásticos del peligro sísmico zonificado en todo el territorio del país. Sin embargo, esta propuesta de diseño tiende a incrementar las secciones de la edificación, esta propuesta disipa la energía sísmica directamente mediante las deformaciones de los elementos estructurales lo que no garantiza un rendimiento óptimo durante la acción de un sismo. Por esta razón, se han creado sistemas de disipación sísmica como los aisladores de base. Estos dispositivos absorben la energía sísmica y la transforman en otro tipo de energía mediante su deformación, esto impide que la energía sísmica sea transferida directamente a la edificación.

Justificación

Dados los acontecimientos sísmicos sucedidos en países como Chile, Haití y Japón, los profesionales de la construcción, que son los encargados del diseño de estructuras en todo el país, deben hacer énfasis en la planificación de la prevención de catástrofes debido a terremotos. La aplicación de aisladores elastoméricos en edificaciones es una herramienta que debe ser considerada al diseñar estructuras debido a sus excelentes resultados ante sismos intensos como el de Chile. En este país, las construcciones que contenían sistemas de aislamiento de base elastomérico, soportaron satisfactoriamente las fuerzas sísmicas del terremoto del 27 de febrero del 2010. Este ejemplo promueve el planteamiento de la aplicación de estos elementos aisladores a las construcciones de nuestro medio, teniendo en cuenta que el Ecuador se encuentra en una zona de peligro sísmico inminente, sobre todo en ciudades costeras.

Objetivo General.

Comparar el comportamiento dinámico de desplazamientos y aceleraciones de dos edificios, uno de período corto y otro de período largo con aisladores elastoméricos de base y sin aisladores de base.

Objetivos específicos.

- Escoger un aislador elastomérico existente en el mercado para las dos edificaciones.
- Modelar un edificio de período corto sin aisladores de base elastoméricos.
- Modelar un edificio de período largo sin aisladores de base elastoméricos.
- Modelar un edificio de período corto con aisladores elastoméricos de base elastoméricos.
- Modelar un edificio de período largo con aisladores elastoméricos de base elastoméricos.
- Comparar los resultados de los 4 modelos.
- Comprobar la eficiencia de aisladores en edificios de período corto.
- Comprobar la ineficiencia de aisladores en edificios de período largo.

TABLA DE CONTENIDO

1. FUNDAMENTOS DE DINÁMICA DE ESTRUCTURAS	21
1.1. Introducción	21
1.2. Conceptos Básicos.....	21
1.2.1. Grados de libertad	21
1.2.2. Rigidez	22
1.2.3. Amortiguamiento	22
1.2.4. Amortiguamiento viscoso	22
1.2.5. Ley de movimiento de Newton	23
1.2.6. Principio de D'Alembert	23
1.3. Ecuación de movimiento de un sistema de un grado de libertad	23
1.4. Resonancia estructural.....	24
1.5. Espectro elástico de diseño	25
1.5.1. Espectro elástico de diseño en aceleraciones NEC 11	25
1.6. Espectro de Fourier	27
2. AISLAMIENTO DE BASE	28
2.1. Principios De Aislamiento De Base	28
2.2. Tipos de asilamientos de base	30
2.2.1. Aisladores elastoméricos.....	30
2.2.2. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo	32
2.3. Disipación de energía por medio de amortiguamiento hysterético del núcleo de plomo	33
2.4. Cuándo usar aisladores de base	34
2.4.1. Peso de la estructura.....	35
2.4.2. Período de vibración de la estructura.	35
2.4.3. Condiciones de terreo causantes de ondas sísmicas con períodos largos	36
2.4.4. Condiciones de subsuelo	36
2.4.5. Cercanía con fallas geológicas	36

3. NORMAS APLICADAS AL AISLAMIENTO SÍSMICO Y DISEÑO SISMO RESISTENTE	38
3.1. Norma Ecuatoriana de la Construcción	38
3.2. NEHRP Recommended Provisions For Seismic Regulations For New Buildings And Other Structures, FEMA 450	39
3.2.1. Requerimientos generales de diseño para estructuras aisladas	39
3.2.1.1. Condiciones ambientales	39
3.2.1.2. Resistencia al viento	40
3.2.1.3. Resistencia al fuego.	40
3.2.1.4. Restricciones de desplazamiento	40
3.2.1.5. Estabilidad vertical	41
3.2.1.6. Volcamiento.	41
3.2.1.7. Inspección y reparación	41
3.2.1.8. Control de calidad.....	42
3.2.2. Requerimientos del sistema estructural	42
3.2.2.1. Distribución horizontal de la fuerza	42
3.2.2.2. Separación entre elementos estructurales	42
3.2.2.3. Estructuras no habitadas	42
3.2.3. Requerimientos para elementos estructurarles y no estructurales.....	43
3.2.3.1. Componentes por debajo de la interfaz de aislamiento	43
3.2.3.2. Componentes que cruzan la interfaz de aislamiento	43
3.2.3.3. Componentes sobre la interfaz de aislamiento	43
4. MODELO DE LAS EDIFICACIONES DE ESTUDIO.	45
4.1. Descripción de la estructura de período corto.	45
4.1.1. Material de la edificación de período corto.....	51
4.1.2. Secciones.....	51
4.2. Descripción de la estructura de período largo	54
4.3. Espaciamiento entre ejes.....	57
4.3.1. Material de la edificación de período corto.....	58
4.3.2. Secciones.....	58
5. ANÁLISIS DINÁMICO DE LAS EDIFICACIONES.....	61
5.1. Sismo De Diseño.....	61
5.2. Espectros de Fourier de las señales sísmicas.....	65
5.3. Períodos fundamentales de vibración del edificio de período corto y período largo.....	70

5.4. Selección del aislador para la edificación de período corto y período largo.	71
5.4.1. Variación del período fundamental de las Estructuras con sistema de aislamiento de base elastomérico.....	72
5.5. Análisis de aceleraciones de las estructuras	73
5.5.1. Análisis de aceleraciones en la estructura de período corto y período largo	73
5.5.1.1. Resultados de aceleraciones de la estructura de período corto.....	74
5.5.1.2. Aceleraciones de la estructura de período largo	81
5.6. Análisis de Desplazamientos	89
5.6.1. Análisis de desplazamientos de la estructura de período corto	89
5.6.1.1. Desplazamientos de la estructura de período corto aislada	89
5.6.1.2. Desplazamientos de la estructura no aislada de período corto	99
5.6.1.3. Desplazamientos de la estructura aislada del último piso y del plano de aislamiento del edificio de período corto.	108
5.6.1.4. Comparación de desplazamientos horizontales absolutos de la estructura aislada y no aislada de período corto	113
5.6.2. Análisis de desplazamientos de la estructura de período largo	119
5.6.2.1. Desplazamientos de la estructura no aislada de período largo	119
5.6.2.2. Desplazamientos de la estructura aislada de período largo	123
5.6.2.3. Comparación de desplazamientos del último piso y la base aislada del edificio de período largo	128
5.6.2.4. Comparación de desplazamientos absolutos del último piso de la estructura aislada y no aislada de período largo	132
5.6.2.5. Desplazamientos máximos de cada piso del edificio de período corto y período largo	137
6. CONCLUSIONES.....	139

TABLA DE FIGURAS

Figura1.1. Diagrama representativo de un sistema de masa resorte sin fricción.....	22
Figura1.2. Diagrama representativo de un sistema de masa, resorte y amortiguador sin fricción de un grado de libertad.....	24
Figura1.5.1 espectro sísmico elástico de aceleraciones nec 11	26
Figura1.5. Representación de una señal sinusoidal y su espectro de fourier	28
Figura2.1. Esquema de una estructura perfectamente rígida y perfectamente flexible. (kelly, 2001)	30
Figura2.2.2. Comparación de aisladores con capas de caucho de distinto espesor. (kelly, 2001).....	31
Figura2.2.2.1. Aislador de base elastomérico con núcleo de plomo. (kelly, 2001).....	33
Figura4.1.1. Esquema en 3d del edificio de período corto, modelo realizado en sap2000.	46
Figura4.1.2. Vista en planta del edificio plano xy. Modelo realizado en sap2000.....	47
Figura4.1.3 vista en corte vertical del edificio de período largo en el plano y, x=0m. Modelo realizado en sap2000	48
Figura4.1.4. Vista en corte vertical del edificio de período largo en el plano y, x=22.8m. Modelo realizado en sap2000	48
Figura4.1.5. Vista en corte vertical del edificio de período largo en el plano xz, y=0m. Modelo realizado en sap2000	49
Figura4.1.6. Vista en corte vertical del edificio de período largo en el plano xz, y=14.4m. Modelo realizado en sap2000	49
Figura4.3.1. Espaciamiento entre ejes de la estructura de período largo.	50
Figura4.1.1.1. Propiedades del material de hormigón utilizado para el modelo.	51
Figura4.1.2.1 columna 40 x 40 utilizada en los extremos de los muros de corte.....	52
Figura4.1.2.2 columna 80 x 70 utilizada en los extremos de los muros de corte.....	52

Figura4.1.2.3 columna circular diámetro 100 cm utilizada como columna interior del edificio	53
Figura4.1.2.4. Columna 100x100 utilizada como columna exterior del edificio	53
Figura4.1.2.4. Columna 100x100 utilizada como columna exterior del edificio	54
Figura4.2.1. Esquema en 3d del edificio de período largo, modelo realizado en sap2000.	55
Figura4.2.2. Vista en planta de la estructura de período largo. Modelo en sap2000.....	56
Figura4.2.2. Vista en corte de la estructura de período largo. Modelo en sap2000	56
Figura4.3.1. Espaciamiento entre ejes de la estructura de período largo.	57
Figura4.2.1.1. Propiedades del material de hormigón utilizado para el modelo.	58
Figura4.2.1.2.columna de 50x50 general utilizada para la edificación de período largo. ...	59
Figura4.2.1.2.viga de 40x20 general utilizada para la edificación de período largo.....	59
Figura5.1.1. Acelerograma del sismo de georgia, base de datos peer	62
Figura5.1.2. Acelerograma del sismo de imperial valley, base de datos peer.....	62
Figura5.1.3. Acelerograma del sismo de irpinia, base de datos peer	63
Figura5.1.4. Acelerograma del sismo de whittier narrows, base de datos peer.....	63
Figura5.1.5. Acelerograma del sismo de san fernando, base de datos peer	63
Figura5.1.6. Acelerograma del sismo de northridge, base de datos peer	64
Figura5.1.7. Acelerograma del sismo de parkfield, base de datos peer	64
Figura5.1.8. Acelerograma del sismo artificial base de datos peer	64
Figura5.1.9. Acelerograma del sismo northridge 1.5g, base de datos peer	65
Figura5.2.1. Espectro de fourier del sismo de georgia. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.	66

Figura5.2.2. Espectro de fourier del sismo de imperial. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.	66
Figura5.2.3. Espectro de fourier del sismo de irpinia. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.	67
Figura5.2.4. Espectro de fourier del sismo de whittier narrows. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.	67
Figura5.2.5. Espectro de fourier del sismo de san fernando. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.	68
Figura5.2.6. Espectro de fourier del sismo de northridge. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.	68
Figura5.2.7. Espectro de fourier del sismo de parkfield. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.	69
Figura5.2.8. Espectro de fourier del sismo artificial. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.	69
Figura5.2.9. Espectro de fourier del sismo de northridge 1.5g. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.	70
Tabla 5.3.1. Períodos fundamentales de vibración de las estructuras de período corto y largo.	71
Tabla 5.4.1.1 Tabla de variación de período de la estructura de período largo y corto una vez aplicado el sistema de aislamiento de base elastomérico.	72
Figura5.5.1.1.8. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período corto con base aislada y sin base aislada durante el sismo artificial.	78
Figura5.5.1.1.9. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período corto con base aislada y sin base aislada durante el sismo de northridge 1.5g	78
Tabla 5.5.1.1.1 Tabla de resumen de aceleraciones máximas de la estructura de período corto aislada y no aislada. Los valores de la aceleración están en función de g.	80
Figura5.5.1.1.10. Gráfico comparativo de las aceleraciones máximas de la estructura de período corto aislada y no aislada.	81
Tabla 5.5.2.1. Tabla de aceleraciones máximas de la estructura de período largo variaciones con respecto a la aceleración del suelo.	87

- Figura5.5.1.2.10 gráfico de barras de la aceleración máxima de la estructura de período largo de cada registro sísmico. Unidades de aceleración en términos de la gravedad [g]... 88
- Figura5.6.1.3.1. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento - sismo de georgia. 108
- Figura5.6.1.3.2. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – sismo de imperial 109
- Figura5.6.1.3.3. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – sismo de irpinia 109
- Figura5.6.1.3.4. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – sismo de whittier narrows 110
- Figura5.6.1.3.5. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – sismo de san fernando 110
- Figura5.6.1.3.6. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – sismo de northridge 111
- Figura5.6.1.3.7. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – sismo de parkfield 111
- Figura5.6.1.3.8. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – sismo artificial 112
- Figura5.6.1.3.9. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – sismo northridge 1.5g 112
- Figura5.6.1.4.1. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – sismo georgia..... 114
- Figura5.6.1.4.2. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – sismo imperial 114
- Figura5.6.1.4.3. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – sismo irpinia 115
- Figura5.6.1.4.4. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – sismo whittier narrows 115
- Figura5.6.1.4.5. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – sismo de san fernando 116

Figura5.6.1.4.6. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – sismo de northridge ...	116
Figura5.6.1.4.7. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – sismo de parkfield	117
Figura5.6.1.4.8.gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – sismo artificia	117
Figura5.6.1.4.9. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – sismo northridge 1.5g	118
Figura5.6.2.1.1. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo de georgia.....	119
Figura5.6.2.1.2. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo de imperial	119
Figura5.6.2.1.3. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo de irpinia	120
Figura5.6.2.1.4. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo de whittier narrows	120
Figura5.6.2.1.5. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo de san fernando	121
Figura5.6.2.1.6. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo de northridge	121
Figura5.6.2.1.7. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo de parkfield.	122
Figura5.6.2.1.8. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo artificial.	122
Figura5.6.2.1.9. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo northridge 1.5g	123
Figura5.6.2.2.1 gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de georgia.....	123
Figura5.6.2.2.2. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de imperial	124

Figura#. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de irpinia.....	124
Figura5.6.2.2.4. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de whittier narrows	125
Figura5.6.2.2.5. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de san fernando	125
Figura5.6.2.2.6. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de san northridge.....	126
Figura5.6.2.2.7 gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de san parkfield	126
Figura5.6.2.2.8 gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo artificial	127
Figura5.6.2.2.9. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de northridge 1.5g.	127
Figura5.6.2.3.1. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de georgia.....	128
Figura5.6.2.3.2. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de imperial.	128
Figura5.6.2.3.3. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de irpinia.	129
Figura5.6.2.3.4. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de whittier narrows.	129
Figura5.6.2.3.5. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de san fernando.	130
Figura5.6.2.3.6. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de northridge.	130
Figura5.6.2.3.7. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de parkfield.	131
Figura5.6.2.3.9. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo artificial.	131

Figura5.6.2.3.9. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo artificial.....	132
Figura5.6.2.4.1. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – sismo georgia.....	132
Figura5.6.2.4.2. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – sismo de imperial.....	133
Figura5.6.2.4.3. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – sismo de irpinia.	133
Figura5.6.2.4.4. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – sismo de whittier narrows.	134
Figura5.6.2.4.5. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – sismo de san fernando.	134
Figura5.6.2.4.6. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – sismo de northridge. ..	135
Figura5.6.2.4.7. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – sismo de parkfield.	135
Figura5.6.2.4.8. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – sismo artificial.	136
Figura5.6.2.4.9. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – sismo de northridge. ..	136
Tabla 6.1. Resumen de aceleraciones de la estructura de período corto.	141
Tabla 6.2 Comparación entre aceleración máxima del suelo y desplazamiento máximo de la edificación de período corto.	143
Tabla 6.3. Disminución de la deformación horizontal del edificio de período corto aislado.	144
Tabla 6.4 Rendimiento del sistema de aislamiento elastomérico en la estructura de período largo.	145
Tabla 6.5 Comparación de rendimientos en la variación de la deformación horizontal de la estructura debido al sistema de aislamiento de la estructura de período corto y largo.....	146

1. FUNDAMENTOS DE DINÁMICA DE ESTRUCTURAS

1.1. Introducción

La dinámica de estructuras tiene como finalidad analizar el comportamiento vibratorio de cuerpos flexibles sometidos a cargas que varían con el tiempo. Para determinar el comportamiento de una estructura ante cargas dinámicas, como son las fuerzas desarrolladas sobre la estructura durante la acción de un sismo, varios autores han desarrollado modelos simplificados de análisis estructural que brindan una aproximación numérica bastante aproximada a la realidad basándose en principios básicos de la física. La dinámica estructural se ha desarrollado significativamente a partir del uso del computador como herramienta de cálculo y programación. Los fundamentos de esta materia se remontan a más de dos siglos y medio atrás, sin embargo, el estudio detallado y su aplicación a la ingeniería se lo ha desarrollado extensamente en las últimas cuatro décadas (García, 1998).

1.2. Conceptos Básicos

En la presente sección de este trabajo se presentan conceptos y teoría básica necesaria para comprender los objetivos y la metodología del análisis que se efectuará más adelante en este documento.

1.2.1. Grados de libertad

Los grados de libertad de una estructura son el número de coordenadas independientes que sirven para representar un sistema en cuanto a posición en cualquier instante del tiempo, es decir, un grado de libertad es la capacidad que tiene un punto en trasladarse o rotar. Las estructuras continuas tienen infinito número de grados de libertad, por lo tanto, para simplificar los cálculos se reduce el número de grados de libertad según lo que se desea analizar, ya sea posición o giros. (Paz, 1992).

1.2.2. Rigidez

La rigidez es una constante que depende de las características geométricas y del material de los elementos estructurales, la cual, nos indica la acción necesaria para producir un desplazamiento o giro unitario dentro del campo elástico. Uno de los modelos básicos para representar la rigidez de un elemento es un resorte, en el cual, la fuerza que ejerce el resorte se calcula en función de la rigidez k y la deformación producida por esa fuerza y se expresa con la siguiente igualdad. (Paz, 1992)

$$F = kx \quad (1.1)$$

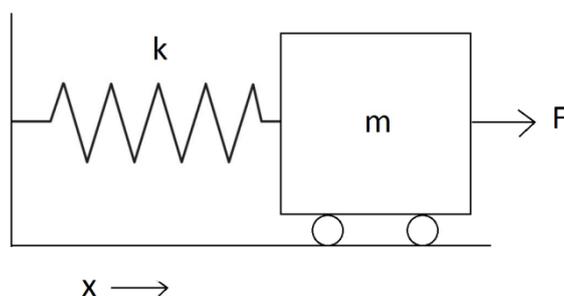


Figura 1.2.1 Diagrama representativo de un sistema de masa resorte sin fricción.

1.2.3. Amortiguamiento

El amortiguamiento es una fuerza que se opone al movimiento para que un cuerpo no vibre indefinidamente, es decir, es lo que reduce el movimiento progresivamente hasta un estado estático de equilibrio. En el proceso de amortiguamiento de un sistema que se encuentra en vibración, la energía disipada por el proceso de amortiguamiento comúnmente se transforma energía de movimiento a otro tipo de energía, como energía calórica. A la constante de amortiguamiento comúnmente se la conoce como c . (Paz, 1992).

1.2.4. Amortiguamiento viscoso

Las variables que definen el comportamiento de un sistema de amortiguación son varias dentro de una edificación (fuerzas de rozamiento de los distintos elementos

estructurales y no estructurales), por lo tanto, para fines de facilitar los cálculos se considera que las fuerzas de amortiguación son proporcionales a la magnitud de la velocidad y opuestas a la dirección del movimiento, a esta suposición se la denomina amortiguamiento viscoso. Sin embargo, las estructuras no tienen un amortiguamiento viscoso debido a la no homogeneidad de los elementos estructurales y no estructurales, pero asumir un amortiguamiento de este tipo en el análisis estructural brinda resultados muy aproximados a la realidad. (Paz, 1992)

1.2.5. Ley de movimiento de Newton

La segunda ley de Newton o ley de movimiento de Newton describe un sistema en movimiento de una masa m en cualquier instante de tiempo t a partir de condiciones iniciales conocidas en $t=0$. La igualdad matemática que relaciona el desplazamiento en cualquier instante del tiempo es la siguiente:

$$F = ma \quad (1.1)$$

Donde F es la sumatoria de las fuerzas que actúan sobre la partícula m y a es la aceleración de la partícula.

1.2.6. Principio de D'Alembert

El principio de D'Alembert nos dice que un sistema dinámico puede lograr un equilibrio si se considera una fuerza comúnmente denominada como fuerza inercial. (Paz, 1992)

1.3. Ecuación de movimiento de un sistema de un grado de libertad

Para poder analizar el comportamiento de una partícula en movimiento hay que partir de un modelo matemático que nos permita conocer el estado de esta partícula en

cuanto a desplazamiento, velocidad y aceleración en cualquier instante del tiempo. Del diagrama de cuerpo libre indicado más adelante, se puede llegar a la ecuación de movimiento, ya sea partiendo de la ley de Newton o del principio de D'Alembert. La ecuación de movimiento no es más que la sumatoria de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo en movimiento, estas fuerzas son la fuerza inercial $m\ddot{y}$, la fuerza de amortiguamiento $c\dot{y}$ y por último la fuerza de resorte ky . La Ecuación de Movimiento es una ecuación diferencial con solución de tipo e^x . (Paz, 1992)

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F(y) \quad (1.2)$$

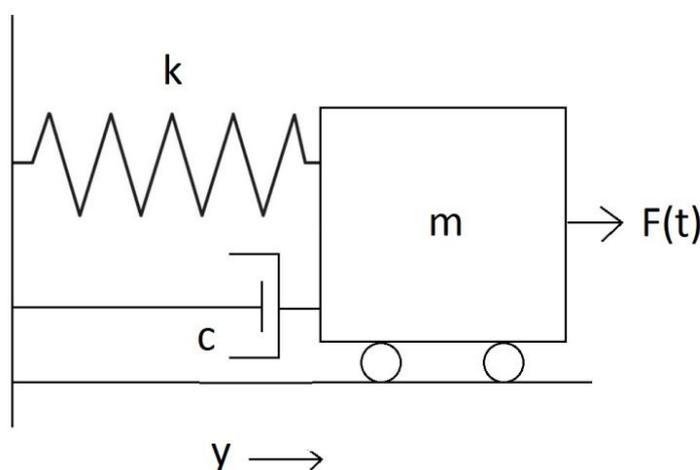


Figura 1.3.1 Diagrama representativo de un sistema de masa, resorte y amortiguador sin fricción de un grado de libertad.

1.4. Resonancia estructural

La resonancia estructural es un fenómeno que ocurre cuando la frecuencia natural de la estructura se asemeja al valor de la frecuencia de la fuerza dinámica que actúa sobre ella. El efecto de la resonancia en una estructura sometida a una carga que varía con el tiempo es fundamentalmente la amplificación de la onda de esta fuerza actuante. En el caso de un evento sísmico, el contenido frecuencial de la señal (acelerograma) es la base para determinar si la edificación puede verse afectada por este fenómeno, para saber el contenido

frecuencial de la señal se puede utilizar la transformada de Fourier la cual se describe más adelante. (Yépez, PdD, 2013)

1.5. Espectro elástico de diseño

El espectro elástico de diseño es una herramienta que utilizan los ingenieros diseñadores para calcular el cortante basal o fuerzas horizontales de diseño en una estructura. Este espectro es una fracción de la aceleración de la gravedad y generalmente se lo expresa mediante un gráfico de aceleración vs período. En cada país existe una norma que establece la manera de calcular este espectro de diseño, en el Ecuador, la nueva norma NEC 11 nos proporciona un método y varios parámetros para elaborar los espectros de diseño.

1.5.1. Espectro elástico de diseño en aceleraciones NEC 11

El capítulo de diseño sismo resistente de la Norma Ecuatoriana de Construcción NEC 11 pone al alcance de los ingenieros diseñadores de estructuras un espectro elástico de diseño, el cual depende básicamente del lugar de emplazamiento de la edificación y del tipo de estructura que se pretende diseñar. La presente sección de este documento resume la sección 2.5.5 de la Norma NEC 11, en la cual se detalla el método para realizar el espectro de diseño de aceleraciones NEC 11. En la ecuación (1.4.1) y (1.4.2) tenemos las expresiones de S_a , término utilizado para denotar el valor fraccional de la aceleración de la gravedad del espectro.

$$S_a = \eta Z F_a \text{ para } 0 < T \leq T_c \quad (1.4.1)$$

$$S_a = \eta Z F_a \left(\frac{T_c}{T} \right)^r \text{ para } T > T_c \quad (1.4.2)$$

En donde, la variable r depende el tipo de suelo y su valor es $r=1$ para suelos tipo A, B, C y $r=1.5$ para tipo de suelo D y E. Por otro lado, partiendo de los análisis de los espectros

de peligro uniforme en roca para el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años (Período de retorno 475 años) se tiene el mapa de peligro sísmico del Ecuador, en el cual, se marcan las diferentes zonas con sus aceleraciones espectrales máximas, este valor se lo representa con la letra Z, el mapa se encuentra en el anexo C. Por último, dependiendo de la región del país tenemos el factor de amplificación espectral η el cual equivale a: $\eta = 1.8$ (Provincias de la Costa, excepto Esmeraldas), $\eta = 2.48$ (Provincias de la Sierra, Esmeraldas y Galápagos) y $\eta = 2.6$ (Provincias del Oriente). El límite T_c se obtiene de la siguiente expresión:

$$T_c = 0.55 F_s \frac{F_d}{F_a} \quad (1.4.3)$$

Con fines de análisis dinámico y únicamente para evaluar la respuesta de períodos que no sean iguales al fundamental se utiliza la siguiente expresión para calcular el valor de S_a .

$$S_a = Z F_a \left(1 + (\eta - 1) \frac{T}{T_0} \right)^r \quad \text{para } T > T_0 \quad (1.4.4)$$

$$T_0 = 0.10 F_s \frac{F_d}{F_a} \quad (1.4.5)$$

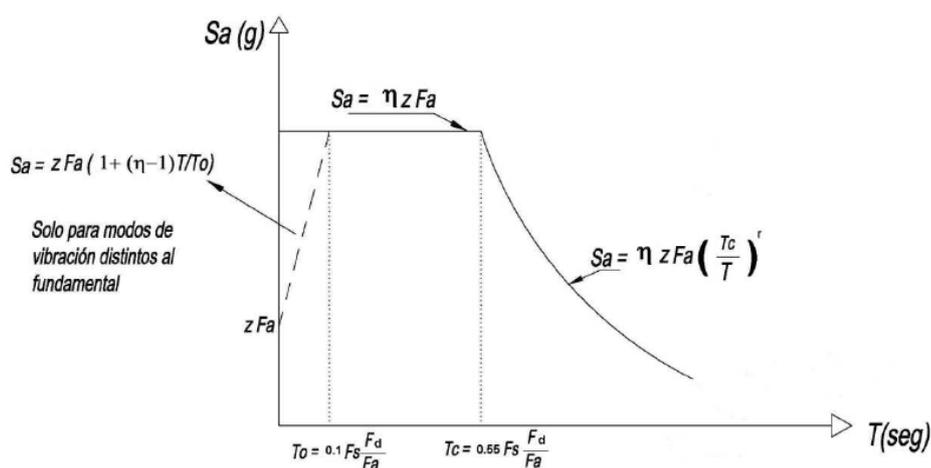


Figura 1.5.1 Espectro sísmico elástico de aceleraciones NEC 11

1.6. Espectro de Fourier

El contenido frecuencial de los movimientos sísmicos es de vital importancia para el diseño sismo resistente, sobretodo en edificaciones de importancia social como son aeropuertos, hospitales, refugios entre otras. El espectro de Fourier nos permite estudiar a las señales sísmicas en su dominio de la frecuencia por medio de un procedimiento basado en series de Fourier. La interpretación de las amplitudes no tiene gran relevancia desde el punto de vista de diseño sismo resistente, sin embargo, es una gran herramienta para el estudio en el campo de las frecuencias de eventos sísmicos históricos, ya que se puede definir períodos de vibración en los diseños de edificaciones. Para determinar la transformada de Fourier de un acelerograma debe emplearse la siguiente expresión conocida como transformada discreta de Fourier (García, 1998).

$$f\omega = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_0(t_j) e^{-i2\pi\left(\frac{nj}{N}\right)} \quad n = 1, 2, \dots, (N-1) \quad (1.5.1)$$

Donde N es el número de puntos del acelerograma, lo que genera N-1 amplitudes complejas y la frecuencia asociada, en rad/s, con cada una de las amplitudes que se calculan corresponde a:

$$\omega = \frac{\frac{j}{2} - 1}{2\pi N \Delta t} \quad (1.5.2)$$

Siendo Δt el intervalo de tiempo de la muestra de datos del acelerograma. (García, 1998). Por ejemplo, a continuación se obtendrá el espectro de Fourier de una suma de señales sinusoidales con frecuencias de 10 y 20 Hertz con amplitudes de 1 y 2 respectivamente, teniendo la expresión: $y = \sin(5 \cdot 2\pi \cdot x) + 2 \cdot \sin(10 \cdot 2\pi \cdot x)$ la cual, a continuación se muestra tanto el gráfico de la función y su espectro de Fourier visualizando claramente en el segundo dos picos correspondientes a las frecuencias de la señal.

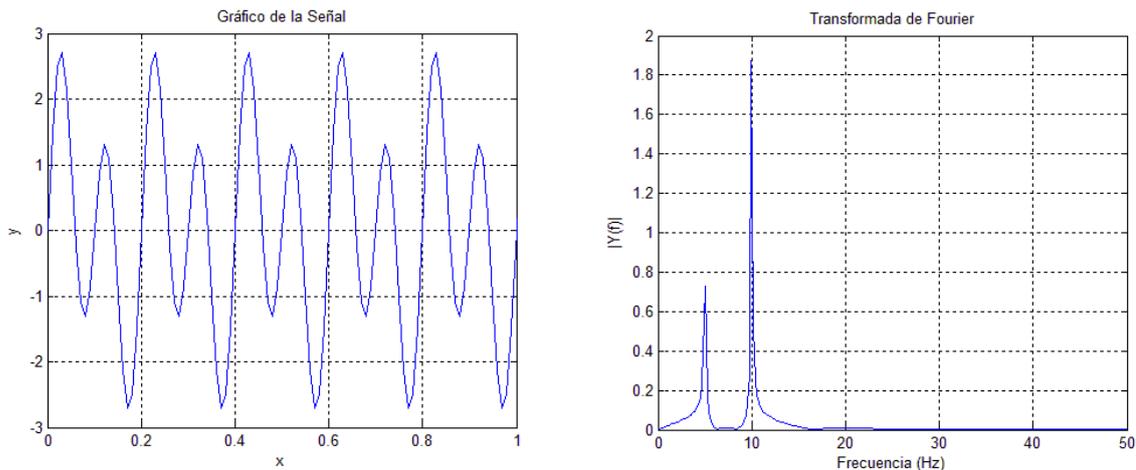


Figura 1.5. Representación de una señal sinusoidal y su espectro de Fourier

2. Aislamiento de Base

2.1. Principios De Aislamiento De Base

Los movimientos de la tierra provocados por los sismos son transmitidos a las estructuras directamente durante el fenómeno sísmico. El principal objetivo de los sistemas de aislamiento de base en edificaciones es separar a la estructura de los movimientos del suelo generados por ondas sísmicas. Los aisladores de base buscan como resultado la disminución de las deformaciones en los distintos elementos estructurales existentes, por consiguiente, el resultado es un menor daño global de la edificación.

Al momento que se produce un sismo los movimientos tanto del suelo como de la estructura tienen una velocidad, un desplazamiento y una aceleración, por lo tanto, un edificio sin un sistema de aislamiento de base produce que, la aceleración del suelo sea transmitida directamente a la estructura con la misma magnitud, velocidad y desplazamiento. Un edificio con un sistema de aislamiento de base experimenta una disminución en la aceleración adoptada debido al sismo, con respecto a la aceleración del suelo. En un sistema perfecto de aislamiento de base, la aceleración de la estructura sería

cero durante la acción del sismo, este estado perfecto no es posible en la práctica, ya que no existe un método de aislamiento total entre el suelo y la edificación. Lo que se trata de lograr con los sistemas de aislamiento de base es obtener una estructura con comportamiento flexible, puesto que, en un estado perfecto de flexibilidad el período de vibración de la edificación será infinito y la transmisión de movimiento entre el suelo y la estructura será nulo, es decir, el suelo se moverá y la estructura no lo hará, la Figura 2.1 ilustra este efecto. (Kelly, 2001).

Una de las propiedades utilizadas para el diseño sísmo resistente es el período de vibración de la estructura, por lo tanto, una variación del período puede ser beneficiosa para el dimensionamiento de los elementos. Este período depende de las características geométricas y físicas de los elementos estructurales. Un incremento en la rigidez disminuirá el período, por el contrario, una disminución en la rigidez provocará que el período de vibración de la estructura aumente, sin embargo, lo segundo trae consigo deformaciones grandes. El objetivo de aumentar el período de vibración de una estructura es obtener un cortante basal menor, ya que, según los espectros de diseño del NEC-11, a períodos grandes, la aceleración de diseño es menor, por consiguiente, el cortante basal disminuye.

Los sistemas de aislamiento de base buscan incrementar el período de vibración del edificio sin modificar la rigidez de los elementos estructurales, lo que representa una gran ventaja ya que nos permite trabajar con períodos altos en estructuras que comúnmente tienen períodos bajos, por lo tanto, esto produce que la edificación se comporte flexiblemente ante la acción de un sismo.

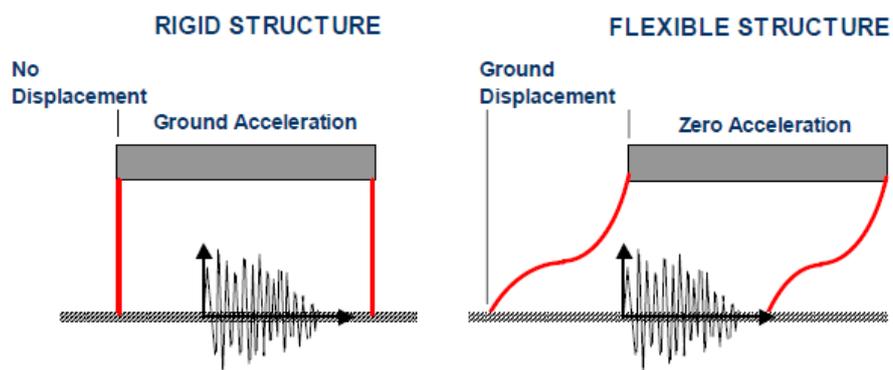


Figura 2.1. Esquema de una estructura perfectamente rígida y perfectamente flexible. (Kelly, 2001)

2.2. Tipos de aislamientos de base

A través de la historia del aislamiento sísmico, varios tipos de dispositivos aisladores se han fabricado, los cuales tienen características y comportamientos diferentes, sin embargo, el propósito de todos es disminuir el daño estructural ante eventos sísmicos. Existen dos sistemas de aislamiento de base que han marcado trascendencia en el ámbito constructivo debido a sus resultados satisfactorios en cuanto a disminución de daños, estos dos sistemas son: Aisladores elastoméricos y aisladores de péndulo friccional, estos dos sistemas de aislamiento tienen como fin mutuo separar a la estructura de los movimientos generados por un sismo y se los ubica en la parte inferior del edificio dentro de un plano de aislamiento, por lo general, en el nivel cero de la edificación.

2.2.1. Aisladores elastoméricos

Los aisladores elastoméricos son mecanismos formados por capas alternadas de caucho y acero que se unen entre sí por medio de un proceso de vulcanización para formar un solo dispositivo aislador como se muestra en la Figura 2.2.1. Las placas de acero trabajan en el aislador como elementos que aumentan la resistencia ante cargas verticales, ya que responden con deflexiones verticales pequeñas que varían de 1 a 3 milímetros bajo

las cargas de gravedad totales de la edificación. Cabe recalcar que el uso de capas de acero vulcanizadas no restringen las deformaciones en dirección horizontal del aislador, ya que estas deformaciones son realizadas por las capas de caucho, por esta razón, la unión de estos dos materiales contribuyen con las propiedades necesarias para un aislador de base. (Kelly, 2001). Las placas de acero también cumplen la función de reducir la expansión lateral del caucho ante cargas axiales, entre mayor sea el número de capas menor es la deformación lateral del material elastómero, este aumento de capas si bien reduce las deformaciones tipo aplastamiento del caucho también aumenta la rigidez horizontal del aislador como se ilustra en la Figura2.2.2 (Avilés, 2001).

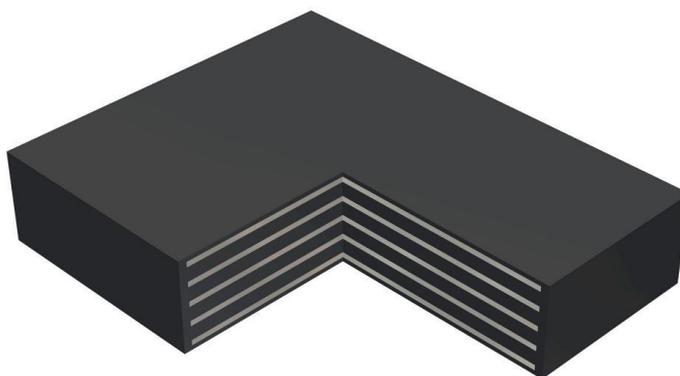


Figura2.2.1. Aislador elastomérico convencional

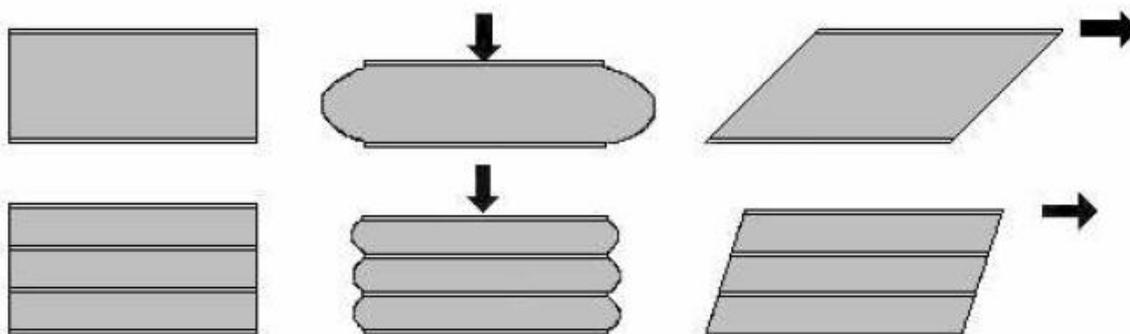


Figura2.2.2. Comparación de aisladores con capas de caucho de distinto espesor. (Kelly, 2001)

Los proveedores de este tipo de aisladores han desarrollado varios modelos que difieren en sus propiedades, por ejemplo, existen aisladores elastoméricos de alto y bajo amortiguamiento, aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, aisladores elastoméricos con restricciones de acero, etc.

2.2.2. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo

Los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo, al igual que los convencionales, están formados de material elastómero en capas separadas por placas de acero vulcanizadas al caucho, lo que distinguen a este tipo de aisladores es que, en su centro, existe un núcleo de plomo, el cual, atraviesa transversalmente todas las capas. En la Figura 2.2.2.1 se puede visualizar la disposición de las distintas partes de este tipo de aislador. El núcleo de plomo existente en este tipo de aisladores aumenta la rigidez vertical y horizontal, lo que produce una mayor resistencia al aislador ante cargas de servicio bajas, verticales y horizontales. En un edificio es importante que el sistema de aislamiento de base tenga rigidez suficiente para evitar deformaciones ante cargas pequeñas, es decir, se pretende que las deformaciones sean imperceptibles para los usuarios de la edificación ante pequeñas cargas de servicio como son las cargas producidas por el viento, las cargas vivas o pequeñas fuerzas horizontales producidas por sismos de magnitud baja (Kelly, 2001). Por esta razón, el uso de un núcleo de metal blando es importante para un sistema de aislamiento basal, ya que se aprovecha el comportamiento de los metales blandos como el plomo y su histéresis que, junto con la histéresis del material elastomérico incrementan la capacidad del aislador para disipar energía.

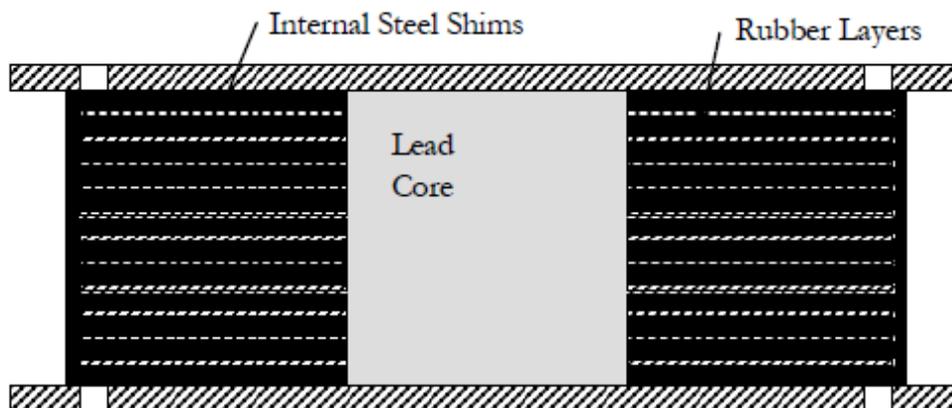


Figura 2.2.2.1. Aislador de base elastomérico con núcleo de plomo. (Kelly, 2001)

2.3. Disipación de energía por medio de amortiguamiento histerético del núcleo de plomo

La disipación de energía durante un sismo es una de las características más importantes de los sistemas de aislamiento de base, debido a que, durante el movimiento del suelo, la energía generada por el fenómeno sísmico es disipada por el edificio por medio de deformaciones y amortiguamiento viscoso, transformando la energía de entrada en energía cinética y energía calórica. Este tipo de disipación de energía generada por los elementos estructurales genera daños globales a la edificación, los cuales, pueden o no ser reversibles. Por esta razón, los sistemas de aislamiento de base buscan concentrar toda la energía de entrada en los aisladores, con el fin de que la transmisión de energía hacia la edificación sea mínima, por lo que se ha visto necesario añadir a los aisladores elastoméricos un núcleo de metal, en este caso, un núcleo de plomo (Aguar, Almazán, Dechent, & Suárez, 2008).

La unión física de un elemento flexible como es el caucho y un metal blando como el plomo forman un elemento flexible y apto para disipar energía, ya que, el plomo se deforma plásticamente en corte por las placas de acero durante la acción de las fuerzas

horizontales haciendo que se comporte como un amortiguador de histéresis interno ya que el proceso de plastificación y recristalización del plomo es rápido. En la figura 2.3.1 se puede observar las curvas de histéresis tanto del plomo como del material elastomérico y el gráfico representativo de la unión de estos dos materiales (Avilés, 2001). Se tiene que tener en cuenta que el área que encierra el gráfico de histéresis es la energía que disipa el material, por lo tanto, se puede verificar un incremento sustancial en la capacidad del aislador en disipar energía (Paz, 1992).

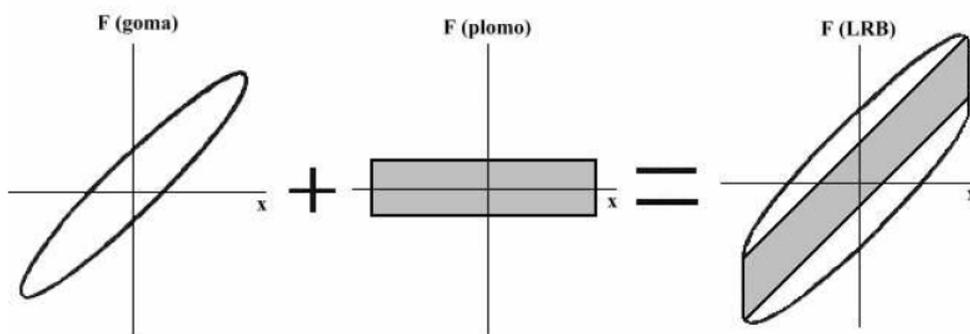


Figura 2.3.1. Curvas de histéresis, fuerza vs desplazamiento de la goma, el plomo y el aislador con núcleo de plomo. (Kelly, 2001)

2.4. Cuándo usar aisladores de base

Al momento de diseñar la estructura de un edificio se busca optimizar las secciones y cumplir con las demandas de carga existentes, lo que hace al diseño más económico y eficiente. Para diseñar un sistema de aislamiento de base se procede de igual manera, debido a que este tipo de sistema sismoresistente de aislamiento se utiliza cuando se comprueba que su implementación es el método económicamente más viable comparado con algún otro sistema para generar una estructura sismoresistente. Existen varios puntos de evaluación para saber si un sistema de aislamiento de base es adecuado para la edificación. (Kelly, 2001)

2.4.1. Peso de la estructura

La mayoría de sistemas de aislamiento de base funcionan de mejor manera con masas grandes. Para tener un sistema eficiente de aislamiento sísmico, se debe lograr un período largo de respuesta. Dado que el período depende de la masa y la rigidez de la estructura, como se puede verificar en la siguiente expresión, donde el período es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la masa, M , e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la rigidez, k . (Kelly, 2001)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k}} \quad (2.4.1.1)$$

De otra manera, para lograr un período dado de aislamiento, se debe tener una masa baja asociada con una rigidez baja también, sin embargo, los dispositivos de aislamiento basal no tienen un rango infinito de rigidez, ya que esta depende de las características del aislador. Por ejemplo, en los aisladores elastoméricos, el dispositivo necesita tener un diámetro mínimo para asegurar que permanecerá estable ante los desplazamientos sísmicos, lo cual nos brinda una rigidez mínima de diseño del aislador. (Kelly, 2001)

2.4.2. Período de vibración de la estructura.

La mayoría de estructuras en las que se puede aplicar un sistema de aislamiento de base son aquellas con períodos por debajo de 1 segundo ya que son estructuras que se diseñan con valores picos de los espectros de diseño de las normas sismo resistentes de diseño estructural como la Norma Ecuatoriana de Construcción NEC-11. Los sistemas de aislamiento de base no generan períodos infinitos, es decir, lo que correspondería a un aislamiento total, sin embargo, estos dispositivos aisladores producen un cambio de los períodos de vibración de la estructura en períodos que oscilan entre 1.5 a 3.5 segundos

dependiendo del diseño del aislador. Si la estructura se encuentra en este rango de períodos altos, no se obtiene mayor beneficio con la implementación de un sistema de aislamiento de base en cuanto a la disminución de deformaciones, sin embargo, en algunos casos amerita el uso por disipación de energía en la base de la edificación, estos casos pueden ser comúnmente vistos en puentes. (Kelly, 2001)

2.4.3. Condiciones de terreo causantes de ondas sísmicas con períodos largos

Algunos sitios están ubicados sobre terrenos blandos que generan una amplificación del período de las ondas sísmicas a lo largo de la trayectoria del epicentro al sitio en cuestión. Este fenómeno ocurre sobre suelos aluviales, los cuales, al generar ondas sísmicas con períodos largos generan resonancia con el período aislado de la estructura. Estos casos se han comprobado en la Ciudad de México y en Budapest. (Kelly, 2001)

2.4.4. Condiciones de subsuelo

El aislamiento de base funciona de mejor manera sobre roca o suelos rígidos. Los suelos blandos producen un efecto sobre la base que se asimila a lo mencionado en la sección anterior, incrementando el período de la onda sísmica en comparación con suelos duros. Esto sucede debido a que el alto contenido frecuencial de las ondas sísmicas es disipado o filtrado por suelos blandos dando como resultado períodos largos de vibración del suelo, el ejemplo más extremo es el terremoto de México en 1985, por esta razón no se debe considerar sistemas de aislamiento de Base en la ciudad de México (Naeim, 1989).

2.4.5. Cercanía con fallas geológicas

Una de los aspectos más controversiales para los sistemas de aislamiento de base es la manera en que operan ante terremotos que ocurren muy cerca de la estructura (0-5Km).

Cerca de las fallas existe un fenómeno llamado *fling*, el cual se caracteriza por generar ondas sísmicas de períodos largos y pulsos altos en la aceleración del suelo. Los sistemas de aislamiento son usados en estructuras cercanas a las fallas, sin embargo, puede existir un incremento en el costo del sistema y un diseño más complejo. Por esta razón, se debe verificar detalladamente si es factible utilizar este tipo de sistemas de disipación sísmica en estructuras cercanas a una falla. En general, toda estructura cercana a una falla debe ser diseñada considerando el efecto *fling*. (Kelly, 2001).

3. Normas aplicadas al aislamiento sísmico y diseño sismo resistente

Gracias a los resultados satisfactorios de las edificaciones que han utilizado sistemas de aislamiento de base en cuanto a daños y pérdidas materiales, los organismos internacionales de normas han dado importancia a este tipo de dispositivos disipadores de energía sísmica. Como resultado de este interés, organismos como FEMA (Federal Emergency Management Agency) han generado normas y directrices para estandarizar y garantizar el uso eficiente de estos sistemas de aislamiento de base en edificaciones. En el presente capítulo se revisarán las normas existentes en la norma NEC 11, la cual re direcciona al diseñador hacia la norma FEMA para el uso de sistemas de aislamiento sísmico.

3.1. Norma Ecuatoriana de la Construcción

La Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC 11, establece en el capítulo 2, Peligro Sísmico y 2requisitos de diseño sismo resistente, en la sección 2.10.2 Requerimientos de diseño de sistemas de aislamiento sísmico, lo siguiente:

“El diseño sísmico de edificios con sistemas de aislamiento sísmico utilizará como requerimientos mínimos a las especificaciones del Capítulo 13 del BSSC (2004) "NEHRP Recommended Provisions and Commentary for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures" (FEMA 450). Sin importar el uso u ocupación del edificio, el parámetro SD1 corresponde a la aceleración espectral para $T = 1s$, para un período de retorno de 475 años. SM1 corresponde a la aceleración espectral con para $T = 1s$, para un período de retorno de 2500 años, tomando en cuenta el efecto del suelo de cimentación.”

Cabe recalcar que toda norma propone un requerimiento mínimo de diseño, lo que se ve reflejado en la sección de la norma que se ha citado anteriormente.

3.2. NEHRP Recommended Provisions For Seismic Regulations For New Buildings And Other Structures, FEMA 450

La norma FEMA 450 fue elaborada por el consejo BSSC (Building Seismic Safety Council) el cual se estableció en 1979 con el fin de crear un nuevo instrumento de diseño sísmo resistente, documento en el que se tratan temas técnicos, sociales y económicos implicados en la mitigación de riesgos producidos por los sismos. A continuación se revisarán los factores de diseño que la norma FEMA 450 en su capítulo 13 recomienda para estructuras aisladas, como recomienda la norma NEC 11.

3.2.1. Requerimientos generales de diseño para estructuras aisladas

Los requerimientos generales que propone FEMA 450 son parámetros de un diseño sísmo resistente, los cuales, se asemejan claramente a los planteados en el NEC 11, entre los cuales tenemos: Factor de importancia de ocupación, configuración de elementos estructurales, características de movimiento del suelo, modelamiento estático y modelamiento dinámico; además, se detallan parámetros propios de un sistema aislado como la resistencia al viento, resistencia al fuego, las fuerzas laterales de restauración, restricciones de desplazamiento horizontal, estabilidad vertical, volcamiento, entre otras. A continuación se detallarán los parámetros de diseño que no constan en el NEC 11, es decir, aquellos que tienen relación únicamente con el sistema de aislamiento de base.

3.2.1.1. Condiciones ambientales

Un sistema de aislamiento se encuentra por lo general localizado en contacto con la intemperie, por lo tanto es necesario considerar los factores ambientales en los cuales va a trabajar el sistema de aislamiento, por ejemplo,

efectos de envejecimiento, fluencia, fatiga, temperatura operacional, humedad y contacto con sustancias dañinas.

3.2.1.2. Resistencia al viento

Una estructura con un sistema de aislamiento de base debe resistir las cargas provocadas por el viento, además, el diseño de la estructura tiene que considerar los desplazamientos generados por estas cargas y limitarlos para brindar confort a los usuarios.

3.2.1.3. Resistencia al fuego.

La resistencia al fuego de los sistemas de aislamiento sísmico debe ser consistente con los requerimientos de columnas, muros, u otros elementos estructurales o no estructurales que operen en la misma área del aislador.

3.2.1.4. Restricciones de desplazamiento

El sistema de aislamiento sísmico se puede restringir a un desplazamiento horizontal, el cual debe ser considerando con el máximo sismo de diseño, es decir, si se espera un evento sísmico de gran magnitud se puede limitar los desplazamientos horizontales del aislado haciéndolo más rígido a deformaciones horizontales. Esta restricción de desplazamiento horizontal se puede justificar de acuerdo a los siguientes criterios.

1. Cuando se ha considerado en el análisis estructural tanto del sistema de aislamiento como de la estructura que se encuentra por encima del plano de aislamiento el máximo sismo de diseño en un análisis no lineal.
2. Cuando la resistencia última del sistema de aislamiento y de la estructura inferior al plano de aislación pueda fluir o exceder la demanda de desplazamiento del máximo sismo de diseño.

3. Cuando la estructura sobre el plano de aislamiento es adecuada para resistir en cuanto a ductilidad y estabilidad las demandas del máximo sismo de diseño considerado y;
4. La restricción de desplazamiento no debe ser tomada en cuenta cuando esta es inferior a 75% del desplazamiento total de diseño del aislado, debido a que la respuesta del sistema de aislamiento no tendrá un rendimiento eficiente.

3.2.1.5. Estabilidad vertical

El sistema de aislamiento sísmico debe ser diseñado tomando en consideración la mayor carga vertical posible, es decir, $1.2D + 1L + E^1$, el valor del sismo de diseño debe ser el mayor considerado para el cálculo.

3.2.1.6. Volcamiento.

El factor de seguridad contra el volcamiento global de la estructura en la interfaz de aislamiento debe ser considerado con las cargas utilizadas para la estabilidad vertical de la estructura.

3.2.1.7. Inspección y reparación

El acceso a la inspección y reparación de los sistemas de aislamiento de base es fundamental para la correcta operación y mantenimiento de los mismos, por lo que un diseño de aislamiento debe cumplir las siguientes especificaciones:

1. Un diseñador profesional debe completar una serie de inspecciones u observaciones a las separaciones de los aisladores y los componentes

¹ Se recomienda usar las combinaciones establecidas en la Norma Ecuatoriana de Construcción NEC 2011 y tomar la mayor combinación.

estructurales o no estructurales que los rodean o cruzan la interfaz de aislación.

2. Se debe establecer un profesional en el área de aislamiento sísmico que monitoree frecuentemente la construcción y el programa de mantenimiento de cada sistema.
3. Para remodelaciones o reparaciones en la interfaz de aislamiento se debe consultar al profesional designado para el realizar cualquier cambio estructural o no estructural.

3.2.1.8. Control de calidad

El profesional encargado del monitoreo y mantenimiento de los sistemas de aislamiento sísmico deberá establecer un programa de pruebas de control de calidad de las unidades de aislación.

3.2.2. Requerimientos del sistema estructural

3.2.2.1. Distribución horizontal de la fuerza

Un diafragma horizontal u otro sistema estructural de elementos deberán proveer continuidad sobre la interfaz de aislamiento y deberá tener la adecuada fuerza y ductilidad para transmitir fuerzas dinámicas y estáticas de una parte de la estructura a otra.

3.2.2.2. Separación entre elementos estructurales

Las separaciones mínimas entre la estructura aislada y los muros de contención que rodea a la estructura, en el caso de existir, no puede ser menor al máximo desplazamiento de diseño.

3.2.2.3. Estructuras no habitadas

Las estructuras no habitadas serán diseñadas y construidas de acuerdo a los requerimientos del capítulo 14, *Nonbuilding structures design requirements*, usando los desplazamientos de diseño y las fuerzas del capítulo 13 de FEMA.

3.2.3. Requerimientos para elementos estructurales y no estructurales

Las partes o fragmentos de estructuras aisladas, los componentes no estructurales que son permanentes y las juntas de equipos soportados permanentemente a la estructura deberán ser diseñados para resistir las fuerzas sísmicas y los desplazamientos establecidos en el capítulo 13 de FEMA juntos con los requerimientos del capítulo 6, *Architectural, mechanical, and electrical component design requirements*.

3.2.3.1. Componentes por debajo de la interfaz de aislamiento

Elementos de estructurales y no estructurales que se encuentran por debajo del sistema de aislamiento deberán ser diseñados según las especificaciones indicadas en cuanto a fuerzas aplicadas y desplazamientos permitidos según el capítulo 4, *Structural design criteria*, y capítulo 6, *Architectural, mechanical, and electrical component design requirements*, del manual FEMA según el caso más apropiado.

3.2.3.2. Componentes que cruzan la interfaz de aislamiento

Los elementos estructurales o no estructurales de un sistema aislado que cruzan la interfaz de aislamiento deberán ser diseñados para resistir el máximo desplazamiento total del sistema.

3.2.3.3. Componentes sobre la interfaz de aislamiento

Los elementos estructurales y no estructurales de un sistema aislado, o porciones de ellos, que se encuentran sobre la interfaz de aislamiento deberán

ser diseñados para resistir la fuerza lateral de diseño consistente con la máxima respuesta dinámica del elemento o componente en consideración.

4. Modelo de las edificaciones de estudio.

En el presente capítulo se presenta el análisis de las propiedades físicas de las edificaciones escogidas para ser modeladas con sistemas de aislamiento de base y sin ellos. Para verificar la viabilidad y el alcance de la implementación de este tipo de dispositivos aisladores, dos edificios que difieren en sus períodos fundamentales han sido planteados para el estudio. Uno de estos edificios tiene un período corto, es decir inferior a 1s, por otro lado, la segunda edificación tiene un período largo, es decir, mayor a los 2s. El objetivo de escoger estos dos tipos de estructuras es básicamente comparar el comportamiento de los aisladores, puesto que, como se mencionado en capítulos anteriores, el aumento del período de la estructura es una de las características más importantes de estos sistemas de aislamiento de base. A continuación se detallan cada una de las estructuras.

4.1. Descripción de la estructura de período corto.

Para cumplir con uno de los objetivos de este estudio se ha escogido la estructura de un hospital, el cual, su modelo digital se indica a continuación en la Figura4.1.1, el mismo que corresponde a la estructura de período corto que se ha escogido para ser analizada con aisladores de base y sin ellos. En este modelo se puede verificar que la disposición de los elementos estructurales es asimétrica, tanto en su corte vertical como en planta. La configuración estructural de la edificación tiene varios muros estructurales para rigidizar a la estructura y darle una mayor resistencia ante cargas horizontales y verticales y por consiguiente disminuir las deformaciones en los elementos estructurales.

De la vista en planta, Figura4.1.2, se puede visualizar que las vigas no forman ángulos rectos con los ejes de la edificación y que existen vacíos al interior como son el ducto del ascensor, ventilación, jardín central y ductos de cableado, los cuales han sido emplazados asimétricamente en toda la sección. Este tipo de diseño arquitectónico da como resultado

una estructura irregular de tipo 4 (según la clasificación NEC 11 de la tabla 2.12) debido a que los ejes estructurales no son paralelos o simétricos con respecto a los ejes ortogonales principales de la estructura (Miduvi, Cámara de la Construcción de Quito, 2011).

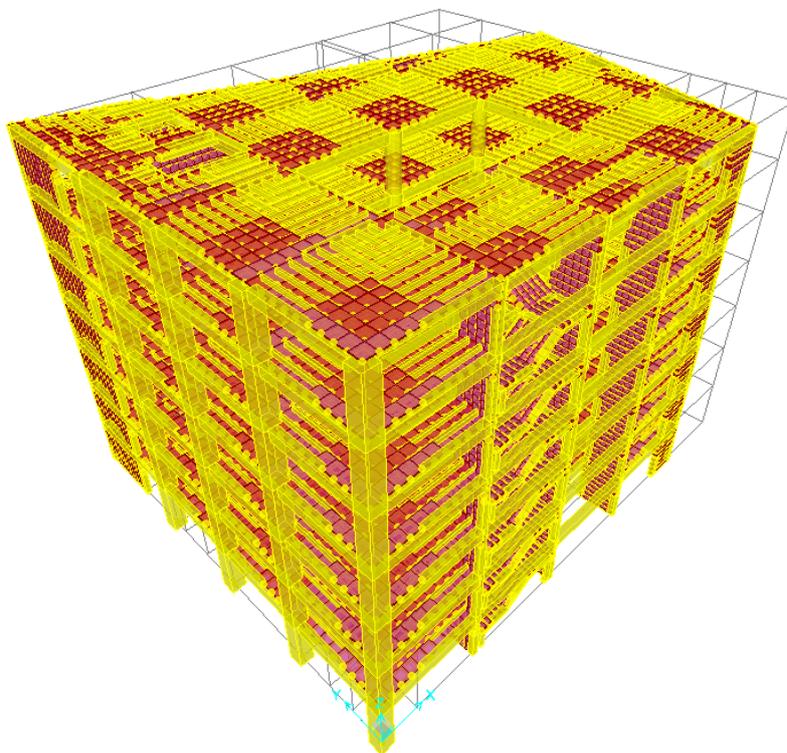


Figura 4.1.1. Esquema en 3D del edificio de período corto, modelo realizado en SAP2000.

Este edificio se escogió debido a sus características de irregularidad y por el servicio que ofrece, ya que es una de las alternativas estructurales de un hospital. Este tipo de edificación se considera como una edificación especial debido a que su operatividad no puede ser interrumpida, por esta razón, a este tipo de edificaciones se las verifica para que su desempeño sísmico funcione adecuadamente en el rango inelástico, además, que no colapse ante un terremoto de 2500 años de período de retorno (Miduvi, Cámara de la Construcción de Quito, 2011). En el presente estudio este registro corresponde al sismo de Northridge 1.5g debido a su gran aceleración registrada.

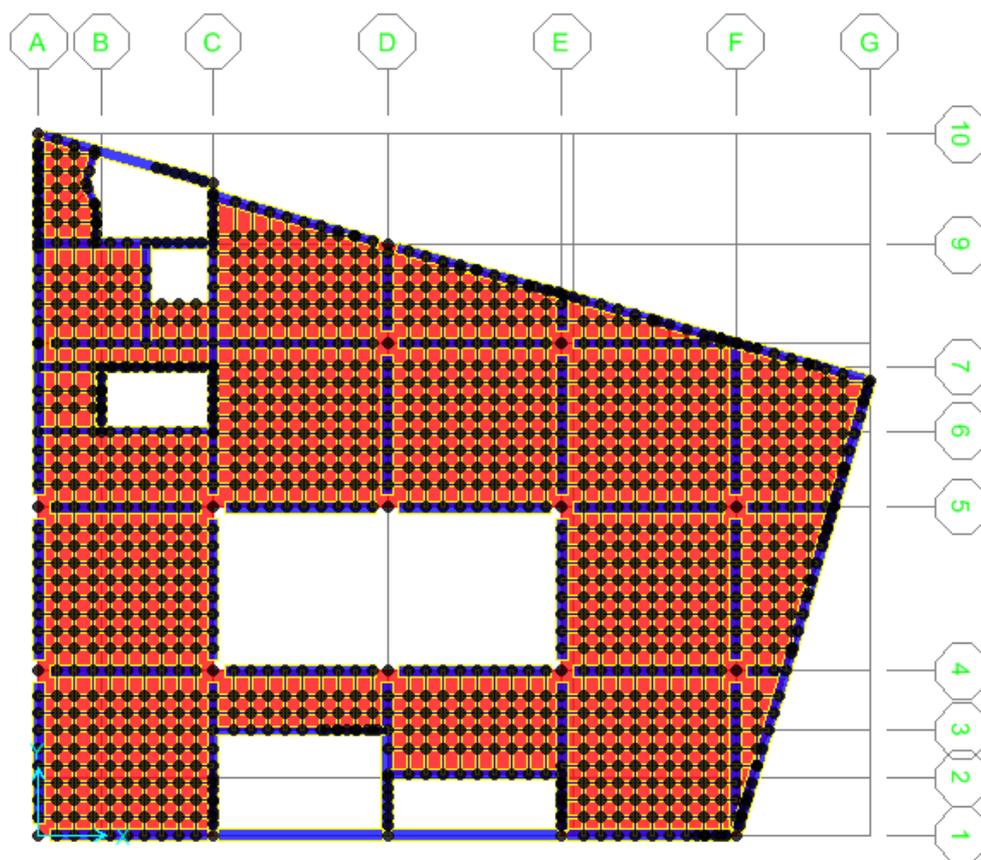
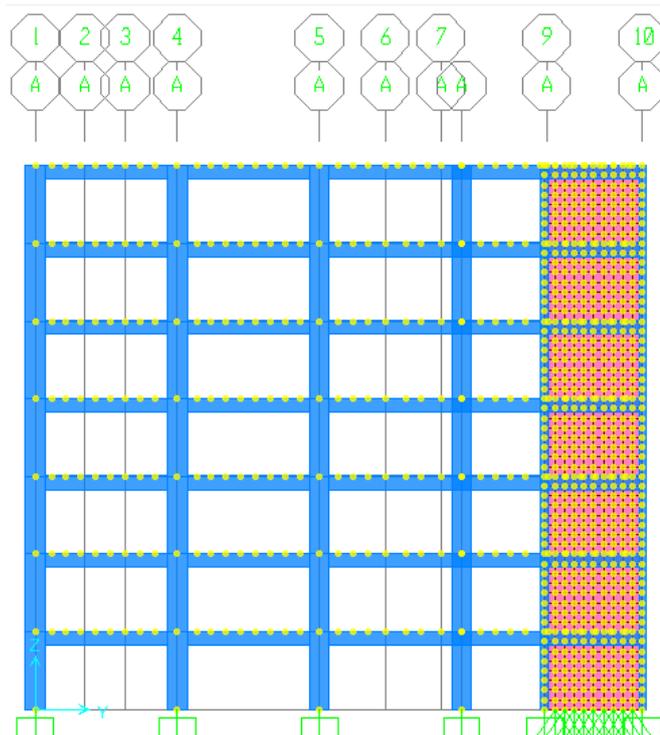
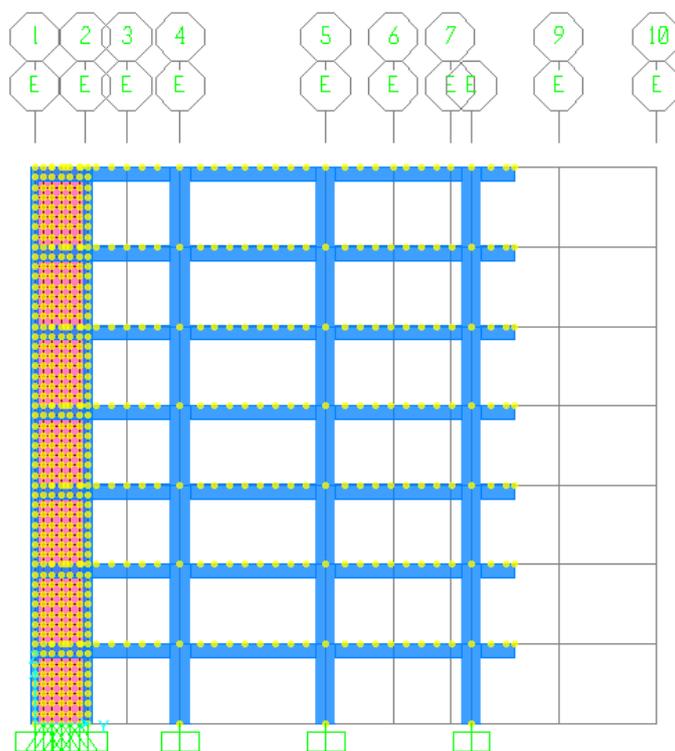


Figura 4.1.2. Vista en planta del edificio plano xy. Modelo realizado en SAP2000

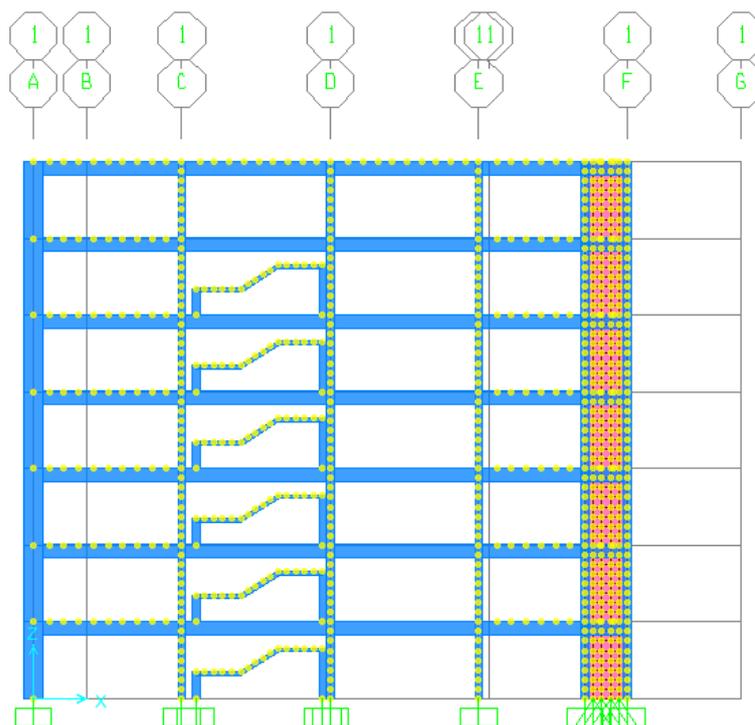
La losa de entrepiso es de hormigón armado, la cual ha sido modelada detalladamente para obtener resultados más exactos en cuanto a esfuerzos, reacciones, y deformaciones. En la Figura 4.1.3 se puede visualizar el corte vertical del edificio en el plano zy, lo que corresponde a la vista de la parte trasera del edificio en $y=0$, la cual tiene una dimensión mayor que en los demás cortes en este plano como se observa en la figura 4.1.3 y 4.2.4 debido a la pendiente negativa que tiene la edificación en el eje x la que cae desde los ejes locales 10 al 7 como se puede constatar en la vista en planta. En las figuras 4.1.5 y 4.1.6 se puede visualizar los cortes en el plano xz, de igual manera se puede visualizar que sus dimensiones varían. Como resultado de las vistas en los ejes globales xy, xz y yz se puede verificar claramente que es un edificio irregular en todos los ejes.



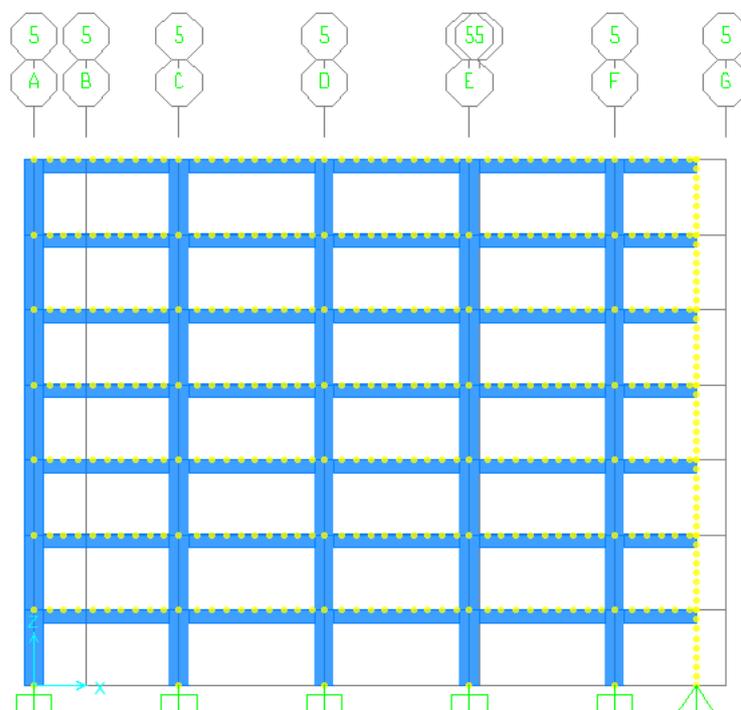
*Figura4.1.3 Vista en corte vertical del edificio de período largo en el plano y , $x=0m$.
Modelo realizado en SAP2000*



*Figura4.1.4. Vista en corte vertical del edificio de período largo en el plano y , $x=22.8m$.
Modelo realizado en SAP2000*



*Figura4.1.5. Vista en corte vertical del edificio de período largo en el plano xz, y=0m.
Modelo realizado en SAP2000*



*Figura4.1.6. Vista en corte vertical del edificio de período largo en el plano xz, y=14.4m.
Modelo realizado en SAP2000*

4.1. Espaciamiento entre ejes

Al ser una estructura irregular en los ejes en planta de la edificación dada la disposición de los elementos estructurales, los ejes de la edificación no poseen las mismas dimensiones, lo que refuerza la catalogación de la estructura como irregular. A continuación se detalla el espaciamiento que existe entre ejes de la estructura de período Corto. Las dimensiones han sido ingresadas en el modelo digital realizado en Sap2000. Se puede verificar que la altura entre pisos es de 3.96 metros y el espaciamiento entre vanos es irregular entre los ejes. La altura total del edificio es de 27.7 metros. Si bien la estructura tiene una altura considerable, su período es corto se debe a los muros estructurales que posee la edificación, lo que hace que la estructura sea más rígida, por consiguiente, tenga un período corto.

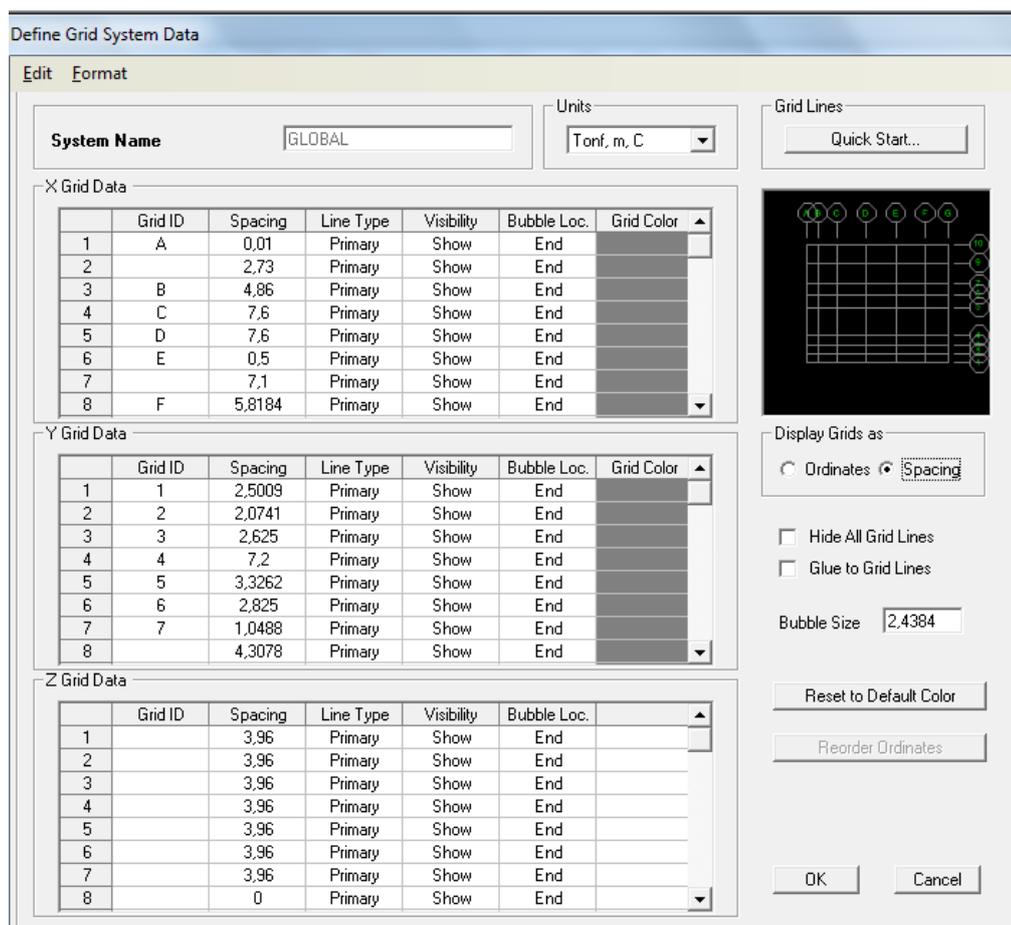


Figura 4.3.1. Espaciamiento entre ejes de la estructura de período largo.

4.1.1. Material de la edificación de período corto

El material de la estructura de período corto es un concreto de las siguientes características, las cuales fueron ingresadas en el programa SAP2000 para la elaboración del modelo digital.

Material Property Data	
General Data	
Material Name and Display Color	CONC
Material Type	Concrete
Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	
Weight per Unit Volume	2.403E-03
Mass per Unit Volume	2.450E-06
Units	Kgf. cm. C
Isotropic Property Data	
Modulus of Elasticity, E	253105.07
Poisson's Ratio, U	0.2
Coefficient of Thermal Expansion, A	9.900E-06
Shear Modulus, G	105460.45
Other Properties for Concrete Materials	
Specified Concrete Compressive Strength, f'c	280.
<input type="checkbox"/> Lightweight Concrete	
Shear Strength Reduction Factor	
<input type="checkbox"/> Switch To Advanced Property Display	
OK Cancel	

Figura 4.1.1.1. Propiedades del material de hormigón utilizado para el modelo.

4.1.2. Secciones

Las secciones de los elementos estructurales de la edificación de período corto se indican a continuación, en donde se detallan las dimensiones tanto de vigas como de columnas ingresadas en el programa SAP2000 para el modelo digital del edificio.

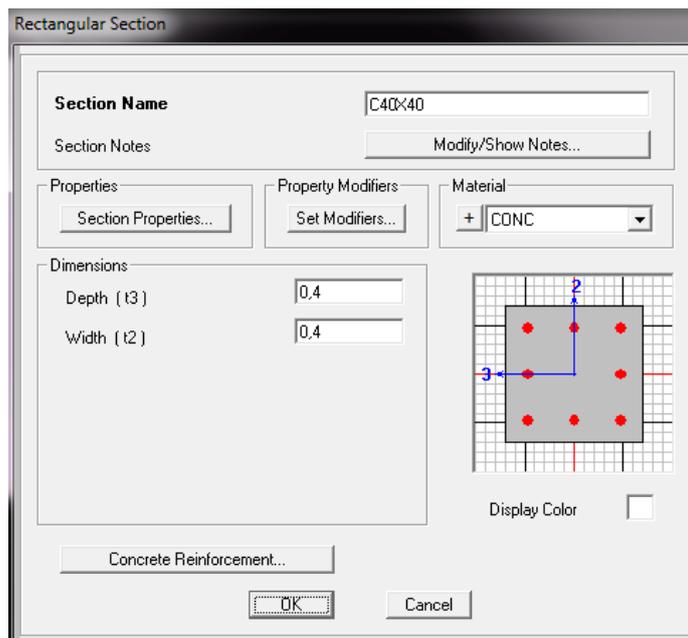


Figura4.1.2.1 Columna 40 x 40 utilizada en los extremos de los muros de corte.

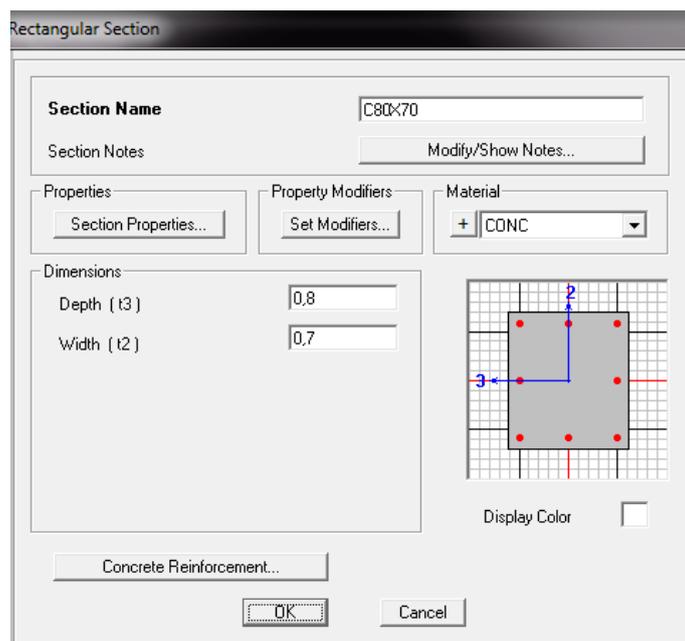


Figura4.1.2.2 Columna 80 x 70 utilizada en los extremos de los muros de corte.

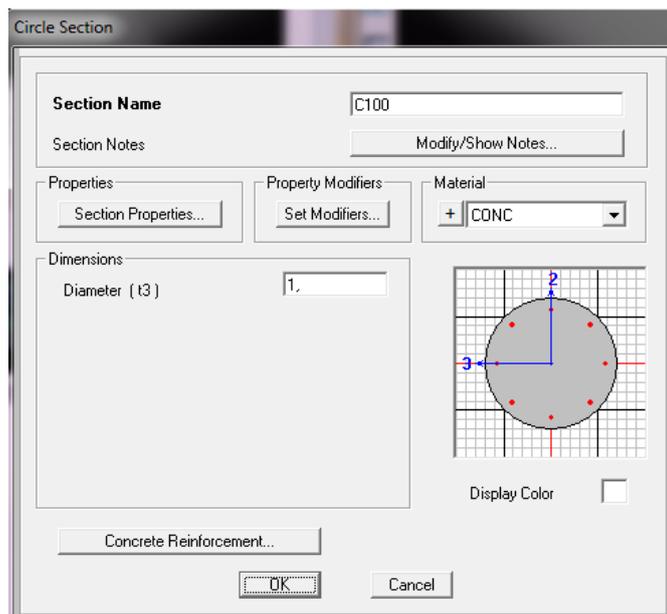


Figura4.1.2.3 Columna circular diámetro 100 cm utilizada como columna interior del edificio

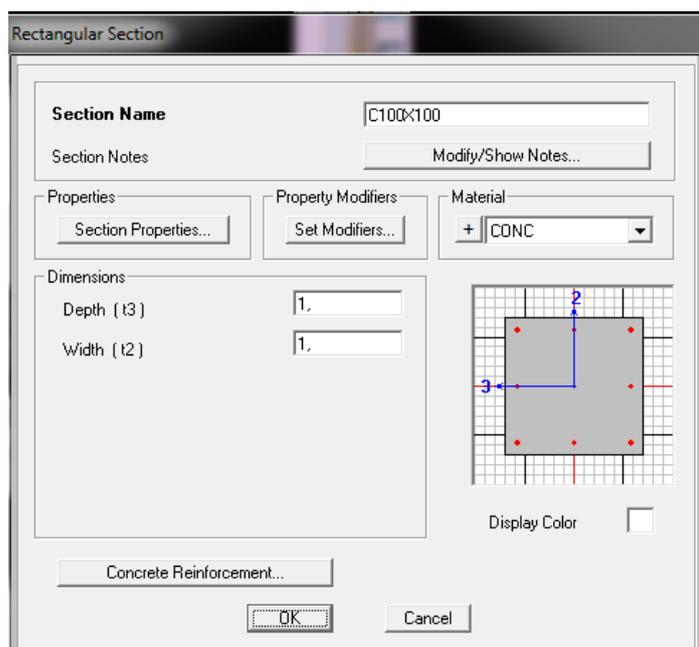


Figura4.1.2.4. Columna 100x100 utilizada como columna exterior del edificio

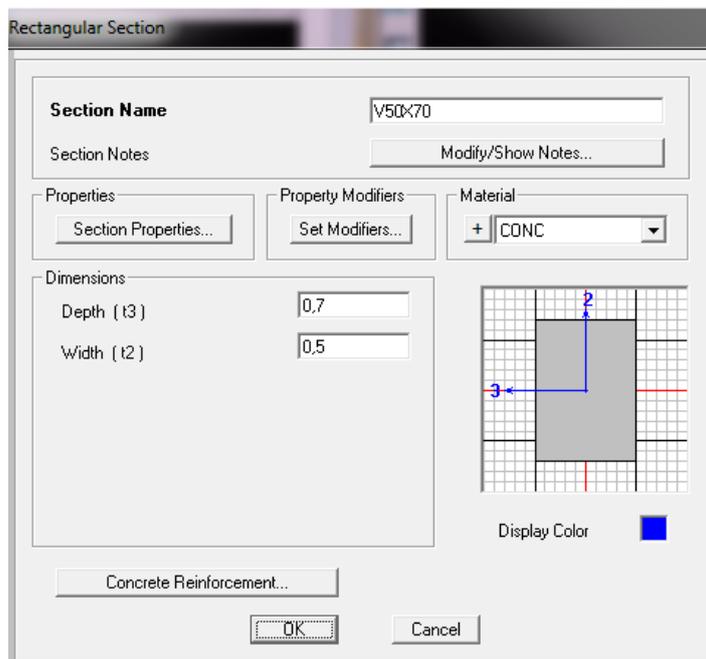


Figura 4.1.2.4. Columna 100x100 utilizada como columna exterior del edificio

Como se puede observar las dimensiones de las secciones tanto de vigas como de columnas de la estructura de período corto son grandes, por lo tanto, se tiene una rigidez alta y, por lo tanto, un período corto, además, al ser secciones de hormigón armado, el peso de la estructura también es elevado. Estas propiedades geométricas de los elementos estructurales brindan las características adecuadas para utilizar sistemas de aislamiento sísmico como se detalló en capítulos anteriores.

4.2. Descripción de la estructura de período largo

Una vez analizada la estructura de período corto, el modelo digital de la edificación de período largo se presenta a continuación en la Figura 4.2.1. Esta estructura fue diseñada conforme las necesidades de este estudio, es decir, se realizaron varias iteraciones entre las

secciones tanto de vigas como de columnas para tener un período largo que contraste notablemente con la estructura de período corto presentada en la sección anterior.

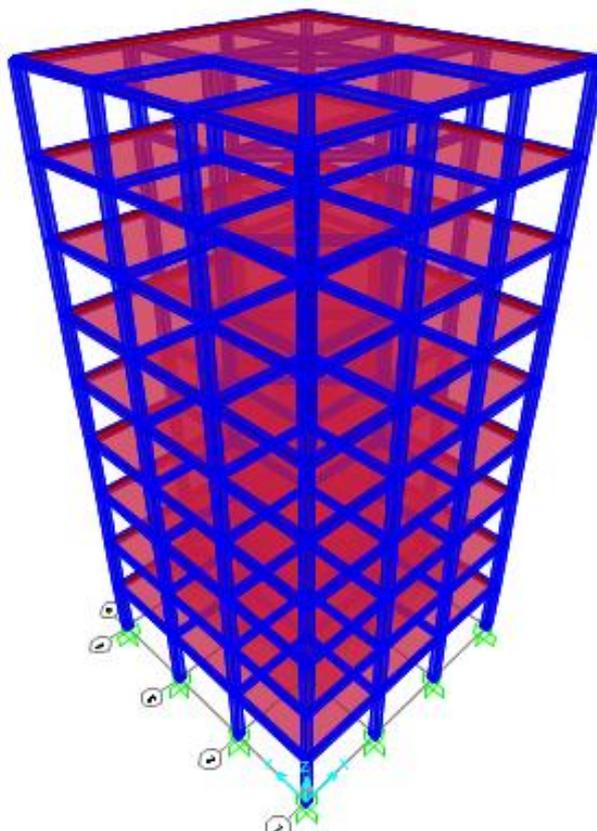


Figura4.2.1. Esquema en 3D del edificio de período largo, modelo realizado en SAP2000.

En este modelo se puede verificar que la disposición de los elementos estructurales es simétrica, tanto en su corte vertical, como su corte en planta. La configuración del modelo estructural de la edificación tiene columnas, vigas y losa de hormigón armado, las características del material se indican más adelante. De la vista en planta, Figura4.2.2, se puede visualizar que las vigas forman ángulos rectos con los ejes de la edificación dando como resultado una estructura convencional y regular todos sus planos. Este tipo de diseño arquitectónico da como resultado una estructura regular, además, tiene la configuración estructural recomendada por la norma NEC 11 para un diseño sísmo resistente en cuanto a la disposición de sus componentes estructurales.

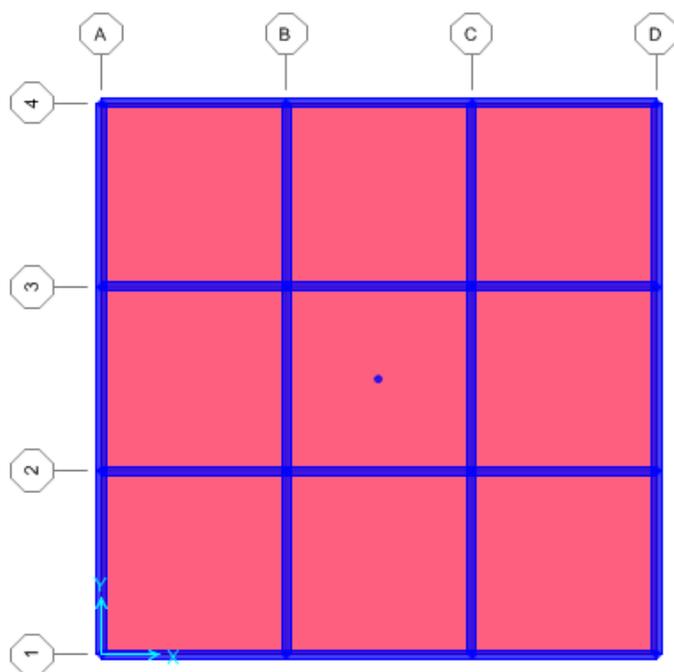


Figura4.2.2. Vista en planta de la estructura de período largo. Modelo en Sap2000

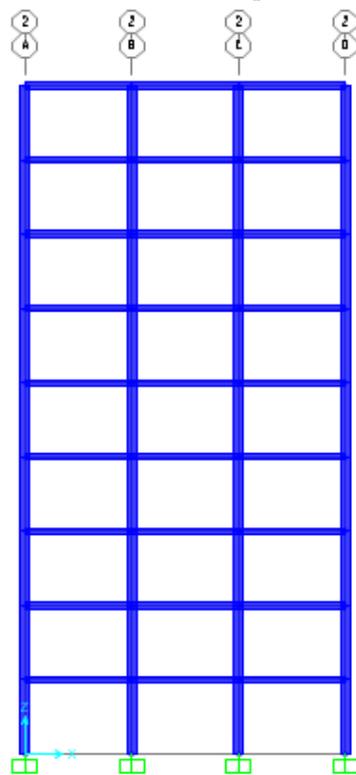


Figura4.2.2. Vista en corte de la estructura de período largo. Modelo en Sap2000}

4.3. Espaciamiento entre ejes

La altura de una edificación es una de las características que influyen el período fundamental de vibración de una estructura, por lo general, estructuras altas tienen períodos largos, y estructuras bajas tienen períodos cortos. A continuación se detalla el espaciamiento que existe entre los ejes de la estructura de período largo. Las dimensiones han sido ingresadas en el modelo digital realizado en Sap2000. Se puede verificar que la altura entre pisos es de 3.5 metros y el espaciamiento entre vanos es de 5 metros. La altura total del edificio es de 31.5 metros con una sección en planta de 15x15 metros.

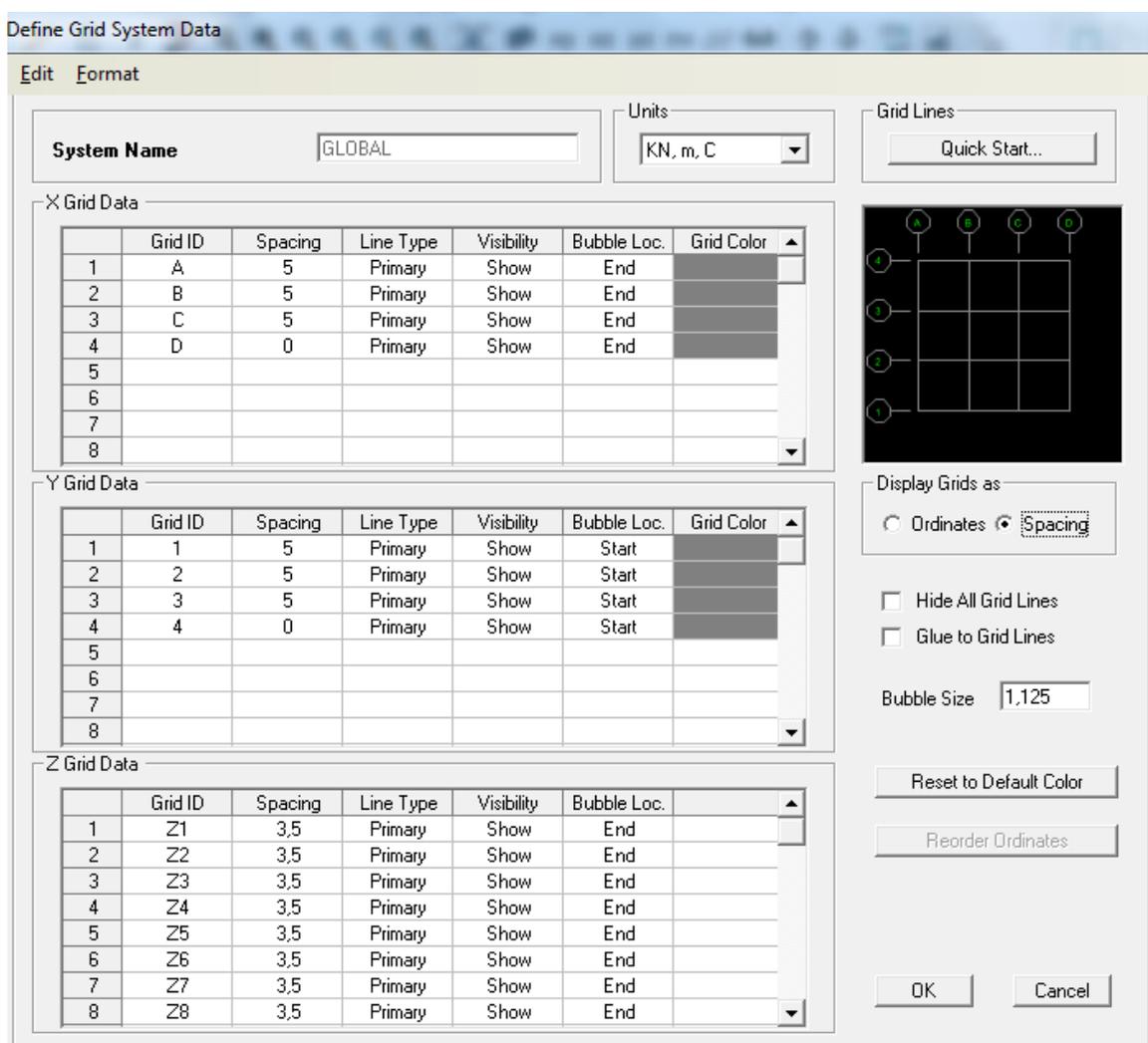


Figura 4.3.1. Espaciamiento entre ejes de la estructura de período largo.

4.3.1. Material de la edificación de período corto.

El material de la estructura de período corto es un concreto de las siguientes características, las cuales fueron ingresadas en el programa SAP2000 para la elaboración del modelo digital.

Figura 4.2.1.1. Propiedades del material de hormigón utilizado para el modelo.

4.3.2. Secciones

Para alcanzar un período largo y cumplir con los objetivos de este estudio, el dimensionamiento de las secciones tanto de columnas y vigas fueron adoptadas para este fin, sin embargo, se debe resaltar que este es un modelo estructural utilizado únicamente con fines didácticos. Las dimensiones tanto de vigas como de columnas fueron ingresadas

en el programa SAP2000 para el modelo digital del edificio. A continuación se indican las propiedades de los elementos.

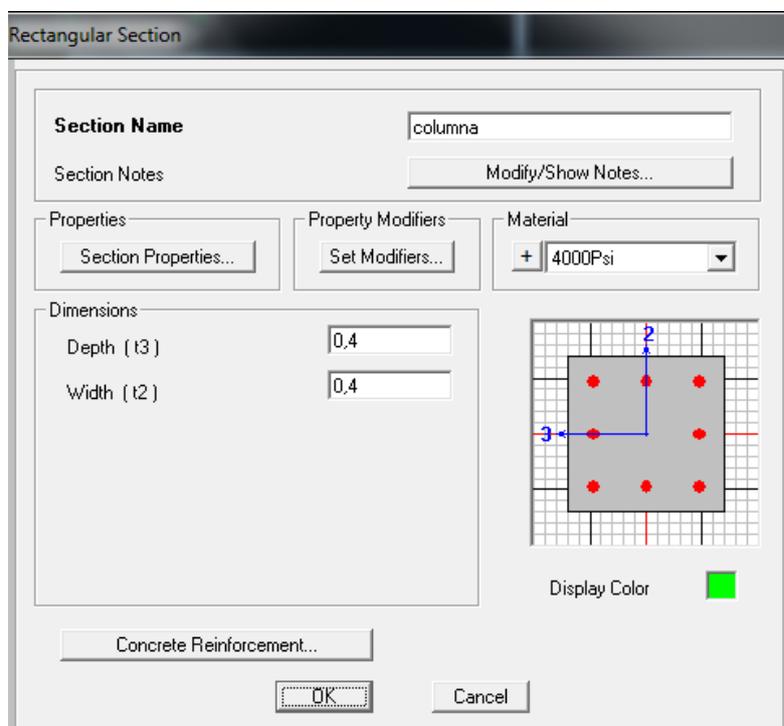


Figura4.2.1.2. Columna de 50x50 general utilizada para la edificación de período largo.

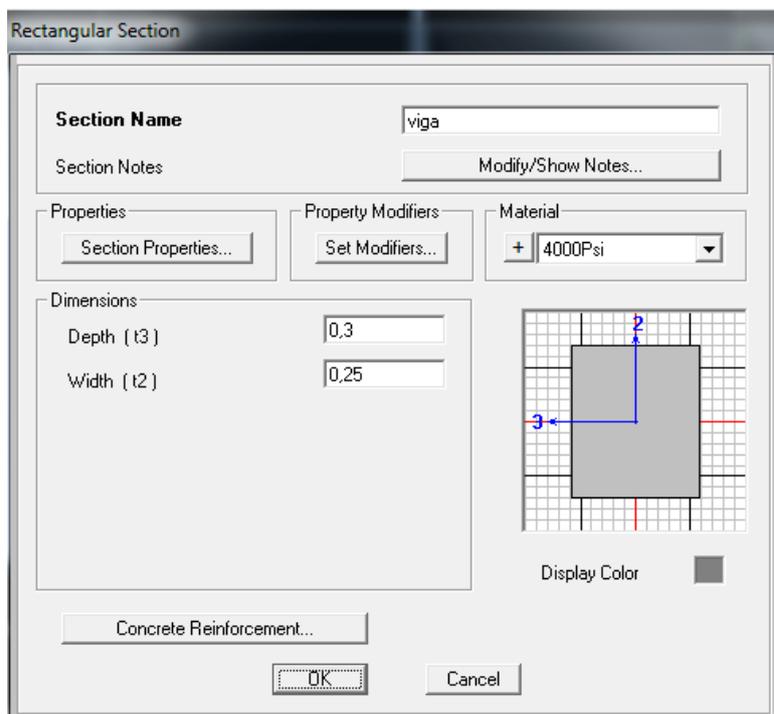


Figura4.2.1.2. Viga de 40x20 general utilizada para la edificación de período largo.

De las secciones presentadas se puede verificar que la edificación posee únicamente dos tipos de elementos estructurales, lo que nos da como resultado un modelo bastante sencillo y práctico para los fines de este estudio. Dada que las secciones de la estructura de período largo son relativamente pequeñas, junto con su altura, que es de 9 pisos, tenemos como resultado un período fundamental de vibración largo, lo cual se busca para realizar el estudio.

5. ANÁLISIS DINÁMICO DE LAS EDIFICACIONES

Para el análisis dinámico de las edificaciones a estudiar se realizaron simulaciones tiempo historia en el campo inelástico con registros de sismos reales obtenidos de la base de datos de PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) de la universidad de Berkeley. El software utilizado para el estudio es el programa de análisis estructural Sap2000.

5.1. Sismo De Diseño

Para realizar el análisis dinámico de la estructura es necesario seleccionar señales sísmicas reales registradas a lo largo de la historia como propone la norma NEC 11 en el capítulo de peligro sísmico. En Quito, lugar donde ficticiamente se plantea la edificación, no existen registros sísmicos que lleguen a aceleraciones de hasta 0.4g razón por la que se tomaron en cuenta registros provenientes de otros países bajo similares características geomorfológicas de terreno. Para este estudio se consideraron 7 señales sísmicas obtenidas libremente de la base de datos PEER, uno de los eventos, Northridge, se toman los registros de dos estaciones debido a las características de amplitud de una de ellas. Estos eventos considerados para el análisis dinámico de las estructuras corresponden a los utilizados en el estudio de microzonificación de la ciudad de Quito. Para finalizar, un registro artificial adecuado para la ciudad de Quito es tomado en cuenta para el estudio de las estructuras. Uno de los factores determinantes para la elección de los sismos de diseño es el tipo de suelo del cual se obtiene el registro, para este caso, se han tomado registros en suelos firmes, es decir, con velocidades de onda de corte superior a los 720 m/s (Miduvi, Cámara de la Construcción de Quito, 2011) En la siguiente tabla se indican las características de los sismos de diseño escogidos y, a continuación, se muestran los gráficos de los acelerogramas.

Nombre del evento	Lugar	Magnitud	PGA [g]	Distancia [km]
Georgia	U.S.S.R	6.2	0.0407	52
Imperial Valley	U.S.A	6.5	0.1618	36
Irpinia	Italia	6.5	0.1542	33
Whittier Narrows	U.S.A	6.0	0.2022	10
San Fernando	U.S.A	6.6	0.1614	27
Northridge	U.S.A	6.7	0.2339	35
Parkfield	U.S.A	6.1	0.3574	10
Artificial	Quito	6.0	0.4156	-
Northridge 1.5g	U.S.A	6.7	1.5849	35

Tabla 5.1.1. Registros sísmicos de diseño utilizados para el análisis tiempo historia.

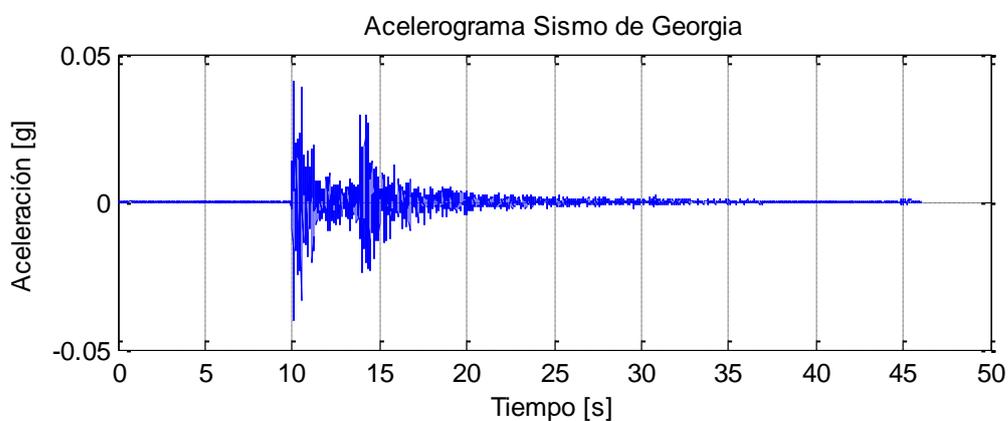


Figura 5.1.1. Acelerograma del sismo de Georgia, base de datos PEER

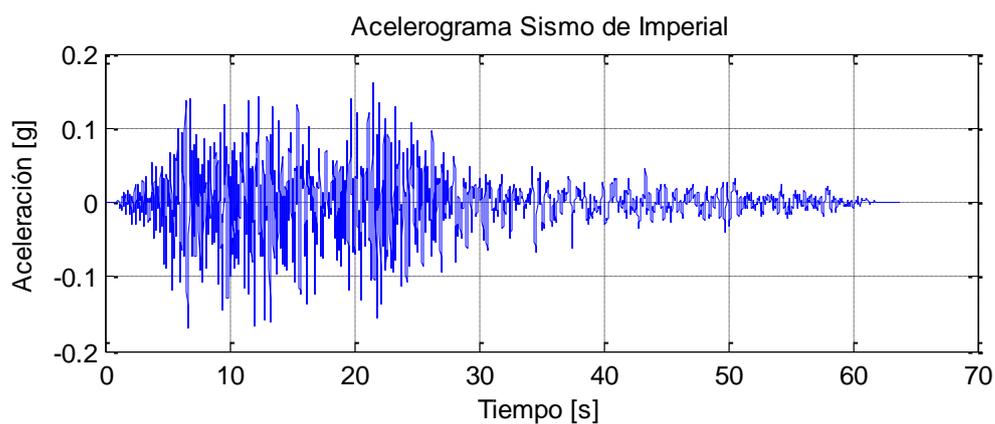


Figura 5.1.2. Acelerograma del sismo de Imperial Valley, base de datos PEER

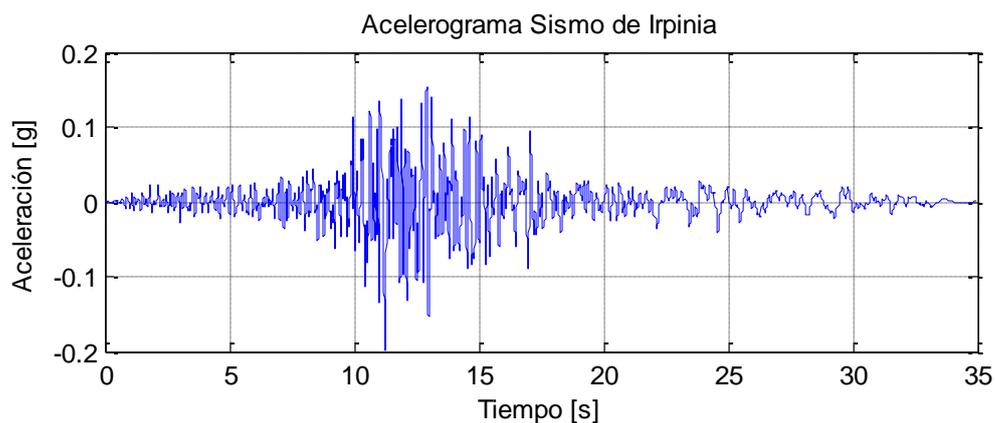


Figura5.1.3. Acelerograma del sismo de Irpinia, base de datos PEER

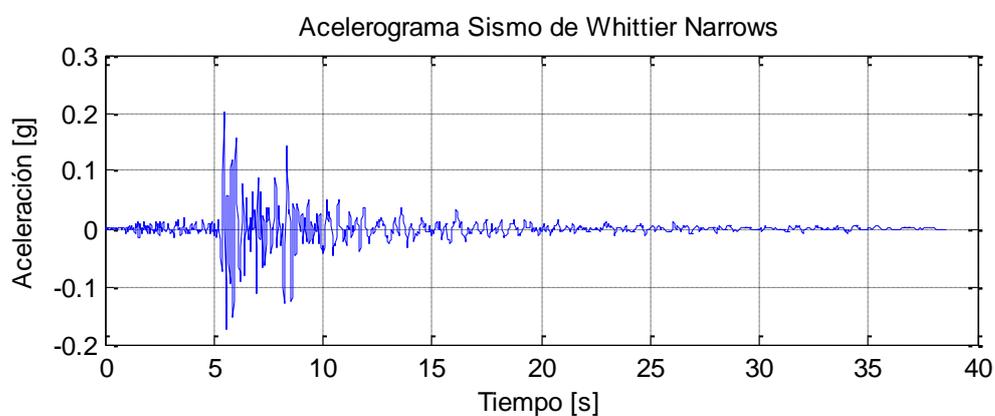


Figura5.1.4. Acelerograma del sismo de Whittier Narrows, base de datos PEER

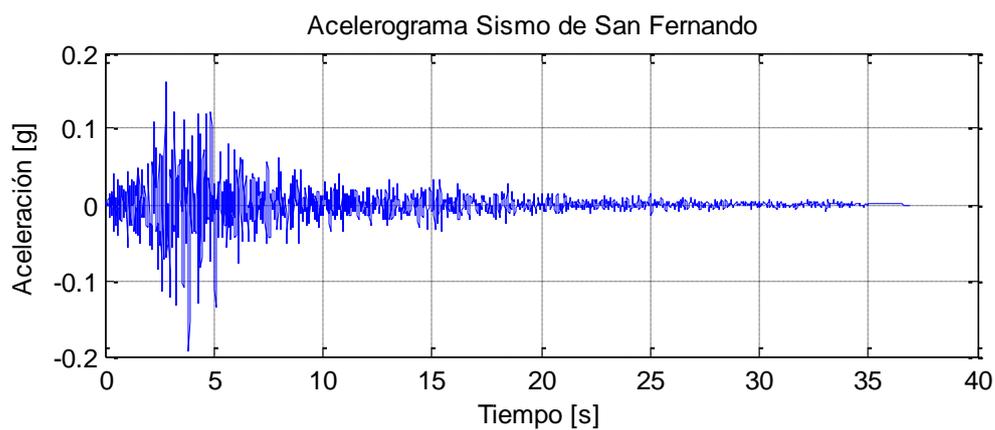


Figura5.1.5. Acelerograma del sismo de San Fernando, base de datos PEER

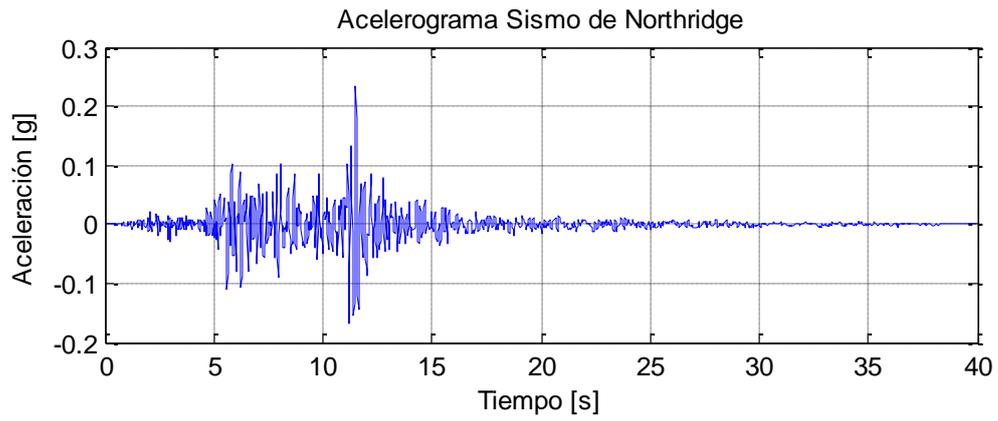


Figura5.1.6. Acelerograma del sismo de Northridge, base de datos PEER

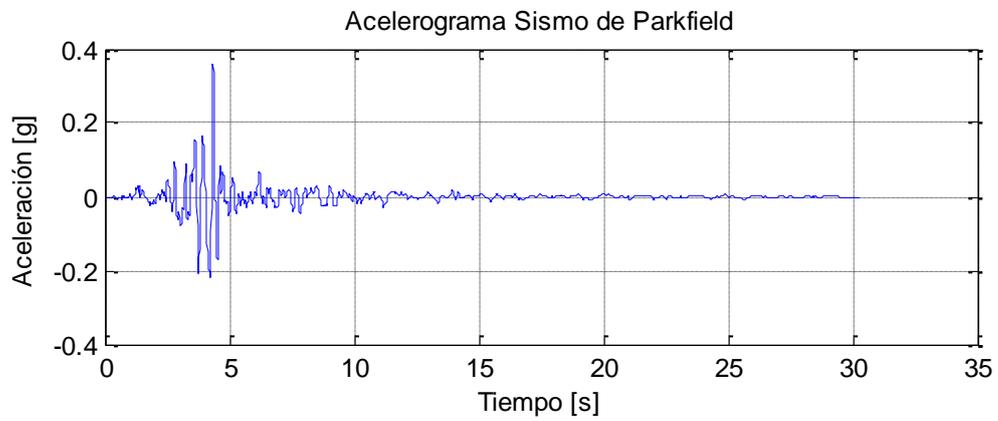


Figura5.1.7. Acelerograma del sismo de Parkfield, base de datos PEER

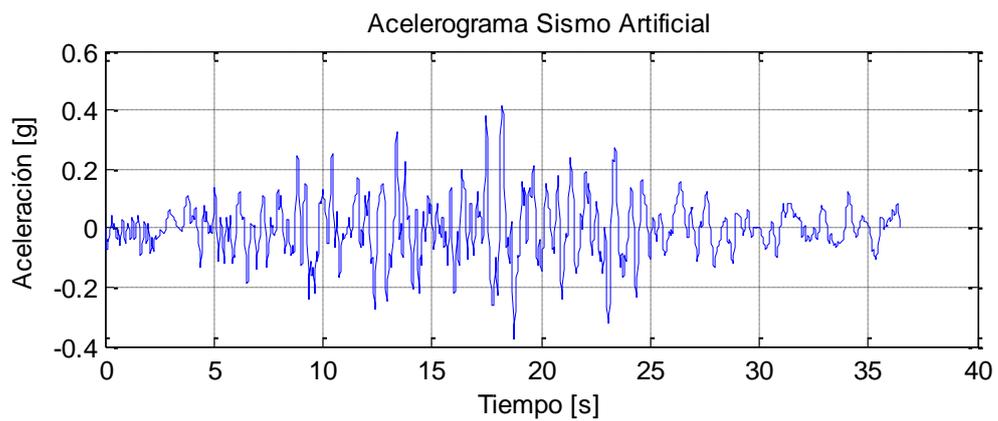


Figura5.1.8. Acelerograma del sismo Artificial base de datos PEER

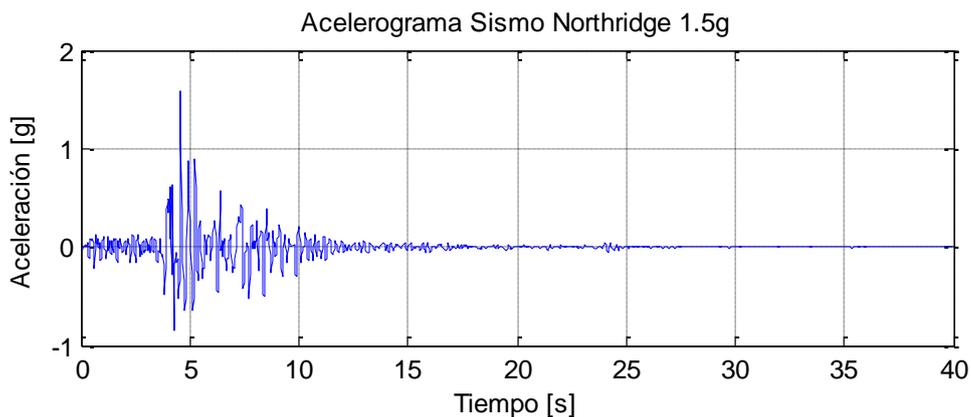


Figura 5.1.9. Acelerograma del sismo Northridge 1.5g, base de datos PEER

5.2. Espectros de Fourier de las señales sísmicas

Como se indicó en el capítulo 1 de este documento, una de las herramientas para analizar una señal sísmica es mediante su transformada de Fourier, la cual, nos indica el contenido frecuencial de la misma. El análisis de las frecuencias de Fourier nos brinda una idea de cuál puede ser el comportamiento de una estructura durante la acción de una señal sísmica analizada, es decir, cual es el período fundamental de la estructura que predomina durante la acción del sismo (Paz, 1992). A continuación, en la siguientes figuras se muestran las transformadas de Fourier de cada una de las señales sísmicas de diseño junto con las frecuencias de cada una de las estructuras analizadas las cuales son: estructura de período corto aislada, estructura no aislada de período corto, estructura de período largo aislada y estructura período largo no aislada.

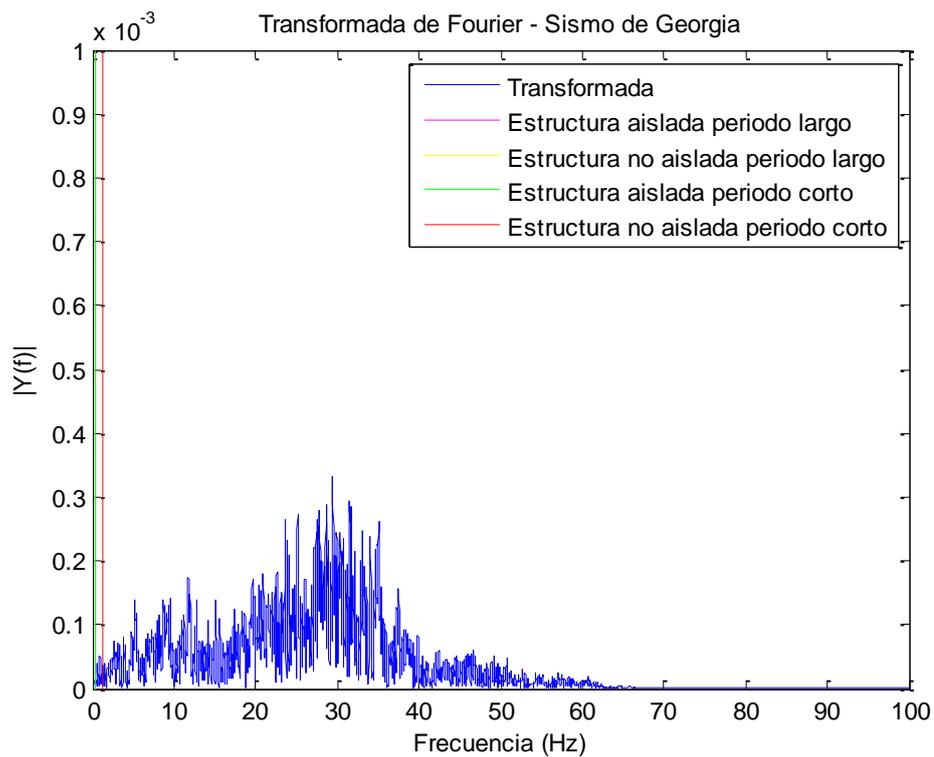


Figura 5.2.1. Espectro de Fourier del sismo de Georgia. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.

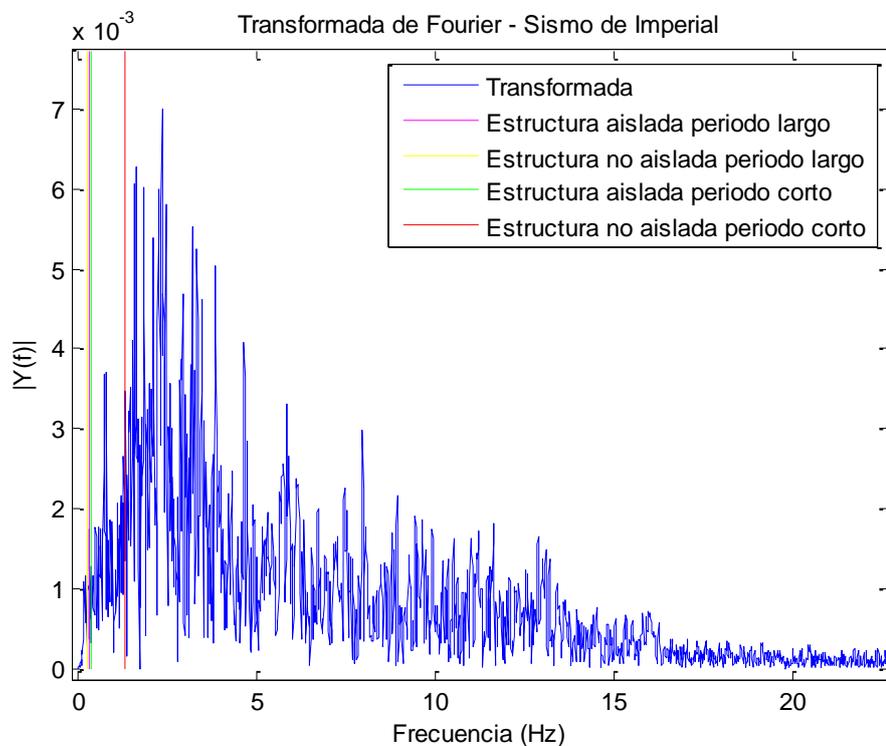


Figura 5.2.2. Espectro de Fourier del sismo de Imperial. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.

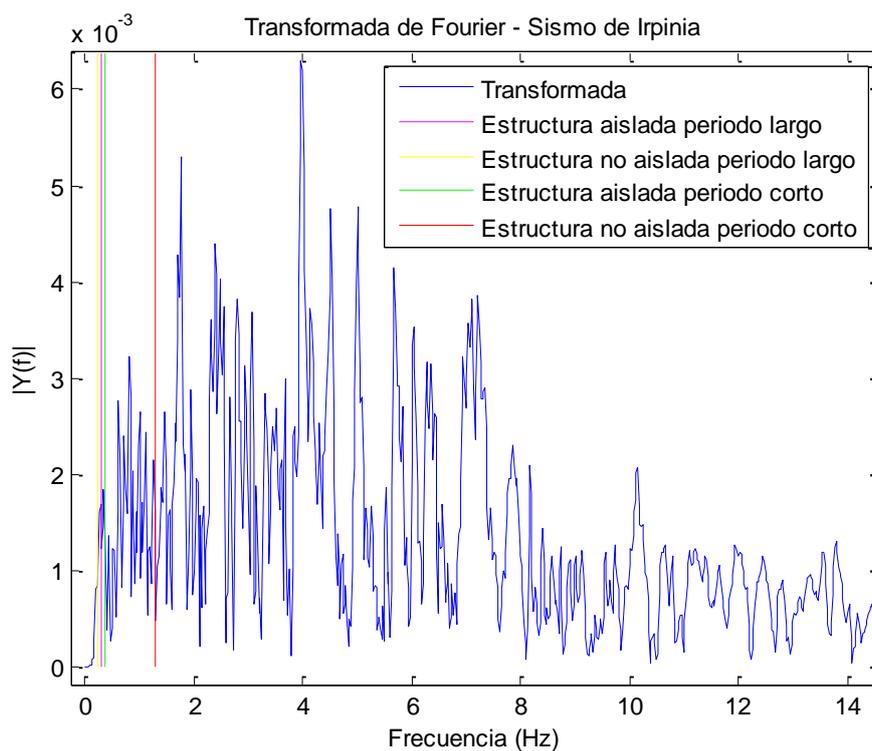


Figura 5.2.3. Espectro de Fourier del sismo de Irpinia. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.

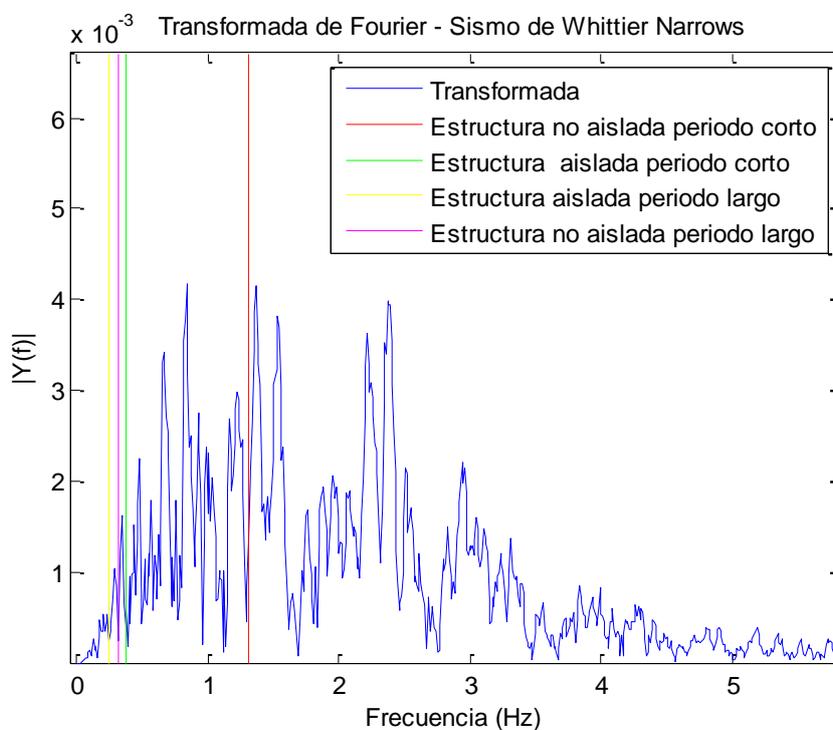


Figura 5.2.4. Espectro de Fourier del sismo de Whittier Narrows. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.

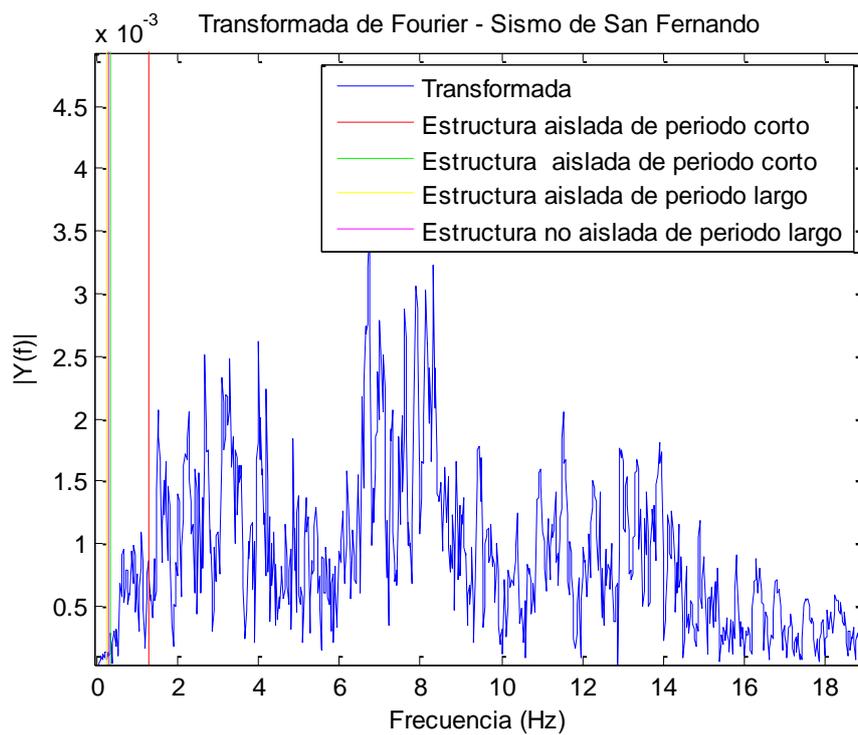


Figura5.2.5. Espectro de Fourier del sismo de San Fernando. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.

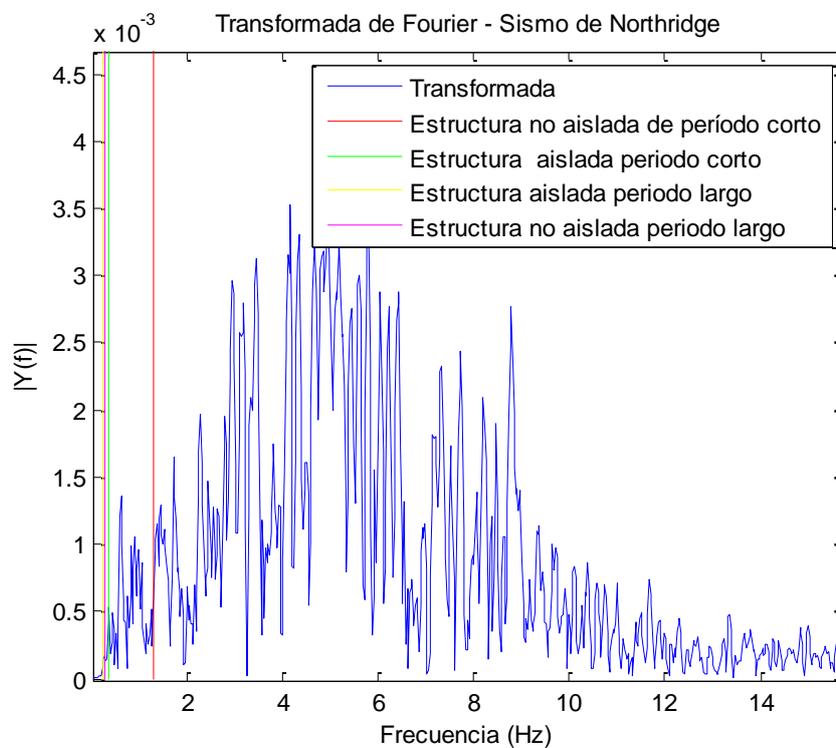


Figura5.2.6. Espectro de Fourier del sismo de Northridge. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.

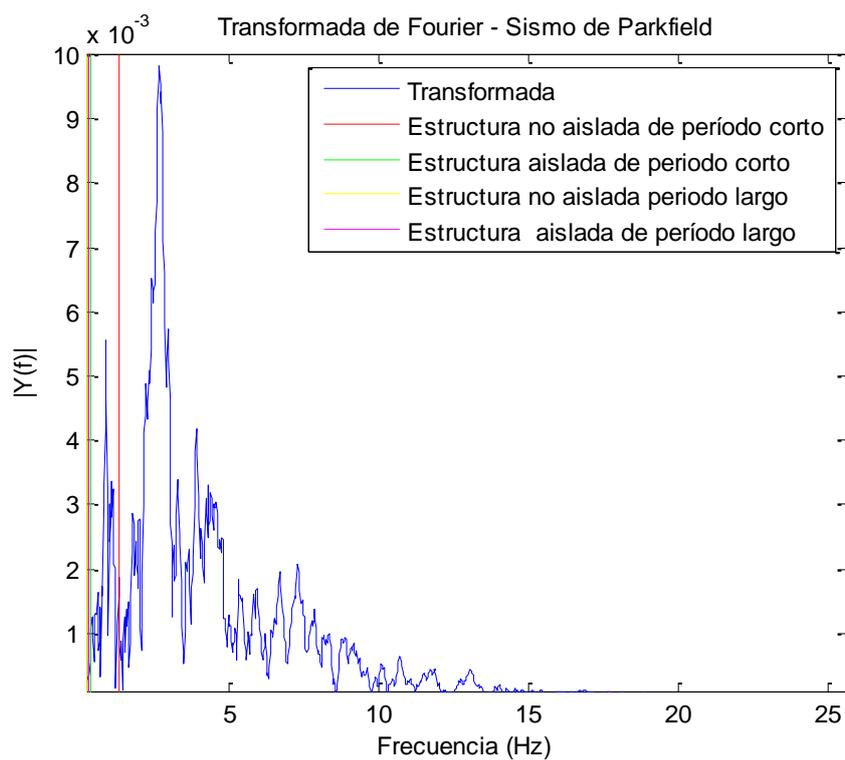


Figura5.2.7. Espectro de Fourier del sismo de Parkfield. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.

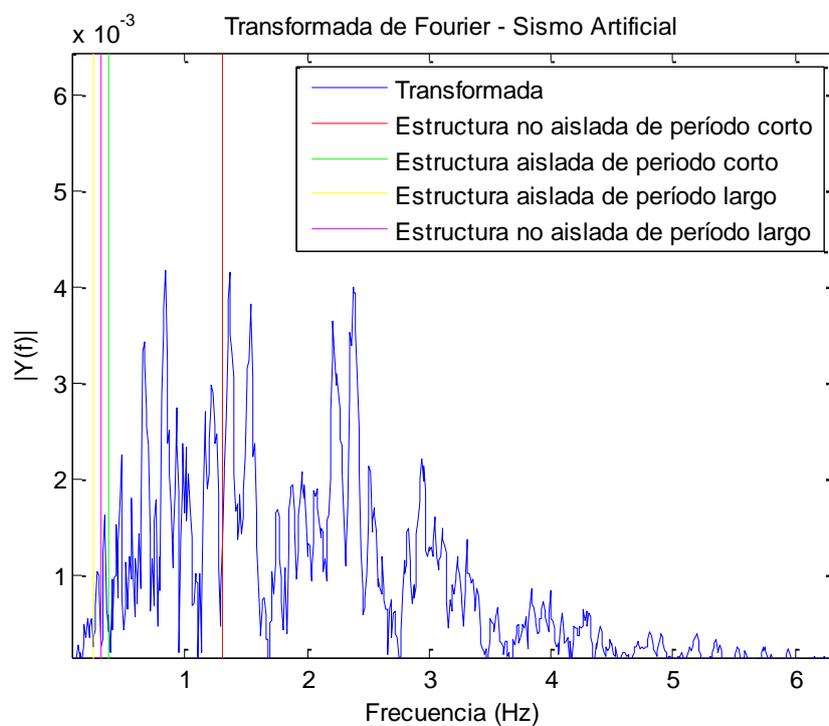


Figura5.2.8. Espectro de Fourier del sismo Artificial. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.

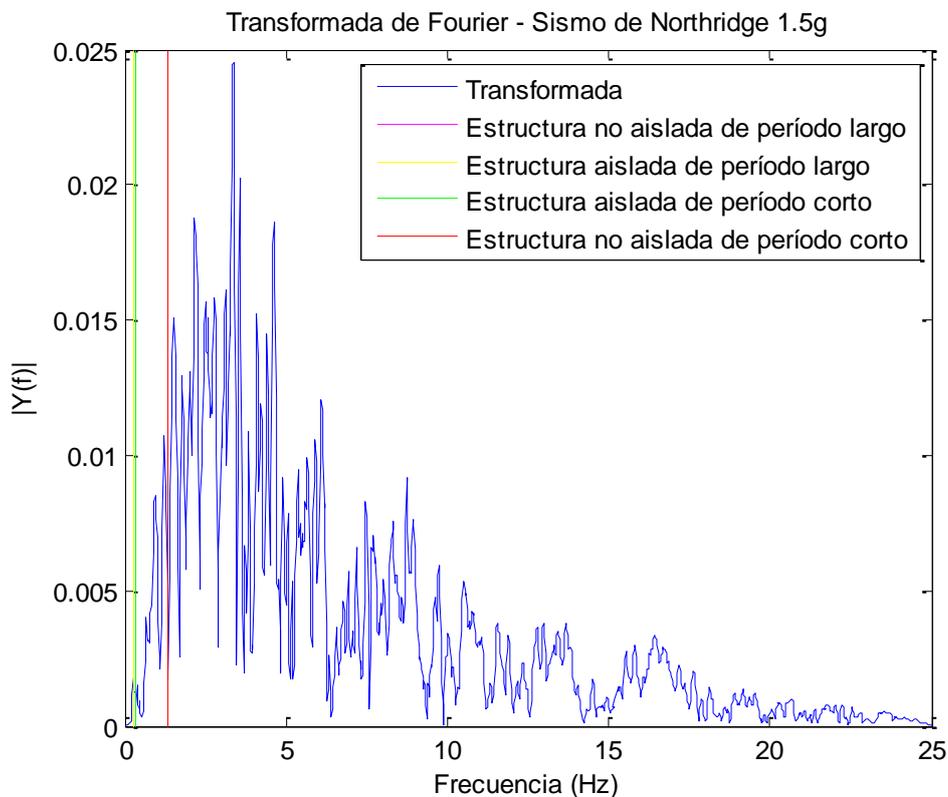


Figura 5.2.9. Espectro de Fourier del sismo de Northridge 1.5g. Líneas verticales indican los períodos de las estructuras analizadas.

5.3. Períodos fundamentales de vibración del edificio de período corto y período largo

El diseño sísmo resistente se basa en varios parámetros, entre ellos, el período fundamental de la estructura. Como se ha indicado en capítulos anteriores, el período de la estructura depende de las características geométricas y físicas de los elementos estructurales, es decir, se puede modificar y variar secciones para obtener períodos de vibración deseados. Sin embargo, si bien períodos cortos son producto de estructuras rígidas, y períodos largos son producto de estructuras flexibles, ambas tienen problemas ante cargas dinámicas como las de un sismo, por un lado la probabilidad de

amplificaciones muy grandes en aceleración (resonancia), y por otro lado, deformaciones muy grandes en el caso de períodos largos. Por esta razón, la aplicación de sistemas de aislamiento de base modifica el período de la estructura manteniendo las secciones de los elementos estructurales. En la tabla a continuación se indican los períodos fundamentales de las dos estructuras sin aislamiento de base, el período fundamental fue calculado mediante el programa Sap2000.

Descripción del edificio	Período fundamental
Período corto	0.76s
Período largo	3.23s

Tabla 5.3.1. Períodos fundamentales de vibración de las estructuras de período corto y largo.

5.4. Selección del aislador para la edificación de período corto y período largo.

Para obtener los resultados esperados en un sistema de aislamiento de base se debe escoger adecuadamente el aislador conforme a las especificaciones de diseño mencionadas en el capítulo 3 de este documento. Si bien el diseño de aisladores es complejo y debe ser realizado por un ingeniero especialista en aislamiento sísmico (Kelly, 2001), existen fabricantes que producen aisladores diseñados y probados experimentalmente que están disponibles en el mercado. Entre los proveedores de este tipo de sistemas están Bridgestone (Japón), Maurer (Alemania), Mageba (Suiza), entre otros. La gran ventaja que brindan estos proveedores es la confiabilidad de un mecanismo de aislamiento diseñado y probado bajo parámetros de calidad muy altos además cumpliendo con normas internacionales de seguridad y producción. Para el presente estudio se ha tomado los aisladores producidos por Bridgestone, en el Anexo A se encuentra la tabla de especificaciones técnicas que pone a disposición el fabricante en su página web. Las condiciones establecidas para las edificaciones a estudiarse no comprenden ninguna

limitación de desplazamientos horizontales los que nos limita únicamente a la capacidad del aislador a resistir cargas verticales para la elección del aislador adecuado.

En la siguiente tabla se indica el tipo de aislador que se escogió para cada una de las estructuras, es decir, para las estructuras de período largo y período corto.

	Estructura de período corto	Estructura de período largo
Aislador	HH085X6R	HH075X6R
Rigidez inicial	6999 kN/m	8100 kN/m
Rigidez efectiva	1180 kN/m	1370 kN/m
Radio de rigidez post fluencia	0.1	0.1

5.4.1. Variación del período fundamental de las Estructuras con sistema de aislamiento de base elastomérico.

Una vez escogido el aislador para cada una de las edificaciones, es decir, de período corto y largo, se procede a simular el edificio en el programa SAP 2000 y verificar la variación del período de cada una de ellas mediante el análisis modal que tiene este software. Como se indica en la tabla a continuación, se puede verificar el aumento del período de la estructura al momento de aplicar un sistema de aislamiento de base elastomérico.

	Período corto		Período largo	
	No aislada	Aislada	No Aislada	Aislada
pisos	7	7	9	9
período	0,76 s	2,25s	3,15s	3,99s
frecuencia	1,31 Hz	0,38 Hz	0,32 Hz	0,25 Hz
tipo de aislador	N/A			N/A

Tabla 5.4.1.1 Tabla de variación de período de la estructura de período largo y corto una vez aplicado el sistema de aislamiento de base elastomérico

5.5. Análisis de aceleraciones de las estructuras

Uno de los objetivos de los sistemas de aislamiento de base en edificaciones es reducir la magnitud de la aceleración adoptada por la estructura debido al sismo. Como se definió en el capítulo 1, en un sistema perfecto de aislamiento de base, la aceleración del sistema estructural es cero, sin embargo, en la realidad no se puede lograr un aislamiento total de la edificación. Por consiguiente, durante un sismo, la estructura rompe su estado de equilibrio y entra en movimiento con una aceleración, velocidad y desplazamiento en sus grados de libertad. Para el análisis de aceleraciones se utilizó el software de análisis estructural SAP2000 con su herramienta de análisis tiempo historia, la misma que nos permite ingresar como datos de entrada los registros sísmicos detallados al inicio de este capítulo y tener como resultado la respuesta de la estructura ante estos eventos. Este tipo de análisis tiempo historia se recomienda en las normas de diseño de edificaciones incluyendo la NEC 11.

5.5.1. Análisis de aceleraciones en la estructura de período corto y período largo

Para realizar el análisis de aceleraciones tanto en la estructura de período corto como en la estructura de período largo se ha realizado el análisis tiempo historia en SAP200, teniendo como resultado los gráficos de aceleración versus tiempo. Con los resultados obtenidos se puede comparar claramente la diferencia en cuanto a la respuesta en aceleraciones de la estructura. En las secciones a continuación se indican los resultados de las aceleraciones de la estructura de período corto y de la estructura de período largo de cada uno de los registros sísmicos detallados anteriormente en este capítulo, es decir para los sismos de Georgia, Imperial, Irpinia, Whittier Narrows, San Fernando, Northridge, Parkfield, Northridge 1.5g y el sismo artificial para la ciudad de Quito. Para poder diferenciar los resultados de la edificación aislada y no aislada se ha marcado de color

verde las aceleraciones del suelo, de color azul la aceleración de la estructura aislada y de color rojo, la aceleración de la estructura no aislada. El punto de referencia para obtener los resultados de aceleración tanto en la estructura de período corto como en la estructura de período largo es el centro de gravedad de la sección en planta del último piso.

5.5.1.1. Resultados de aceleraciones de la estructura de período corto

A continuación se presentan los resultados del análisis dinámico de la estructura de período corto en cuanto a la aceleración que adopta la estructura debido a cada uno de los registros sísmicos presentados en este documento como sismos de diseño. Los resultados corresponden a la aceleración absoluta que adopta el último piso de la estructura. Para obtener los gráficos de respuesta se utiliza el programa MatLab con los resultados que otorga el programa Sap2000.

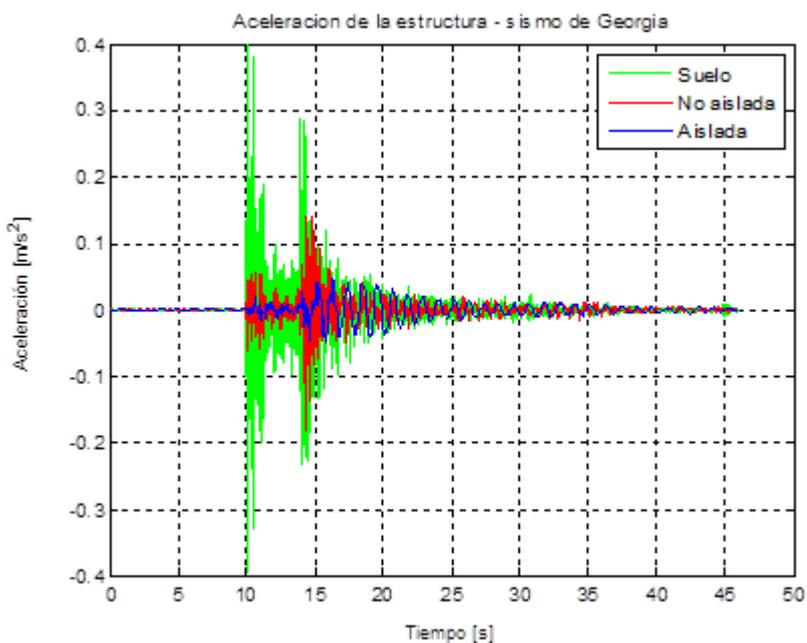


Figura5.5.1.1.1 Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período corto con base aislada y sin base aislada durante el sismo de Georgia.

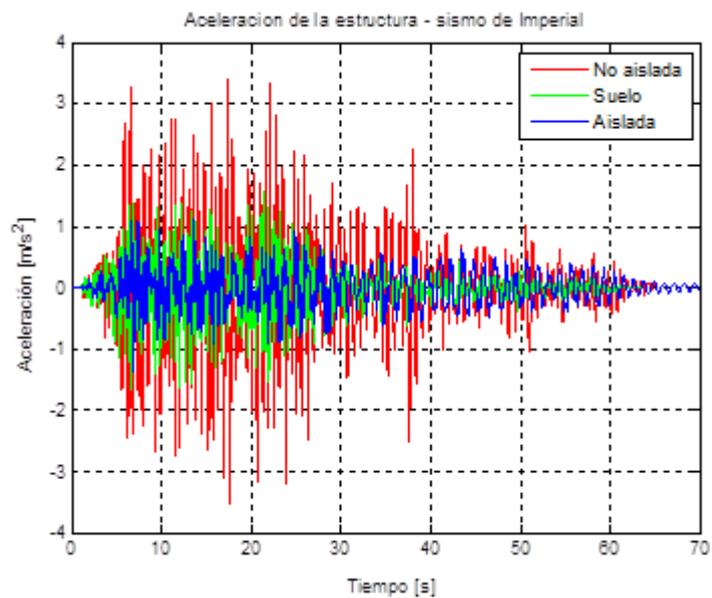


Figura5.5.1.1.2 Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período corto con base aislada y sin base aislada durante el sismo de Imperial.

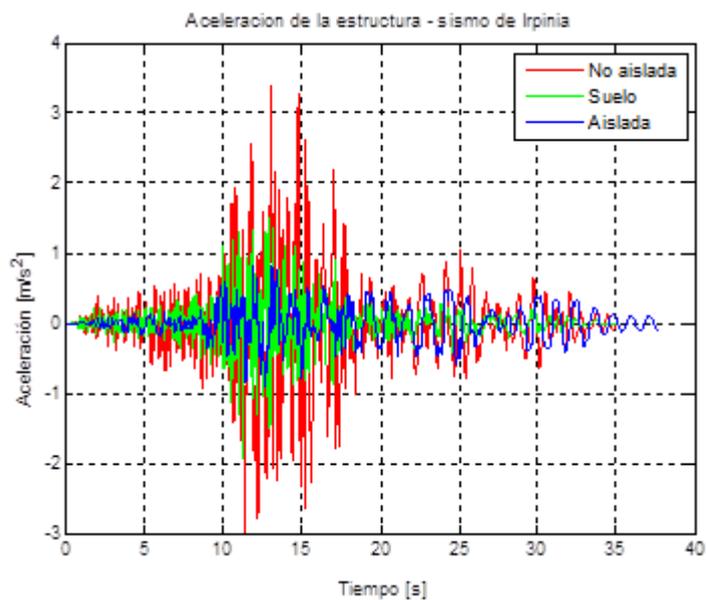


Figura5.5.1.1.3. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período corto con base aislada y sin base aislada durante el sismo de Irpinia.

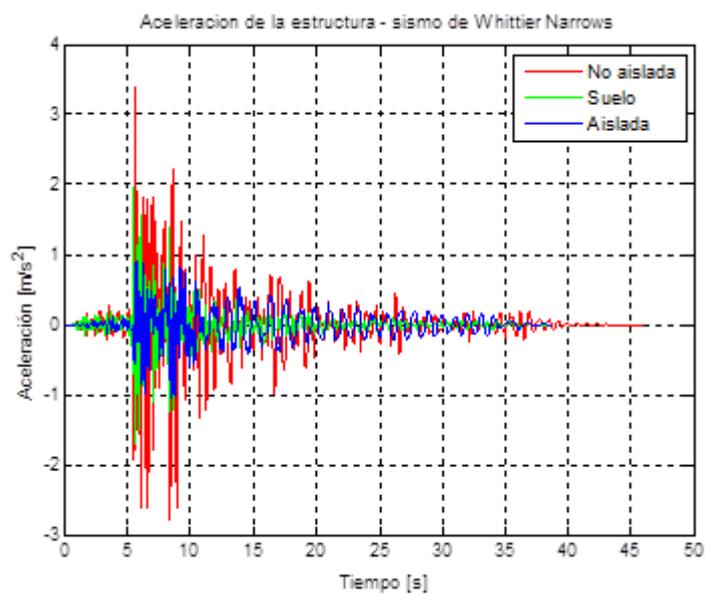


Figura5.5.1.1.4. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período corto con base aislada y sin base aislada durante el sismo de Whittier Narrows.

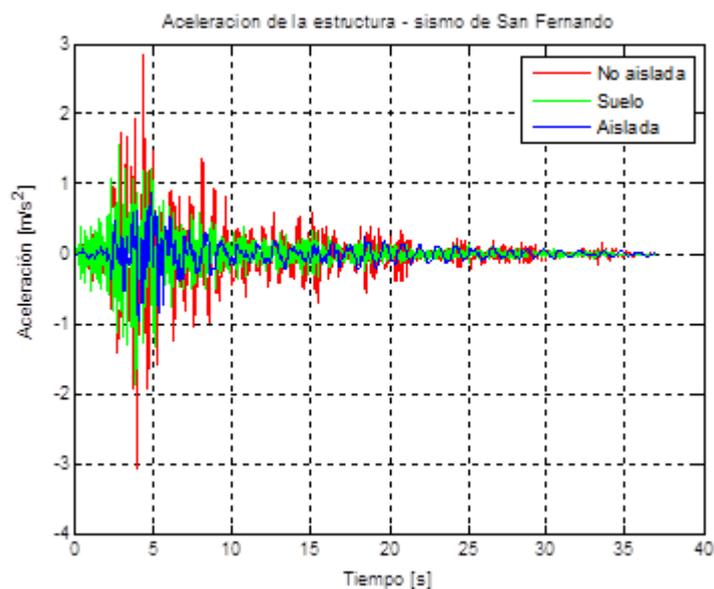


Figura5.5.1.1.5 Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período corto con base aislada y sin base aislada durante el sismo de San Fernando.

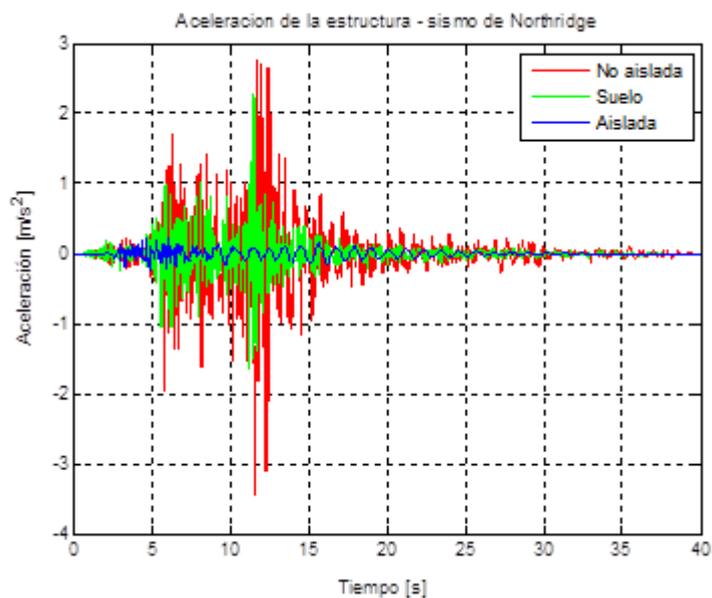


Figura5.5.1.1.6. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período corto con base aislada y sin base aislada durante el sismo de Northridge.

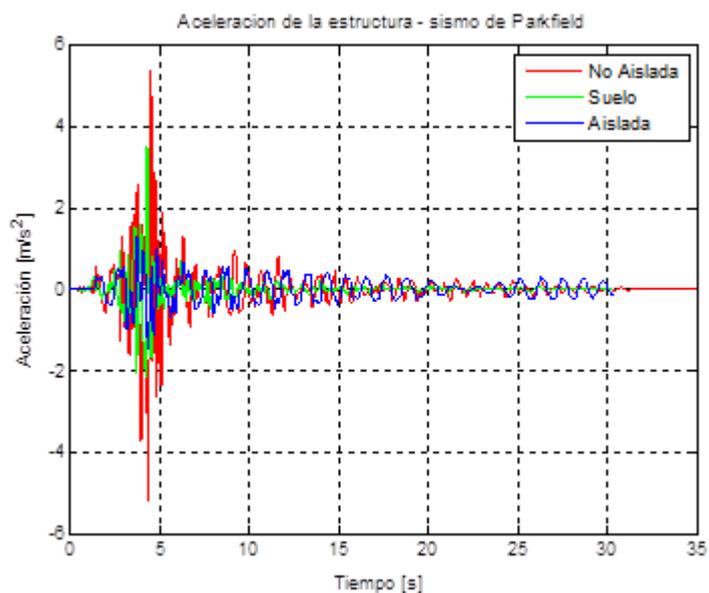


Figura5.5.1.1.7. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período corto con base aislada y sin base aislada durante el sismo de Parkfield.

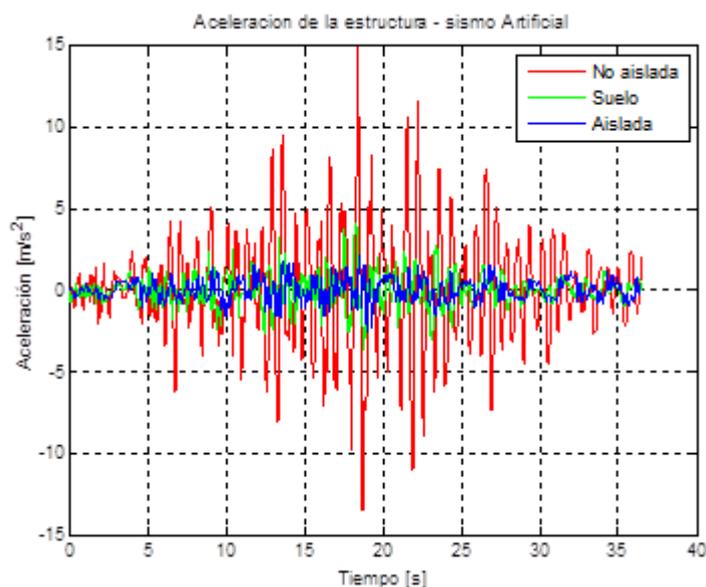


Figura5.5.1.1.8. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período corto con base aislada y sin base aislada durante el sismo Artificial.

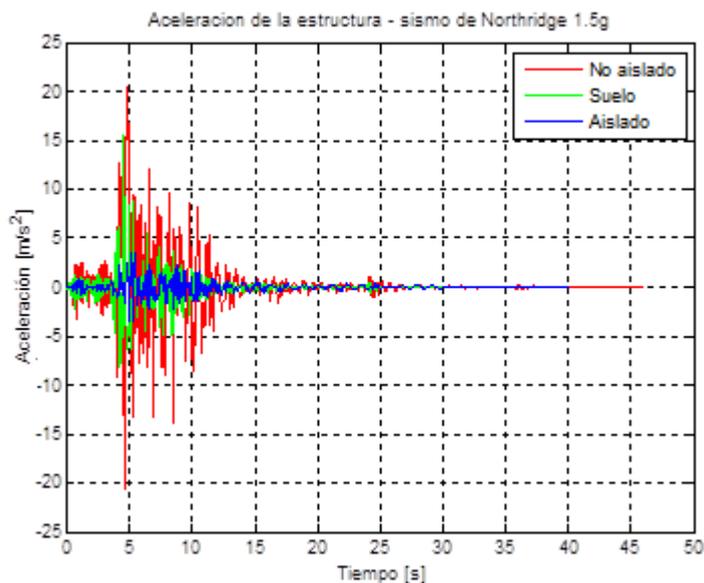


Figura5.5.1.1.9. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período corto con base aislada y sin base aislada durante el sismo de Northridge 1.5g .

Como se ha podido observar en todos los gráficos indicados anteriormente, la aceleración en cada uno de los eventos sísmicos tiene un decremento en su amplitud y un aumento en el período de la señal en cuanto a la estructura aislada. Este decremento de la amplitud de la señal de aceleración es incluso inferior a la aceleración del suelo, es decir,

existe un verdadero aislamiento entre el suelo y la estructura. Gracias a estos resultados se puede verificar lo mencionado en capítulos anteriores al decir que, en un sistema de aislamiento de base, la aceleración de la edificación será menor a la aceleración del suelo. Este comportamiento de la estructura aislada va en concordancia con el espectro de diseño de aceleraciones NEC 11, en el cual nos anticipa que para períodos altos, la amplitud del espectro de diseño disminuye exponencialmente conforme el período aumenta. De la misma manera, los espectros de Fourier indicados en secciones anteriores nos anticipan que la estructura aislada no tendrá un efecto amplificador considerable en ninguno de los eventos sísmicos escogidos, debido a que se encuentra apartada de la zona de amplificación por resonancia.

Es importante resaltar que la aceleración tomada por la estructura sin aislar tiene amplitudes mayores a la aceleración del suelo, esto ocurre debido a la amplificación de la señal, la cual está en función del período fundamental del edificio. Este tipo de comportamiento se lo puede ver claramente reflejado en el espectro de diseño de la NEC 11, en donde, en sitios donde el riesgo sísmico espera aceleraciones de máximo 0.4 veces la aceleración de la gravedad, los picos de los espectros de diseño superan este valor debido al período de la estructura básicamente. Sin embargo, existe un caso muy particular en el sismo de Georgia, ya que la aceleración del suelo es mayor a la aceleración de la estructura no aislada. Este tipo de comportamiento se lo puede asociar con el bajo contenido energético del sismo, lo cual se puede verificar en su espectro de Fourier, además, el contenido frecuencial de la señal tiene sus amplitudes máximas en una zona muy alejada de la frecuencia de la edificación. En la tabla a Continuación se describe las aceleraciones máximas de cada evento sísmico para la estructura aislada y no aislada de período corto. Se puede verificar que el rendimiento de los aisladores de base oscila entre el 60% y 90% en cuanto a la reducción de la amplitud de la aceleración máxima de la

estructura. En la Figura 5.5.1.1.10 se puede visualizar la comparación en un gráfico de barras de las aceleraciones máximas obtenidas del análisis de aceleraciones de la estructura de período corto. En este gráfico se puede apreciar claramente el efecto de la resonancia que existe en el sismo artificial sobre la estructura no aislada de período corto, ya que, la amplificación de la aceleración máxima en este evento es del 264% en comparación a la aceleración máxima del suelo.

Nombre del sismo	Aceleración máxima de la Estructura no Aislada	Aceleración máxima de la Estructura Aislada	Aceleración máxima del Suelo	Porcentaje de disminución en aceleración de la estructura aislada	Amplificación de aceleración de estructura no aislada
Georgia	0,02	0,01	0,04	72,83%	-54,79%
Imperial	0,36	0,14	0,17	60,28%	112,89%
Irpinia	0,35	0,09	0,20	73,71%	73,63%
Whittier N.	0,35	0,11	0,20	68,91%	71,02%
San Fernando	0,31	0,10	0,19	68,70%	62,66%
Northridge	0,35	0,02	0,23	92,93%	49,98%
Parkfield	0,54	0,15	0,36	71,89%	52,27%
Artificial	1,52	0,26	0,42	82,89%	264,75%
Northridge 1.5g	2,11	0,36	1,58	82,95%	33,77%

Tabla 5.5.1.1.1 Tabla de resumen de aceleraciones máximas de la estructura de período corto aislada y no aislada. Los valores de la aceleración están en función de G.

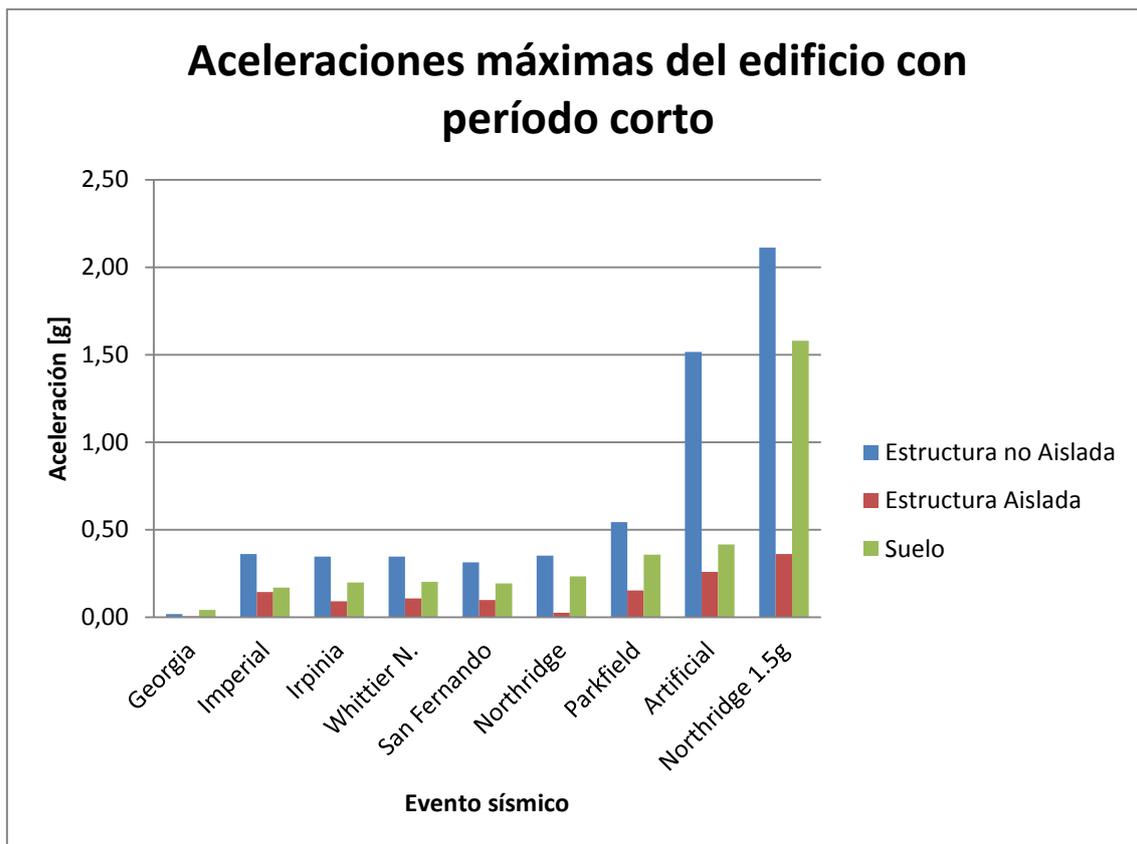


Figura 5.5.1.1.10. Gráfico comparativo de las aceleraciones máximas de la estructura de período corto aislada y no aislada.

5.5.1.2. Aceleraciones de la estructura de período largo

De igual manera como se procedió a mostrar los resultados de la estructura de período corto en cuanto aceleraciones absolutas del último piso, se indica en la presente sección la respuesta dinámica de la estructura de período largo de cada uno de los registros sísmicos presentados en este documento como sismos de diseño.

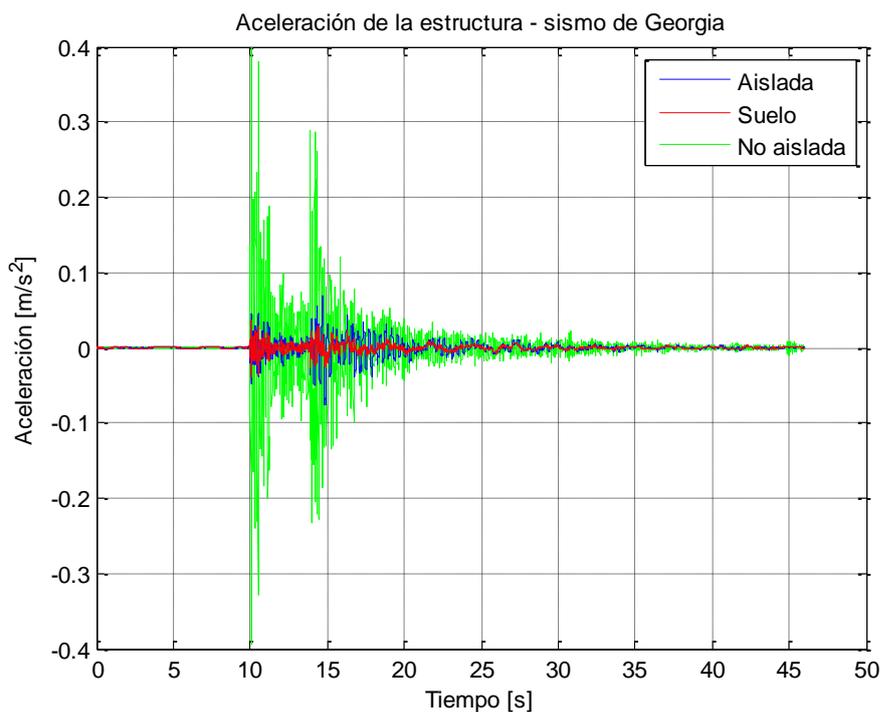


Figura5.5.1.2.1. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período largo con base aislada y sin base aislada durante el sismo de Georgia.

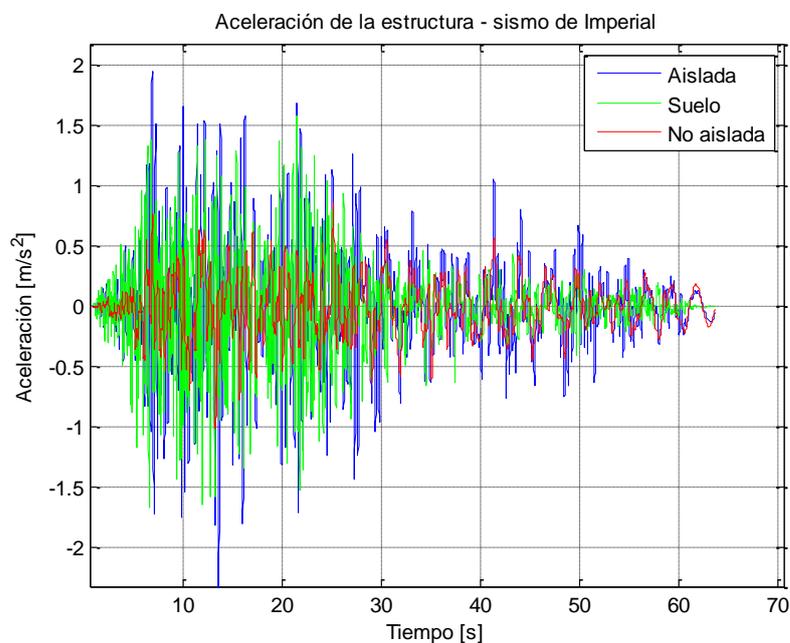


Figura5.5.1.2.2. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período largo con base aislada y sin base aislada durante el sismo de Imperial.

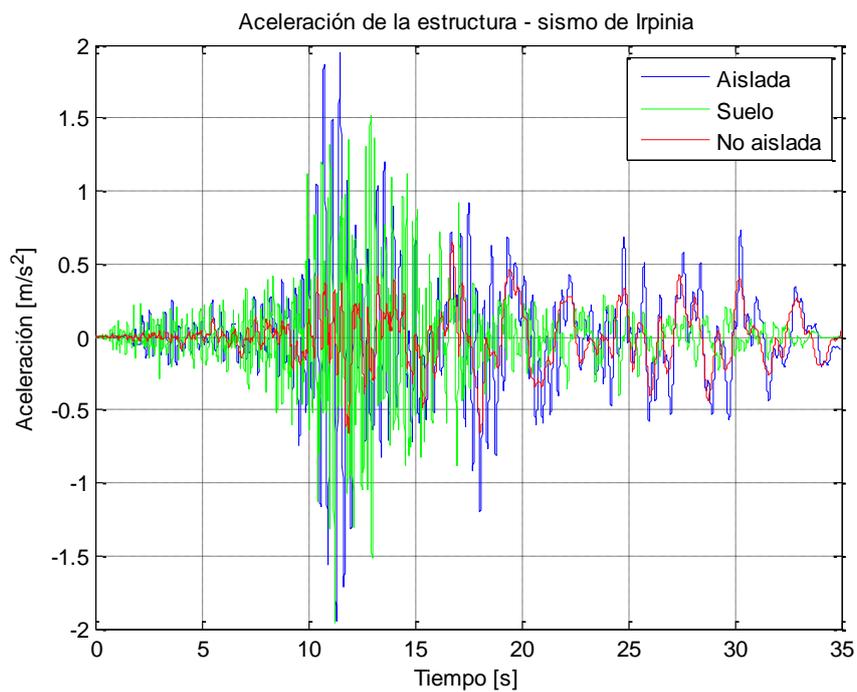


Figura5.5.1.2.3. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período largo con base aislada y sin base aislada durante el sismo de Irpinia.

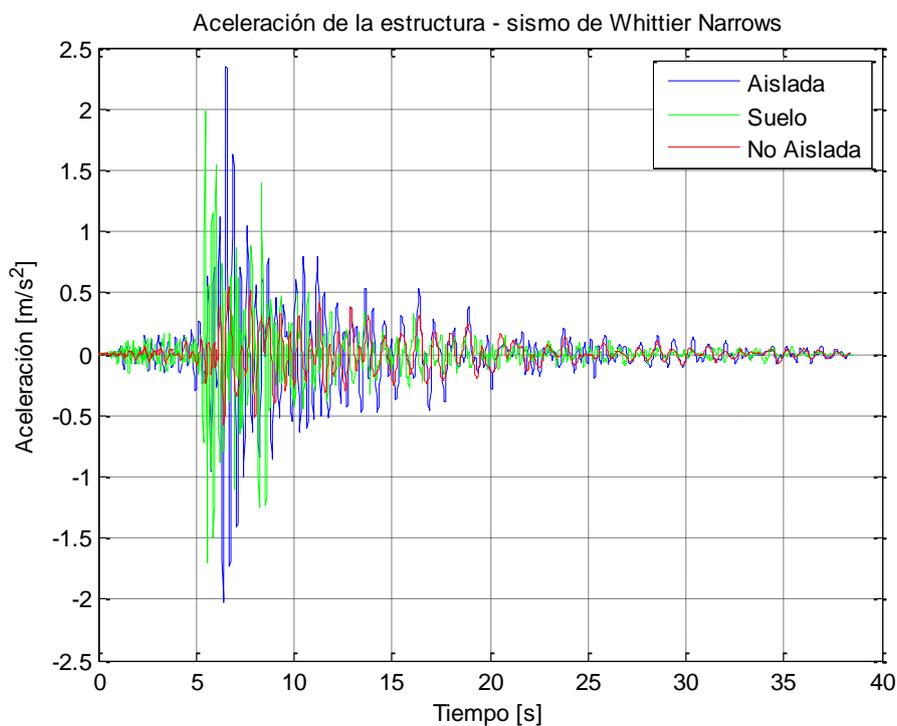


Figura5.5.1.2.4. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período largo con base aislada y sin base aislada durante el sismo de Whittier Narrows

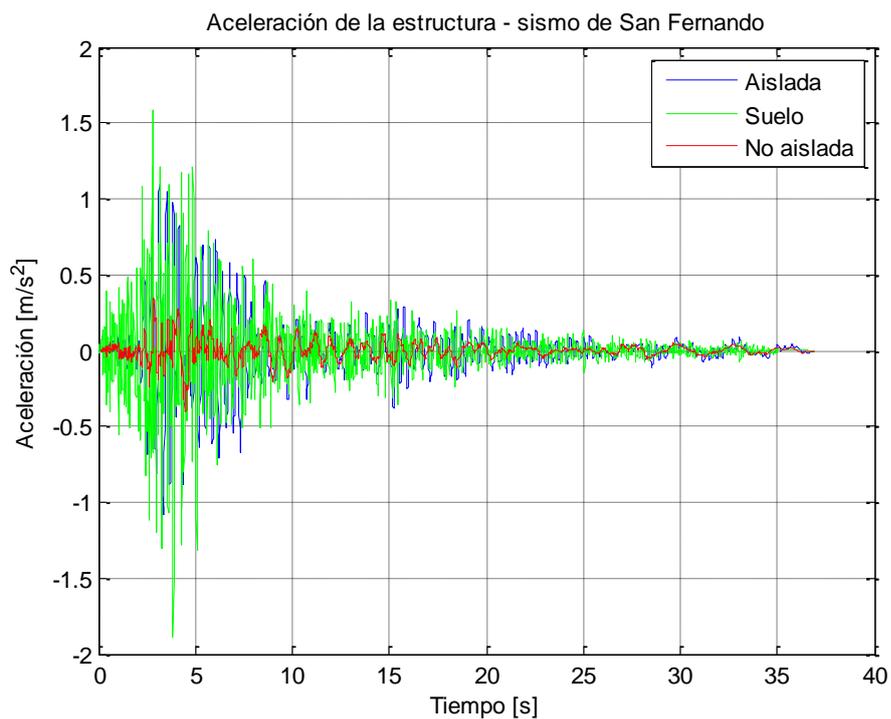


Figura5.5.1.2.5. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período largo con base aislada y sin base aislada durante el sismo de San Fernando

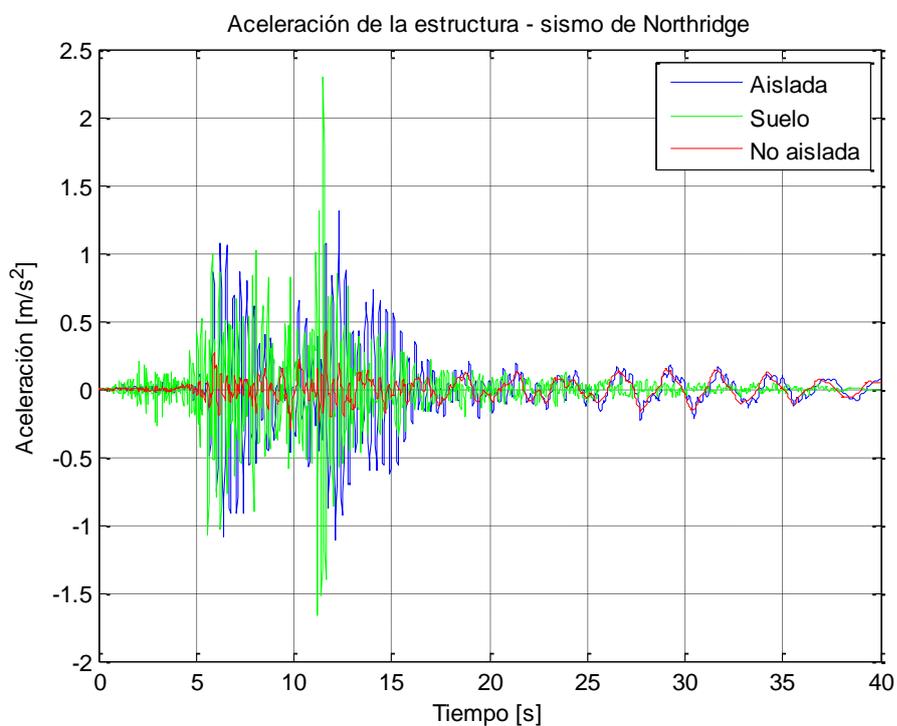


Figura5.5.1.2.6. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período largo con base aislada y sin base aislada durante el sismo de Northridge.

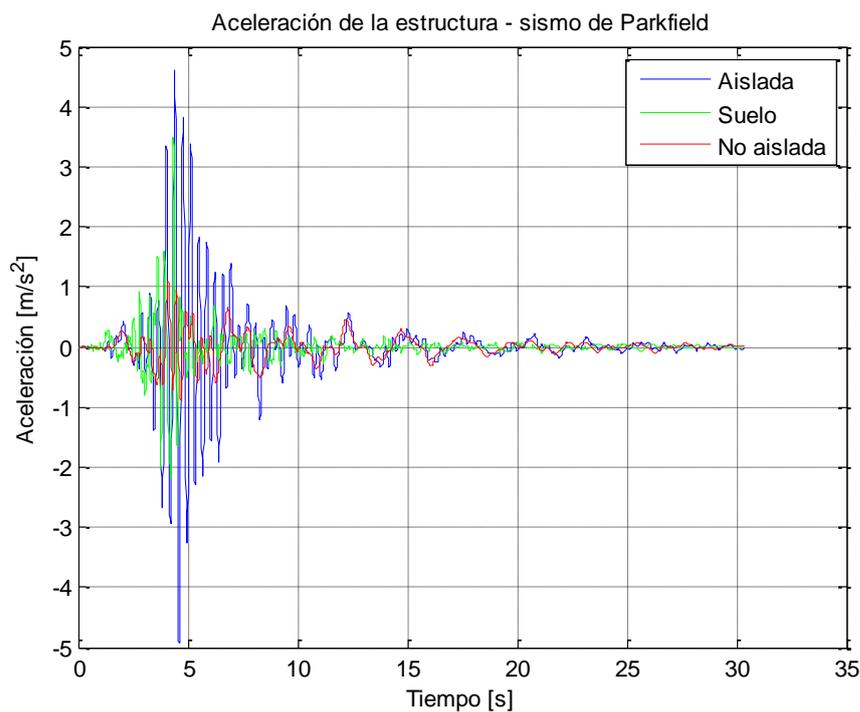


Figura5.5.1.2.7. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período largo con base aislada y sin base aislada durante el sismo de Parkfield.

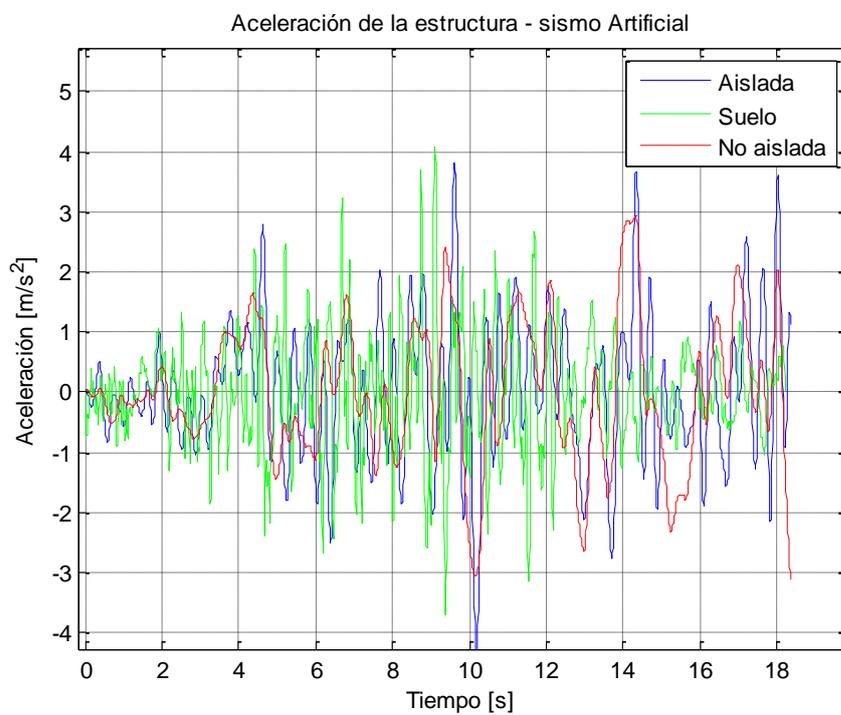


Figura5.5.1.2.8. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período largo con base aislada y sin base aislada durante el sismo Artificial.

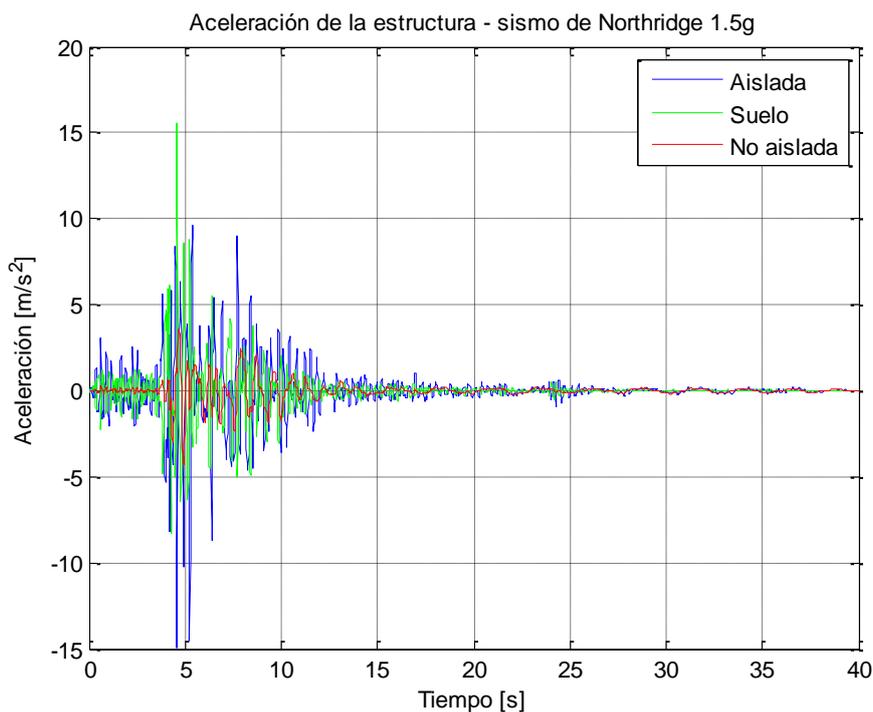


Figura 5.5.1.2.9. Gráfico comparativo de las aceleraciones de la estructura de período largo con base aislada y sin base aislada durante el sismo de Northridge 1.5g.

Como se ha podido observar, el comportamiento en cuanto a la respuesta en aceleraciones de la estructura de período largo indica un resultado distinto a la estructura de período corto en cuanto a la amplitud de la señal del sismo. En este caso, la estructura aislada amplificó la magnitud de la aceleración en comparación a la estructura no aislada en algunos registros. En la tabla 5.5.1.2.1 se puede verificar los valores numéricos de los picos de aceleración tanto de la estructura aislada como no aislada de período largo. La tabla nos indica los porcentajes de variación de la aceleración tanto de la estructura aislada como la de la estructura no aislada en relación con la aceleración máxima del suelo. De la misma tabla se puede apreciar que, en todos los casos la estructura aislada tiene valores picos de aceleración mayores a los de la estructura no aislada. Por otro lado, comparando las aceleraciones del suelo con las aceleración de las estructura aislada y no aislada, se

puede notar como la estructura no aislada tiene valores menores a la aceleración pico del suelo, por otro lado, la estructura aislada tiene valores mayores y menores dependiendo del registro sísmico. En el gráfico 5.5.1.2.10 se indica un diagrama de barras que indica las aceleraciones máximas del edificio de período largo aislado, no aislado y la aceleración del suelo. Dado este comportamiento de la edificación de período largo con aisladores de base en cuanto a la aceleración adoptada por el edificio, además de otros factores que se verán más adelante, no se recomienda el uso de este tipo de dispositivos sismo-resistentes en edificaciones de períodos largos.

Nombre de sismo	Aceleración máxima de la Estructura no Aislada[g]	Aceleración máxima de la Estructura Aislada[g]	Aceleración máxima del Suelo	Variación de la aceleración de la estructura no aislada	Variación de la aceleración de la estructura aislada
Georgia	0,004	0,008	0,041	-91%	-81%
Imperial	0,103	0,238	0,169	-39%	41%
Irpinia	0,067	0,199	0,199	-66%	0%
Whittier N.	0,059	0,240	0,202	-71%	19%
San Fernando	0,042	0,112	0,192	-78%	-42%
Northridge	0,043	0,134	0,234	-82%	-43%
Parkfield	0,112	0,502	0,357	-69%	41%
Artificial	0,318	0,453	0,416	-24%	9%
Northridge 1.5g	0,436	1,524	1,585	-72%	-4%

Tabla 5.5.2.1. Tabla de aceleraciones máximas de la estructura de período largo variaciones con respecto a la aceleración del suelo.

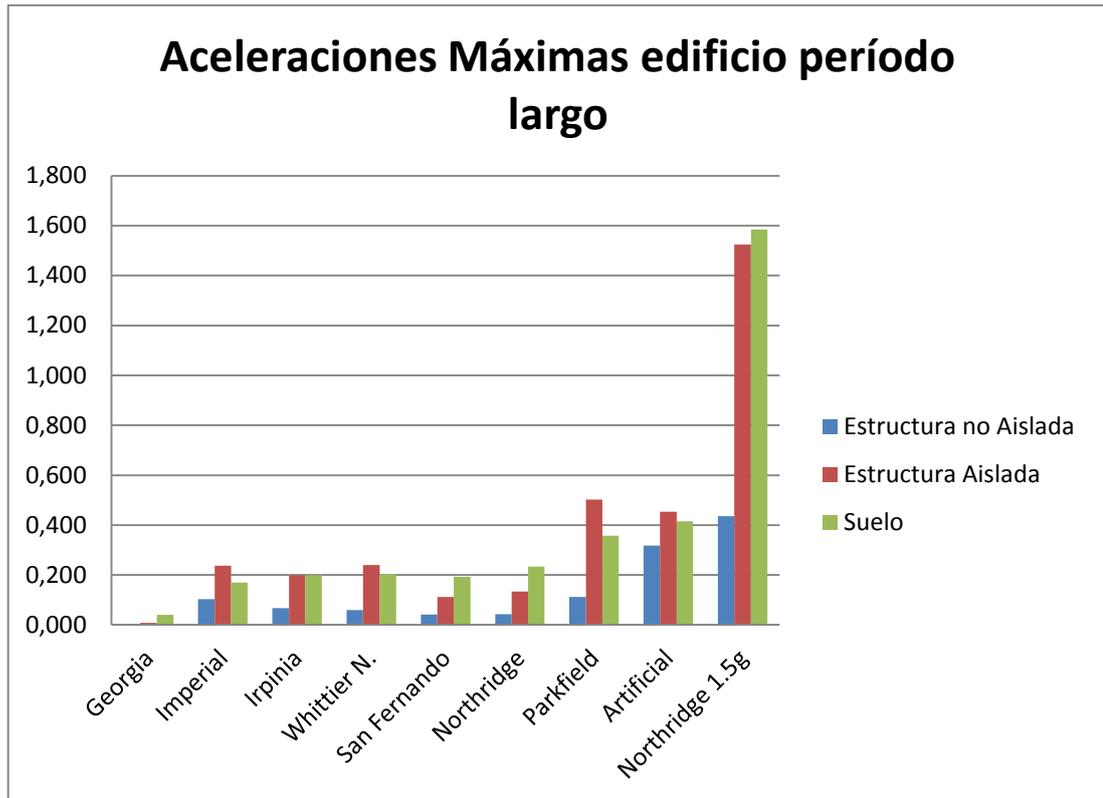


Figura 5.5.1.2.10 Gráfico de barras de la aceleración máxima de la estructura de período largo de cada registro sísmico. Unidades de aceleración en términos de la gravedad [g].

5.6. Análisis de Desplazamientos

Una vez analizada la estructura en cuanto a la aceleración que adopta la misma debido al evento sísmico, el resultado que se expone a continuación es la respuesta del edificio en cuanto a desplazamientos horizontales ocurridos durante los eventos sísmicos que fueron detallados al inicio de este capítulo. De la misma manera que se verificaron las aceleraciones, el análisis de desplazamientos horizontales fue realizado con el programa SAP2000 mediante su herramienta de análisis tiempo historia que nos permite obtener los resultados de desplazamientos de cualquiera de los nudos de la edificación. Los puntos de referencia tomados para la muestra de resultados son los centros de gravedad de la sección en planta de cada uno de los pisos de la edificación, el centro de gravedad de cada piso fue tomado como referencia para minimizar los efectos de la torsión en los desplazamientos horizontales que tienen los nudos exteriores de la estructura. En las siguientes secciones se muestran los resultados en cuanto a desplazamientos horizontales de las edificaciones de período corto y largo indicando cómo se comporta cada piso.

5.6.1. Análisis de desplazamientos de la estructura de período corto

Para el análisis de los desplazamientos de la estructura de período corto y período largo se ha utilizado el análisis tiempo historia que proporciona el programa SAP 2000 con los registros sísmicos que se analizó la aceleración anteriormente. De este análisis se puede verificar la eficiencia de estos dispositivos sismo-resistentes de aislamiento de base en edificaciones de período corto y su ineficiencia en edificios de período largo. Los resultados que se indican a continuación detallan el comportamiento en cuanto a desplazamientos horizontales de cada uno de los pisos de las estructuras con sistema de aislamiento de base y sin sistema de aislamiento de base.

5.6.1.1. Desplazamientos de la estructura de período corto aislada

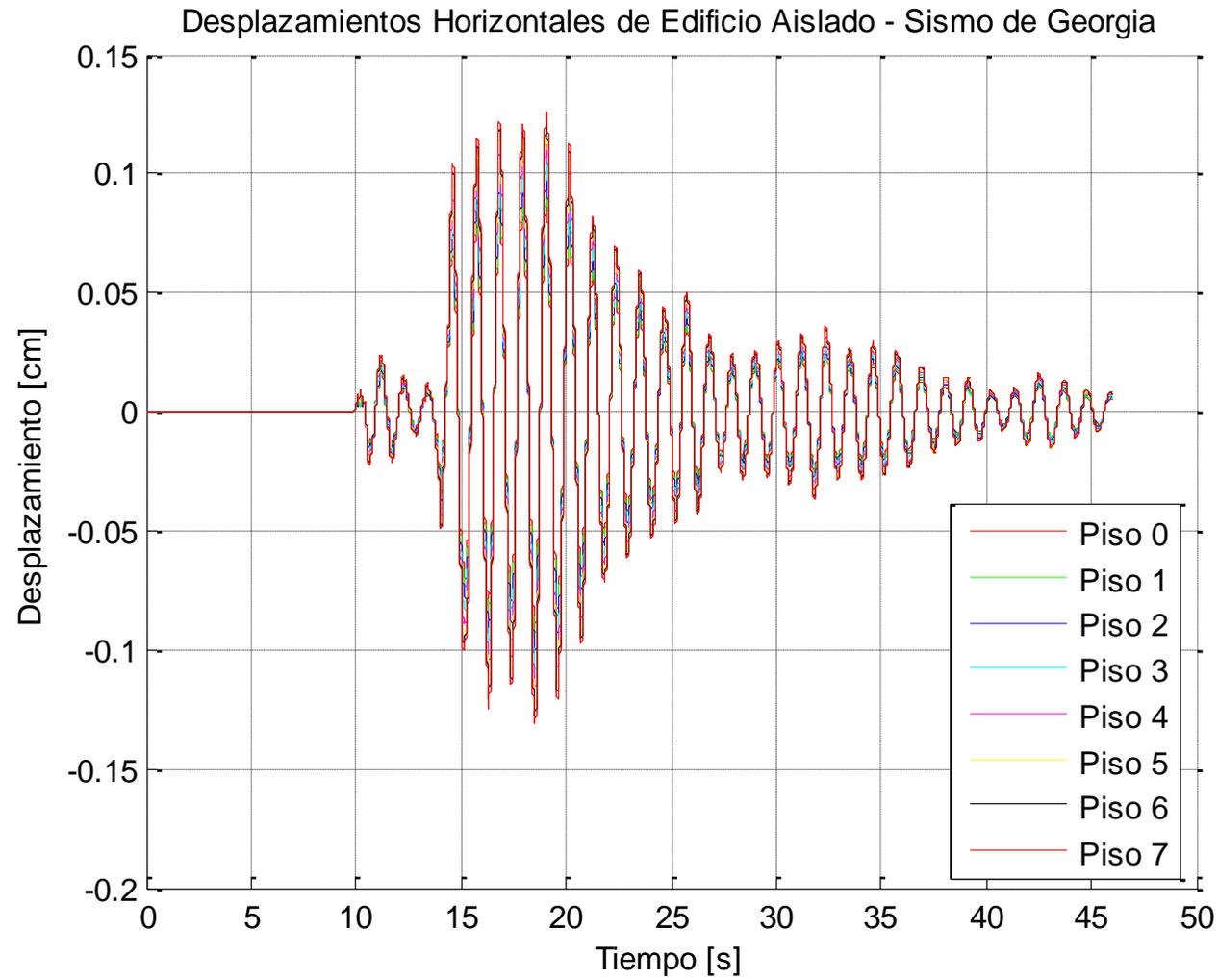


Figura5.6.1.1.1. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período corto durante el sismo de Georgia.

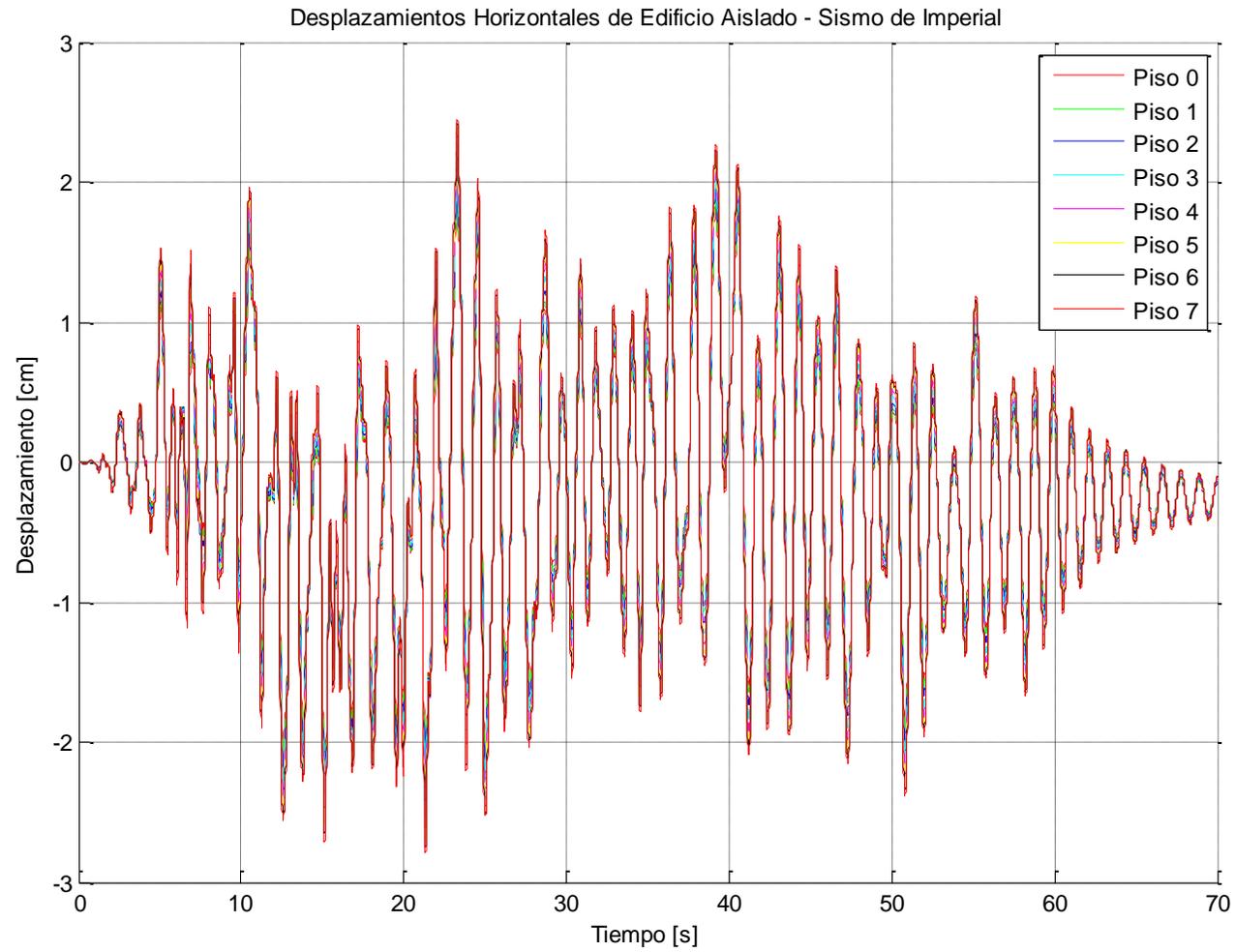


Figura 5.6.1.1.2. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período corto durante el sismo de Imperial.

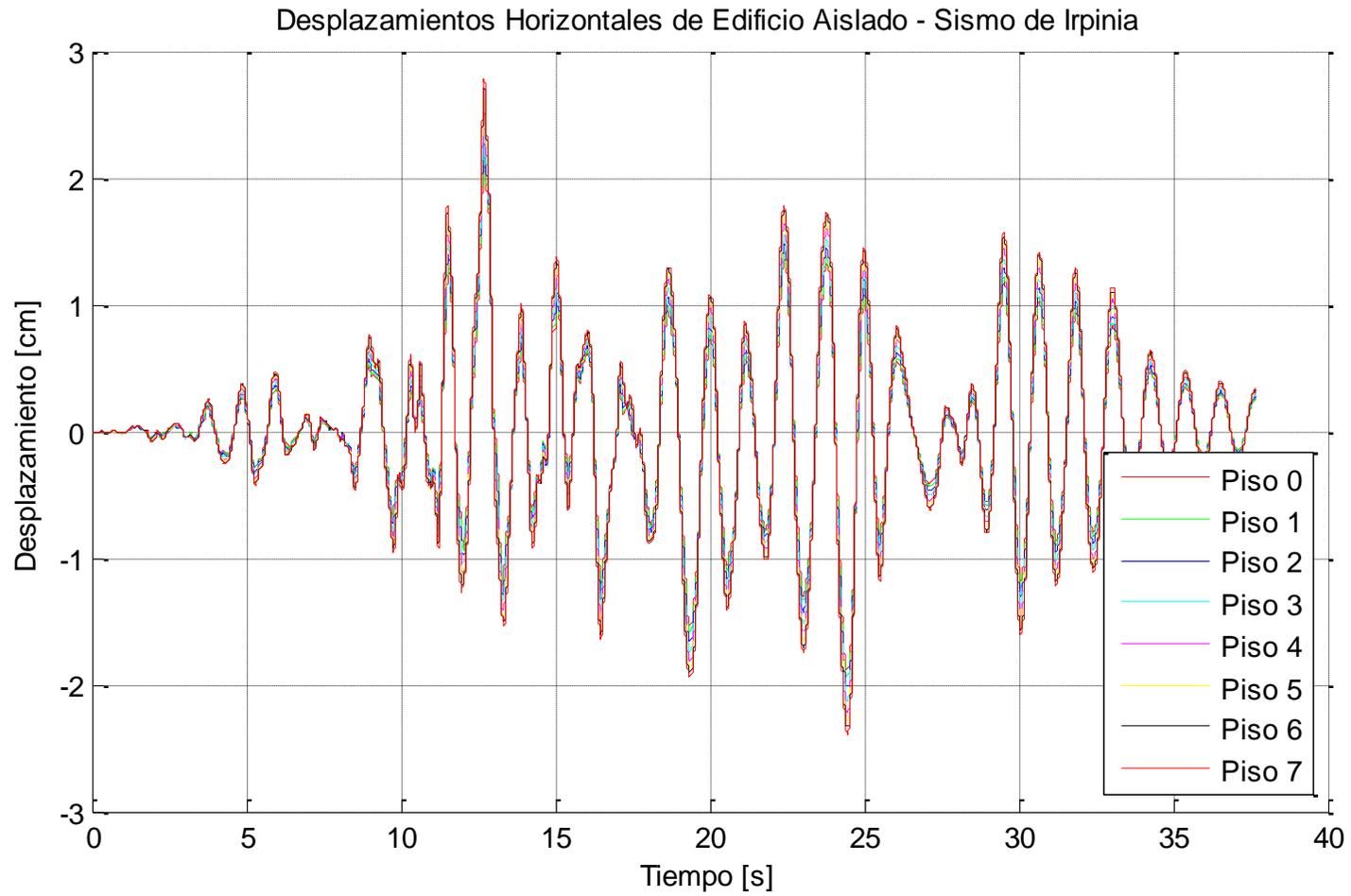


Figura5.6.1.1.3. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período corto durante el sismo de Irpinia.

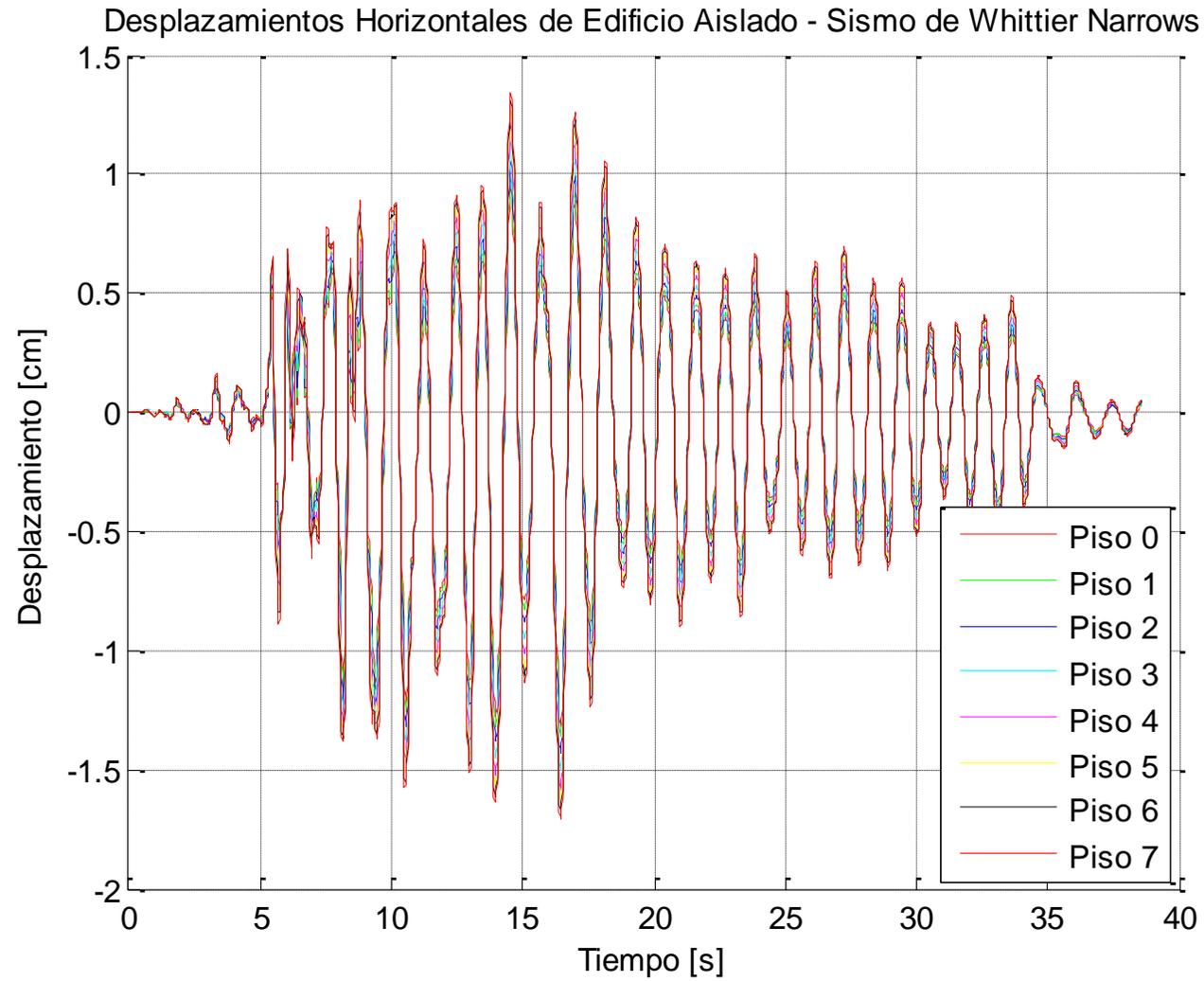


Figura5.6.1.1.4. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período corto durante el sismo de Whittier Narrows.

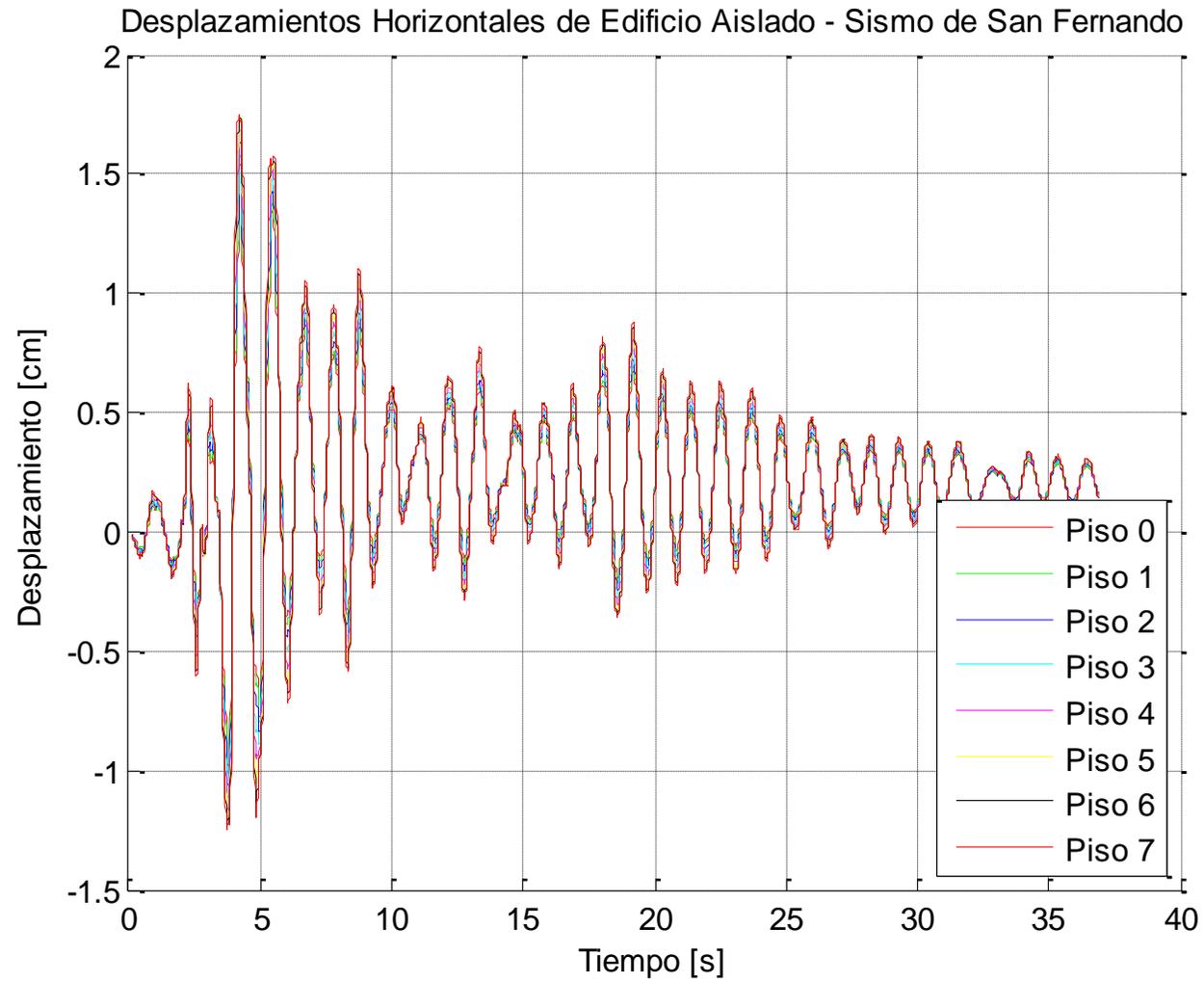


Figura5.6.1.1.5. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período corto durante el sismo de San Fernando.

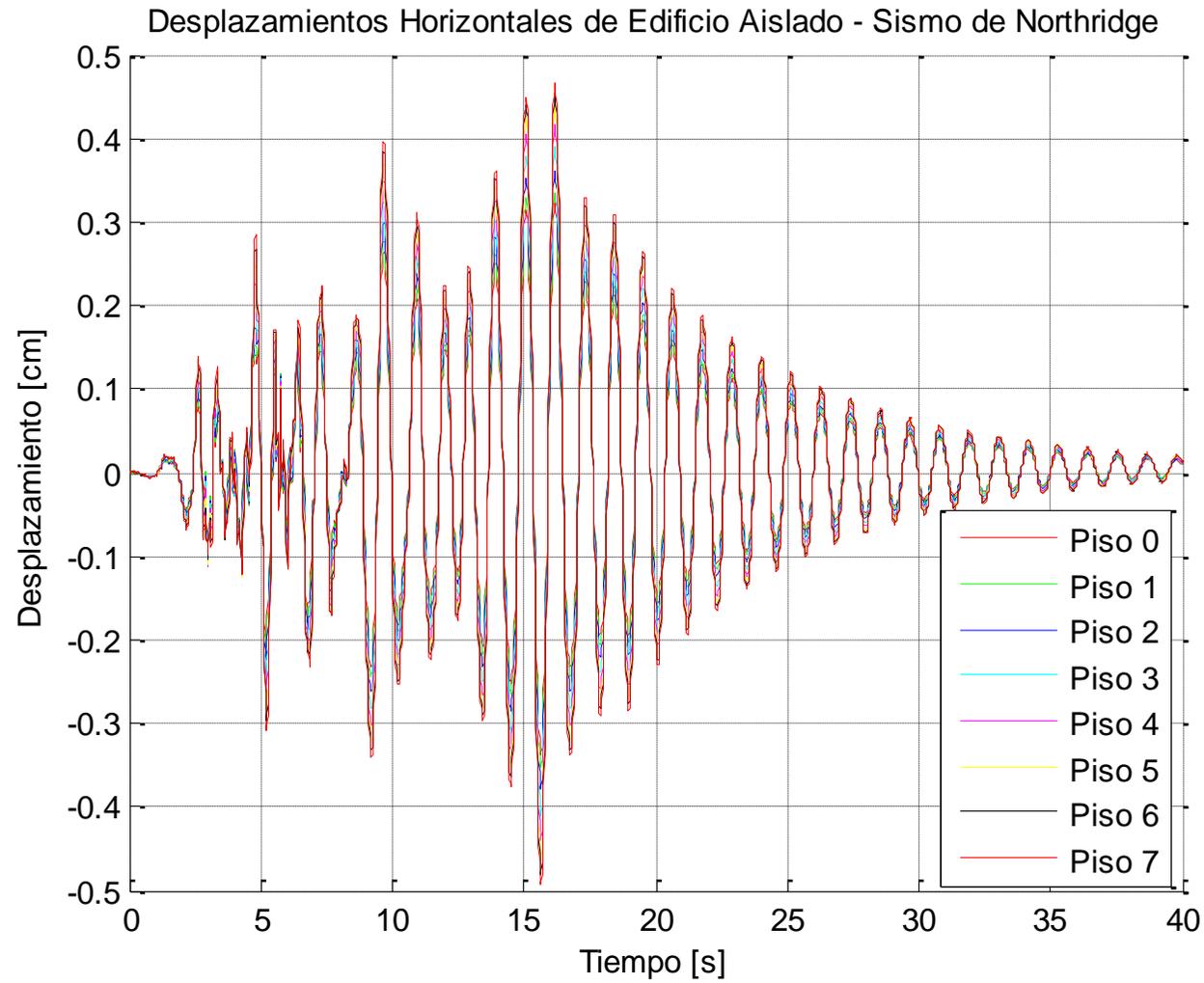


Figura 5.6.1.1.6. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período corto durante el sismo de Northridge.

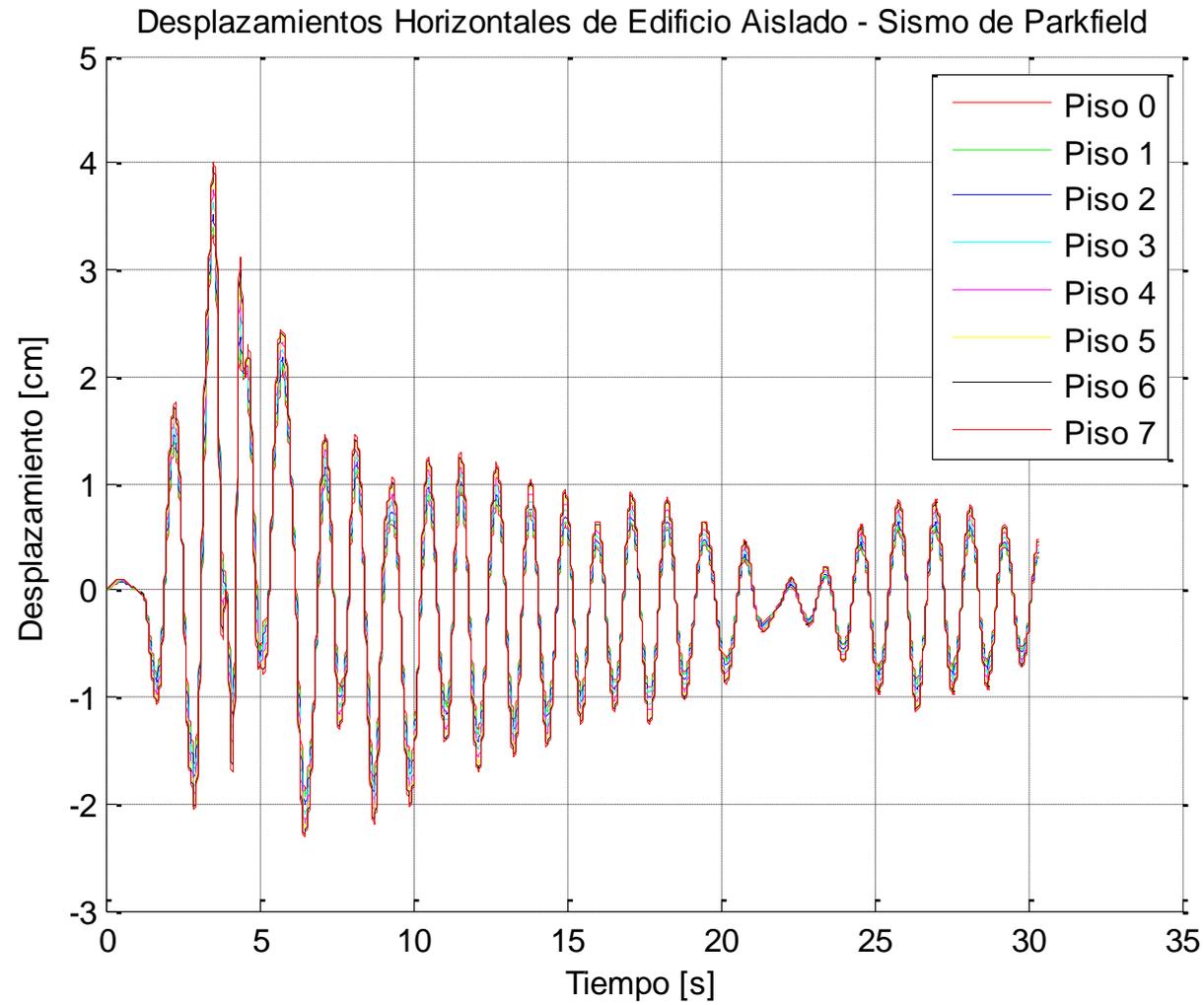


Figura5.6.1.1.7. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período corto durante el sismo de Parkfield.

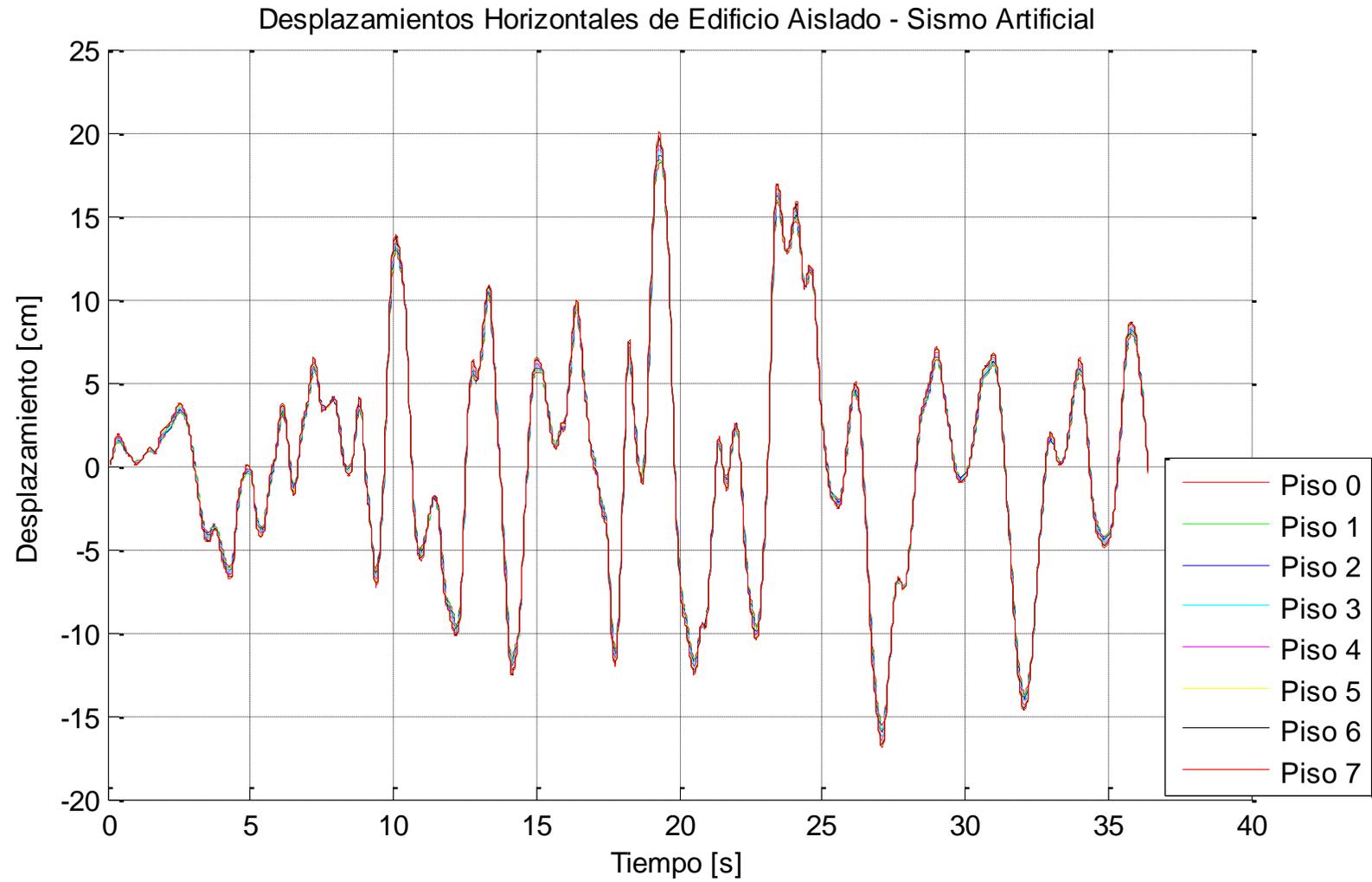


Figura 5.6.1.1.8. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período corto durante el sismo Artificial.

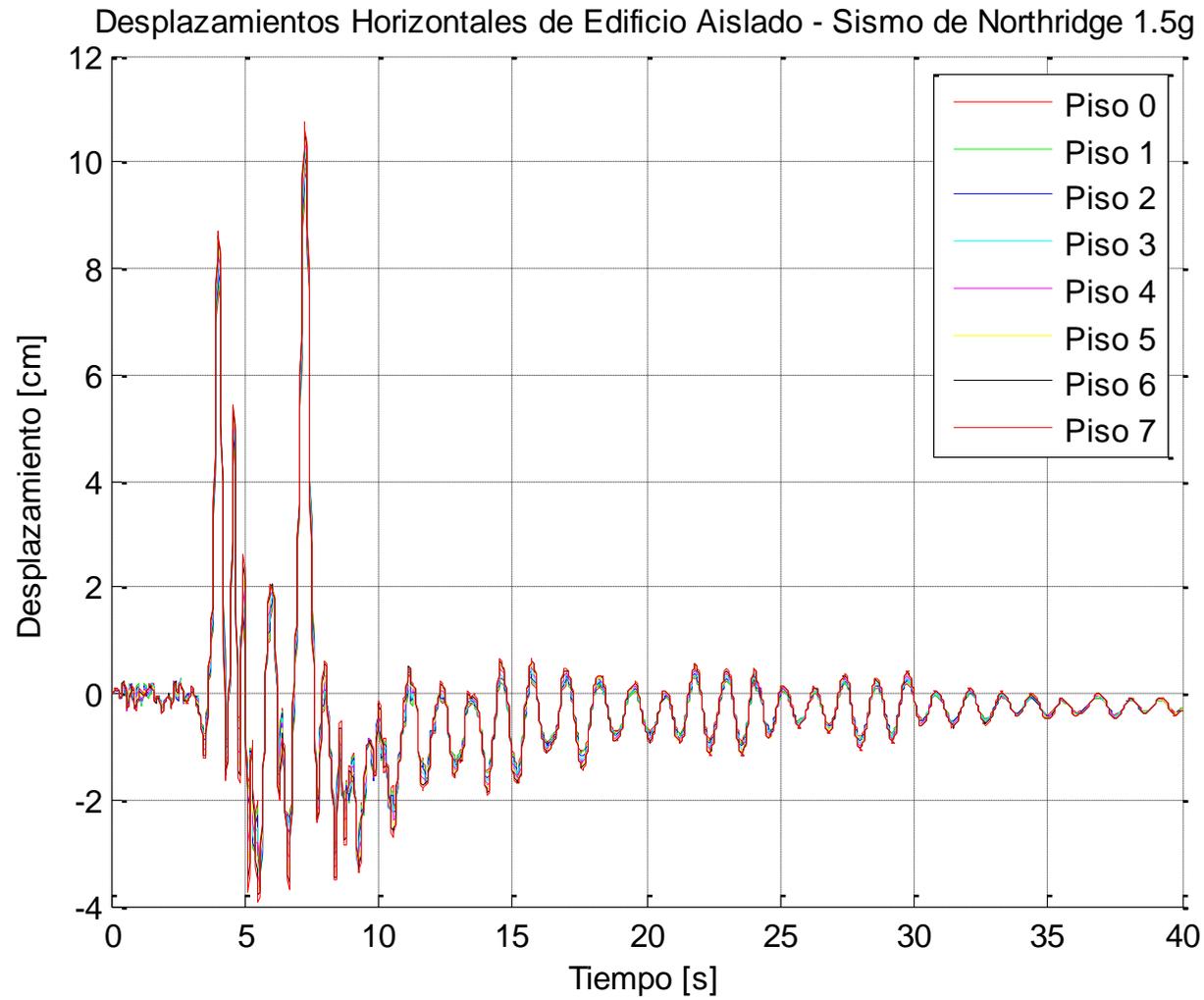


Figura 5.6.1.1.9. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período corto durante el sismo de Northridge 1.5g.

5.6.1.2. Desplazamientos de la estructura no aislada de período corto

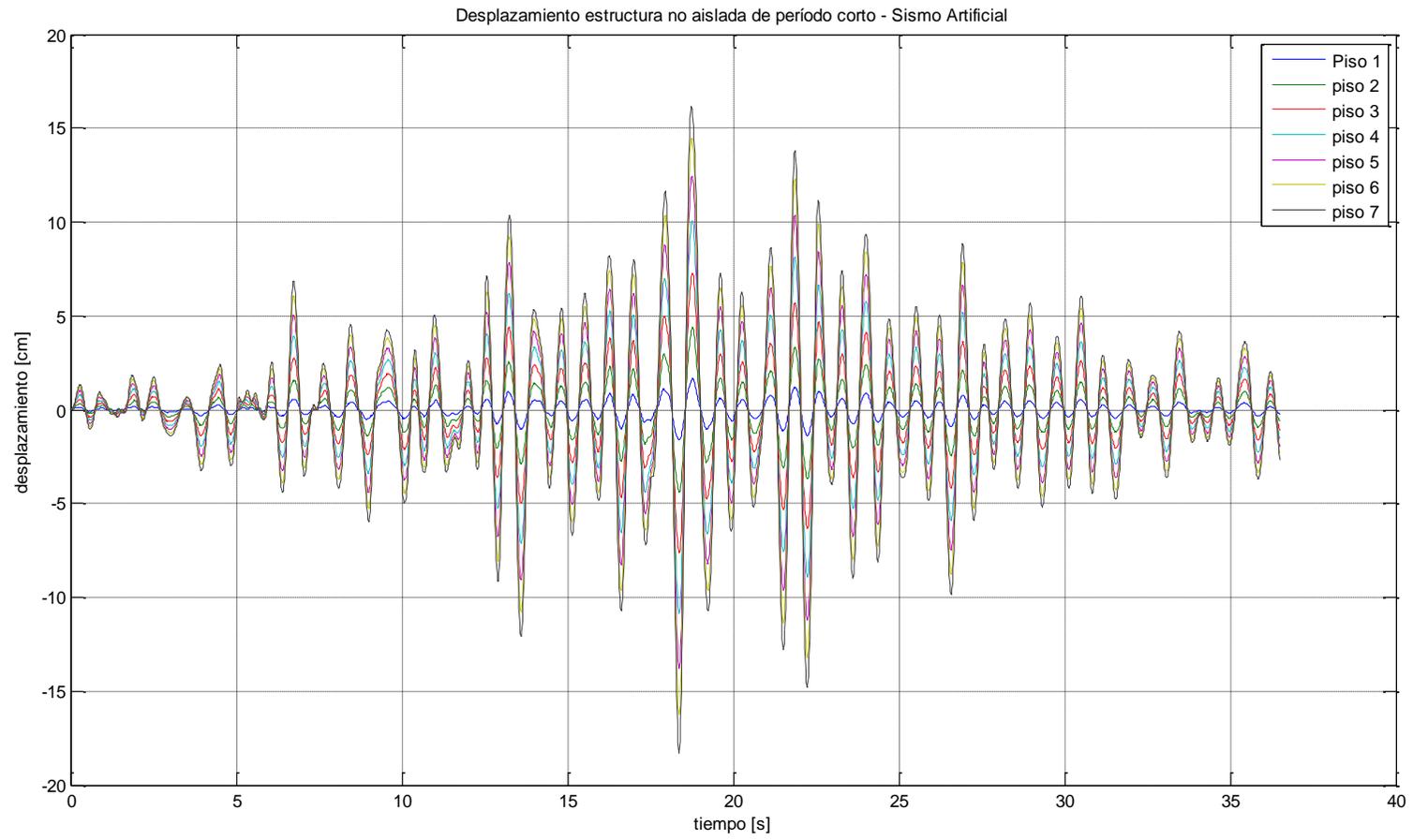


Figura 5.6.1.2.8 Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período corto durante el sismo Artificial.

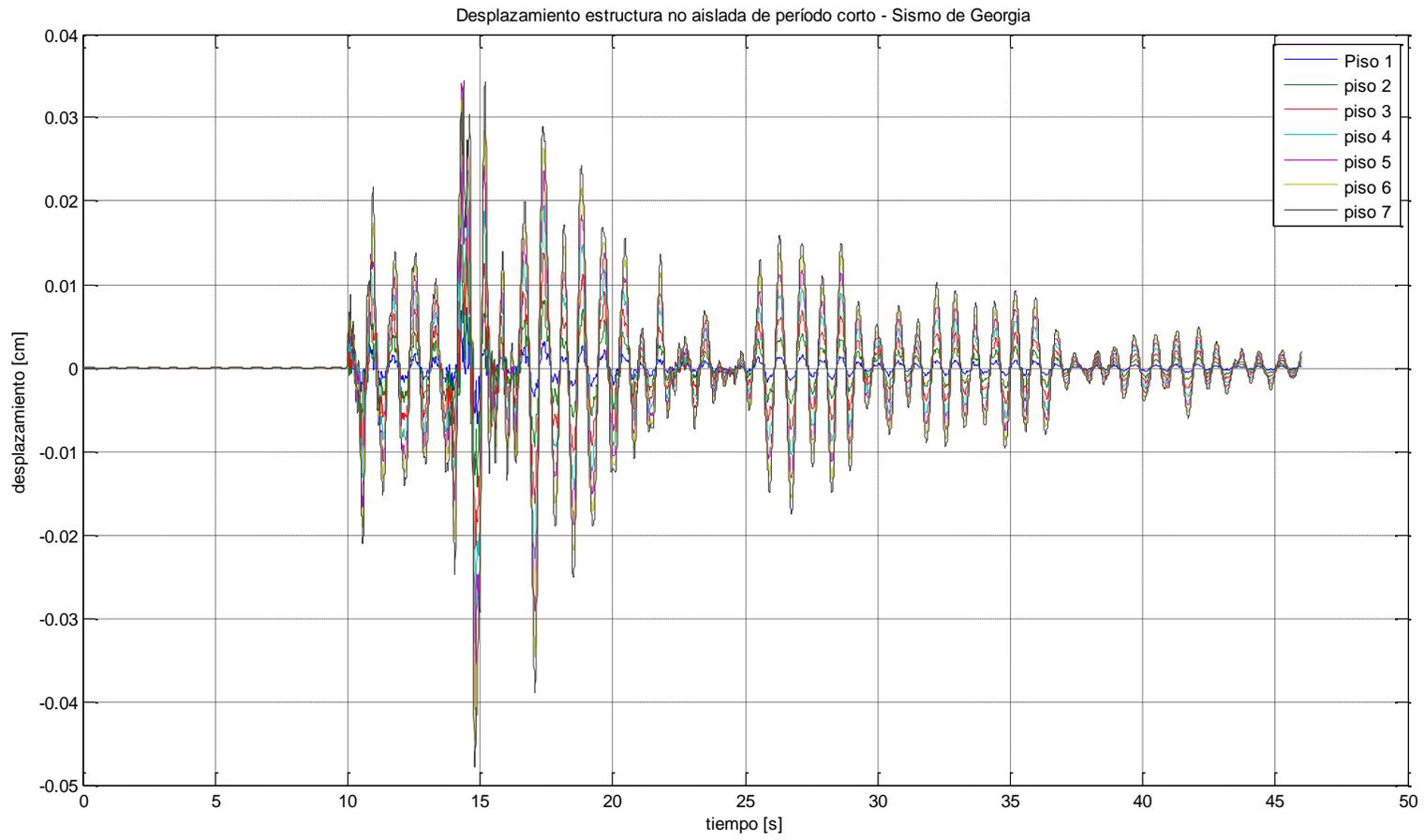


Figura5.6.1.2.1. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período corto durante el sismo de Georgia.

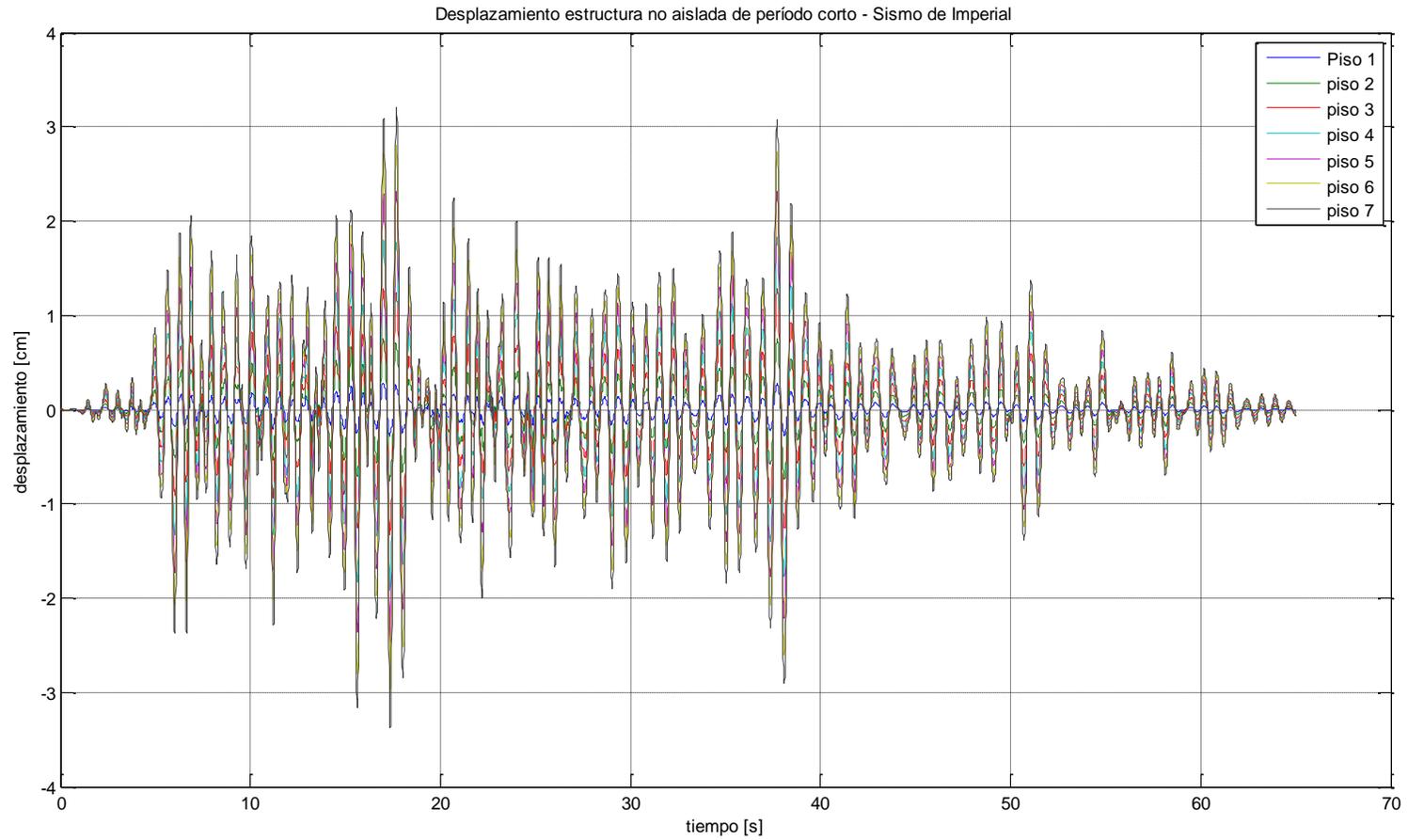


Figura5.6.1.2.2. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período corto durante el sismo de Imperial.

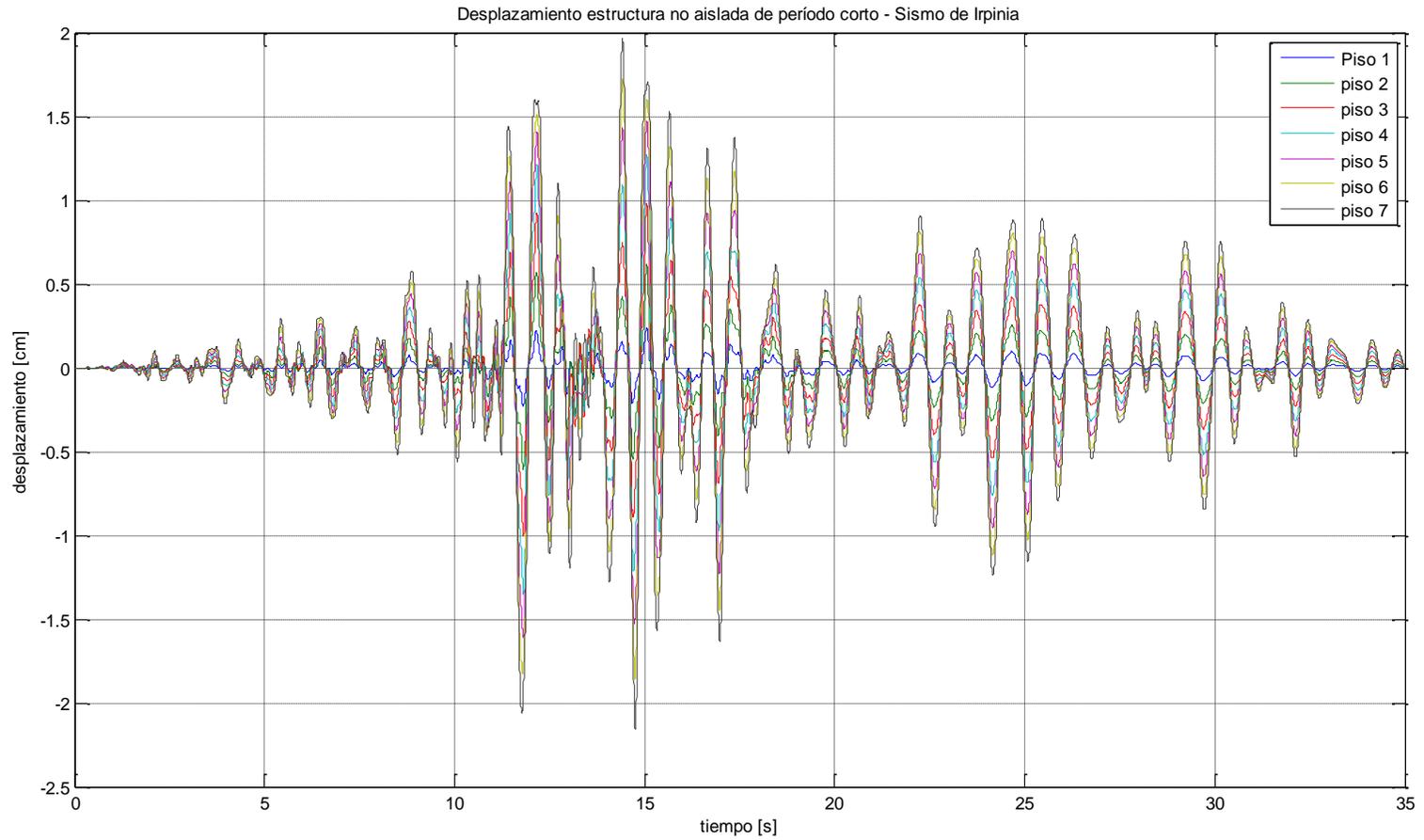


Figura 5.6.1.2.3. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período corto durante el sismo de Irpinia

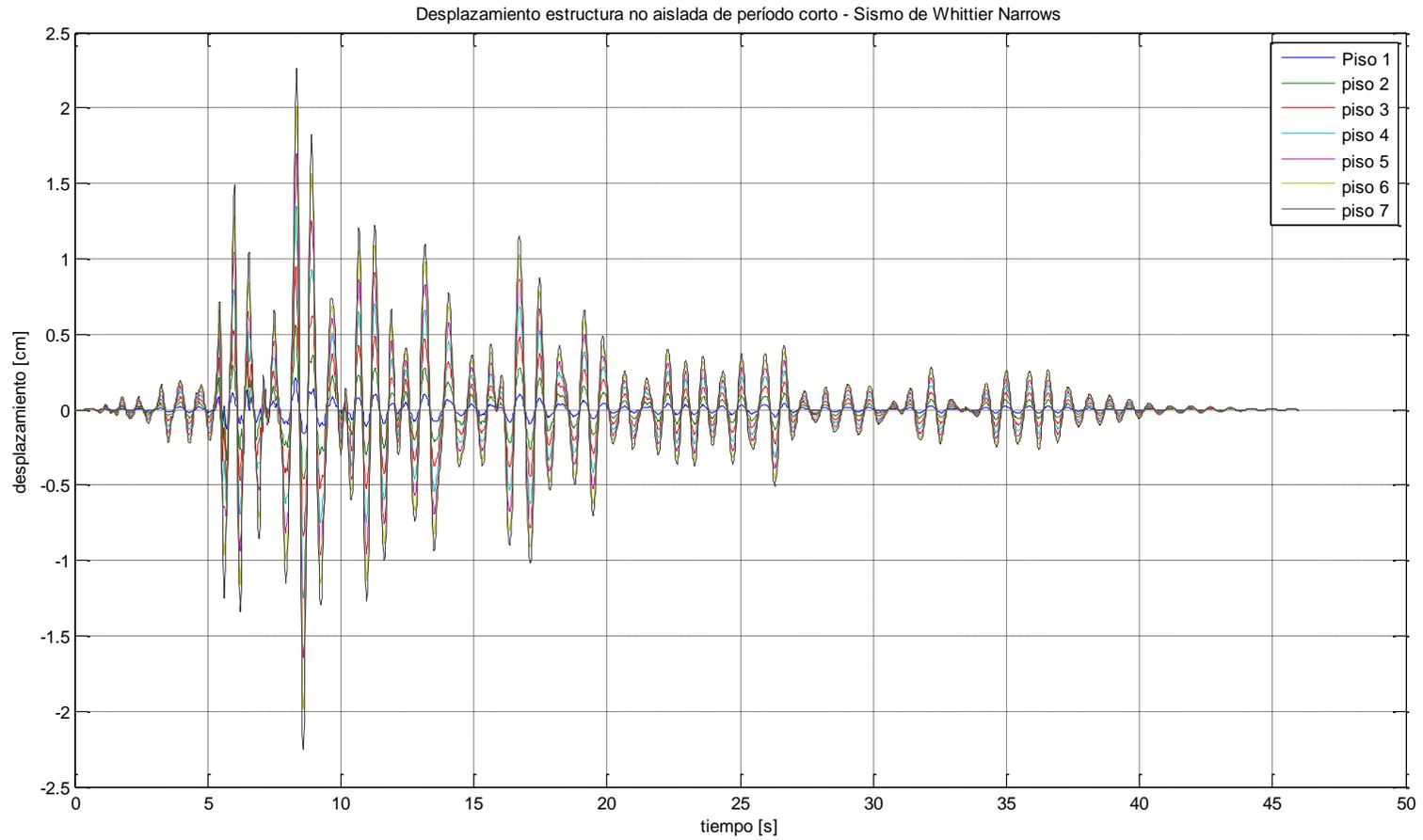


Figura5.6.1.2.4. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período corto durante el sismo de Whittier Narrows

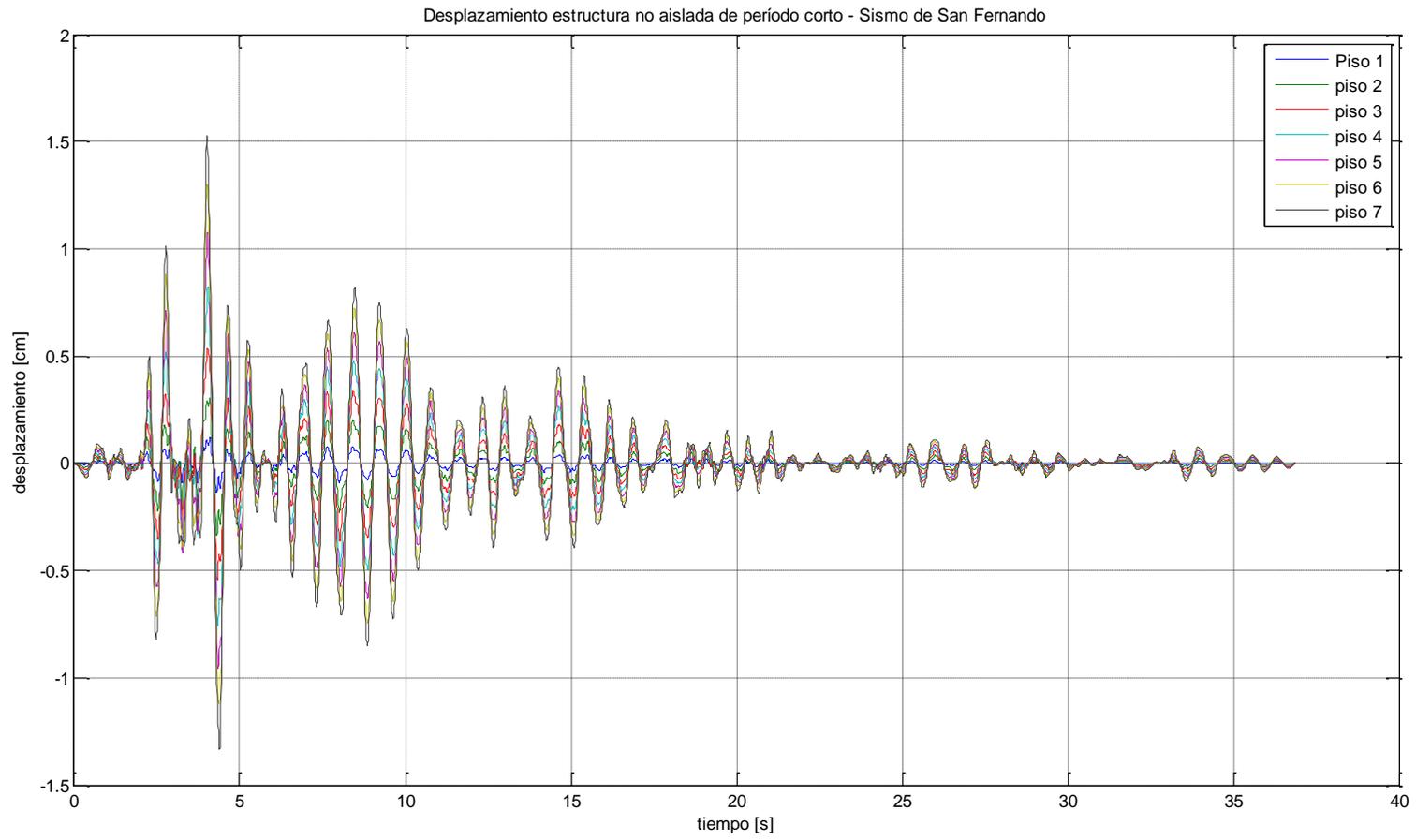


Figura5.6.1.2.5. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período corto durante el sismo de San Fernando

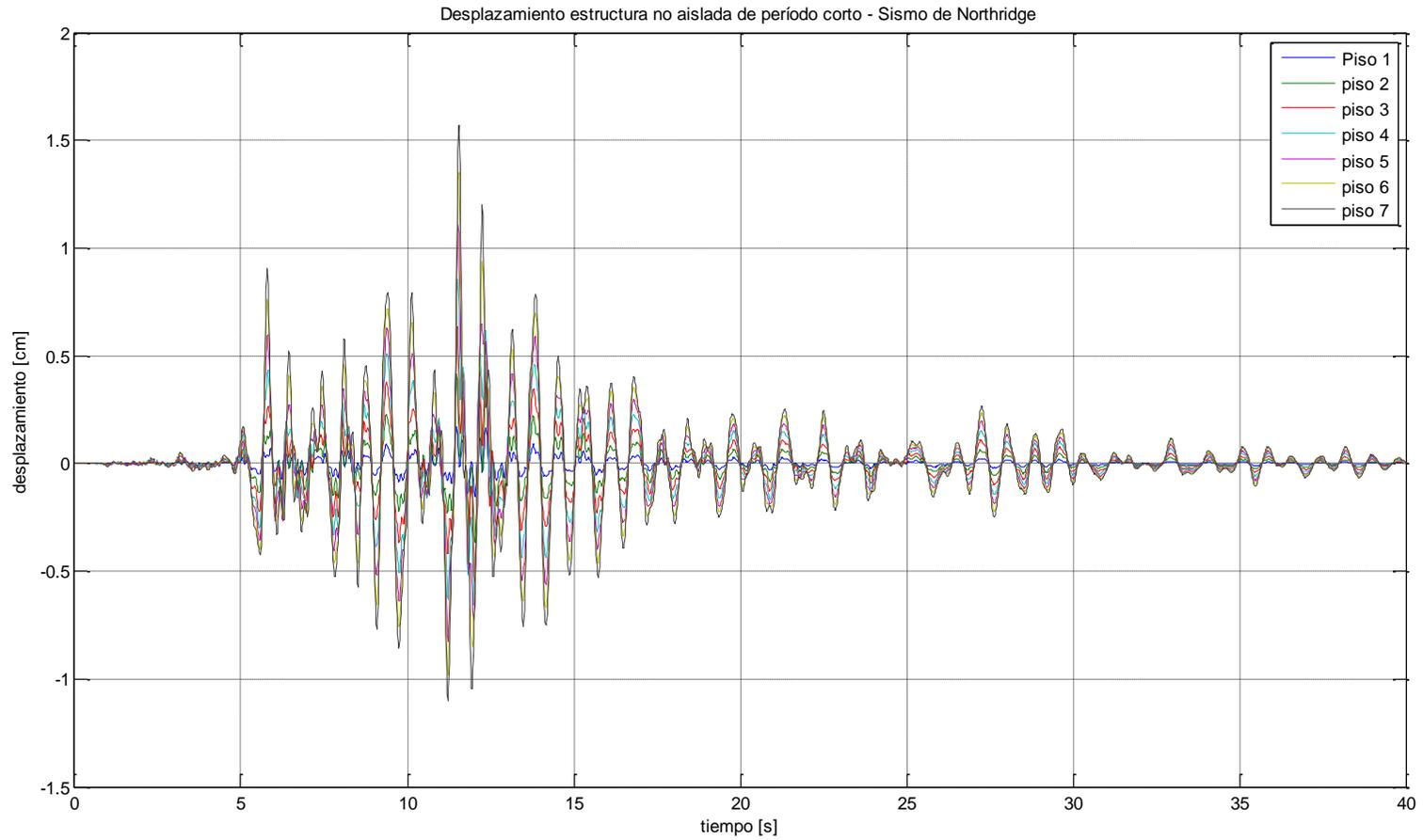


Figura5.6.1.2.6.. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período corto durante el sismo de Northridge

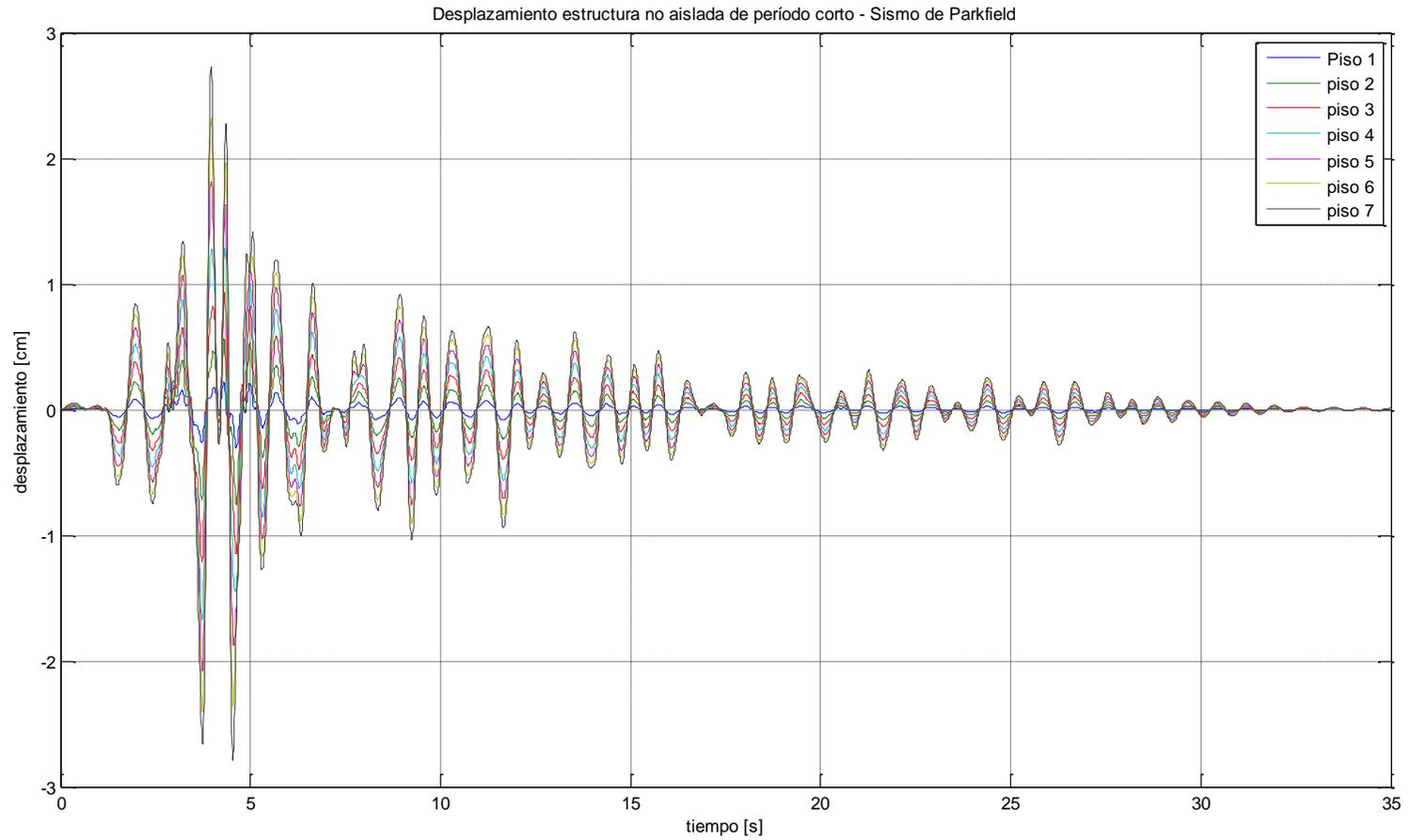


Figura 5.6.1.2.7. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período corto durante el sismo de Parkfield

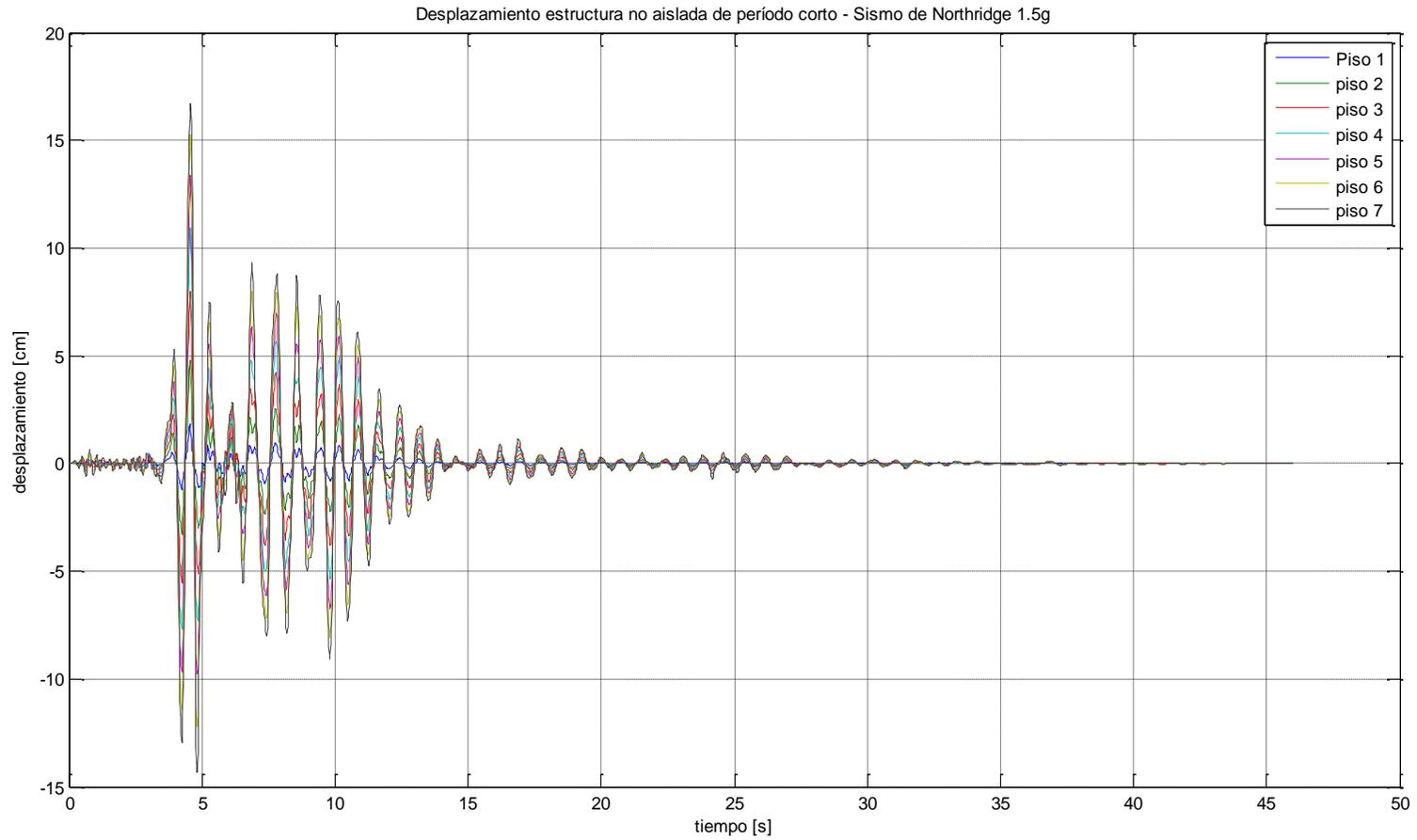


Figura5.6.1.2.9. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período corto durante el sismo de Northridge 1.5g

Como se pudo observar de los gráficos presentados en las secciones 5.6.1.1 y 5.6.1.2 correspondientes a la estructura no aislada y a la estructura aislada de período corto, los desplazamientos horizontales difieren en cuando a la amplitud período de vibración entre estos dos edificios modelados. En la estructura no aislada de período corto podemos ver una respuesta similar en todos los registros. Se puede verificar claramente que en la estructura no aislada los desplazamientos de cada piso son regulares, es decir, tienen un desplazamiento absoluto parecido entre cada piso. Por otro lado, de la estructura de período corto aislada, se puede visualizar que las deformaciones disminuyen considerablemente y por ende las derivas de cada piso. En los gráficos apenas se distingue el desplazamiento de cada uno de los pisos de la estructura aislada, lo cual es el objetivo de los sistemas de aislamiento sísmico. Esto se debe a que el aislador absorbe la energía sísmica y la disipa deformándose horizontalmente, lo cual se puede comprobar en los gráficos de la sección anterior donde se marca como piso 0 al plano de aislamiento.

5.6.1.3. Desplazamientos de la estructura aislada del último piso y del plano de aislamiento del edificio de período corto.

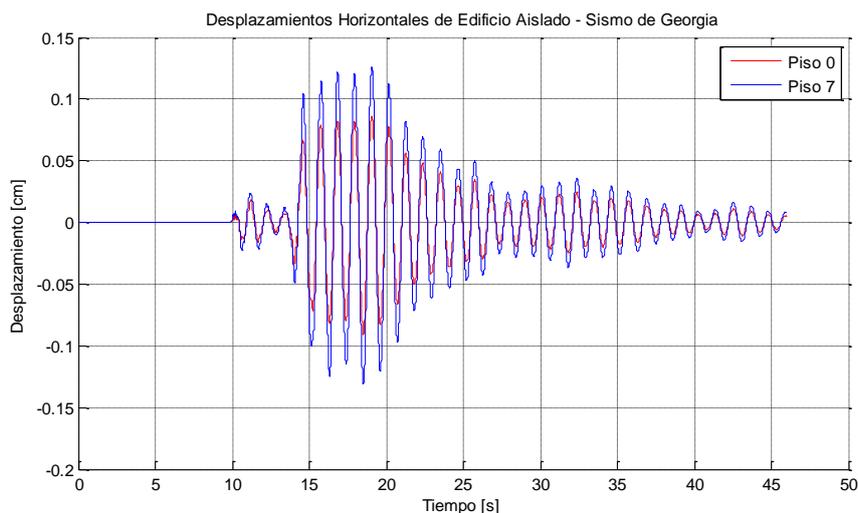


Figura 5.6.1.3.1. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento - sismo de Georgia.

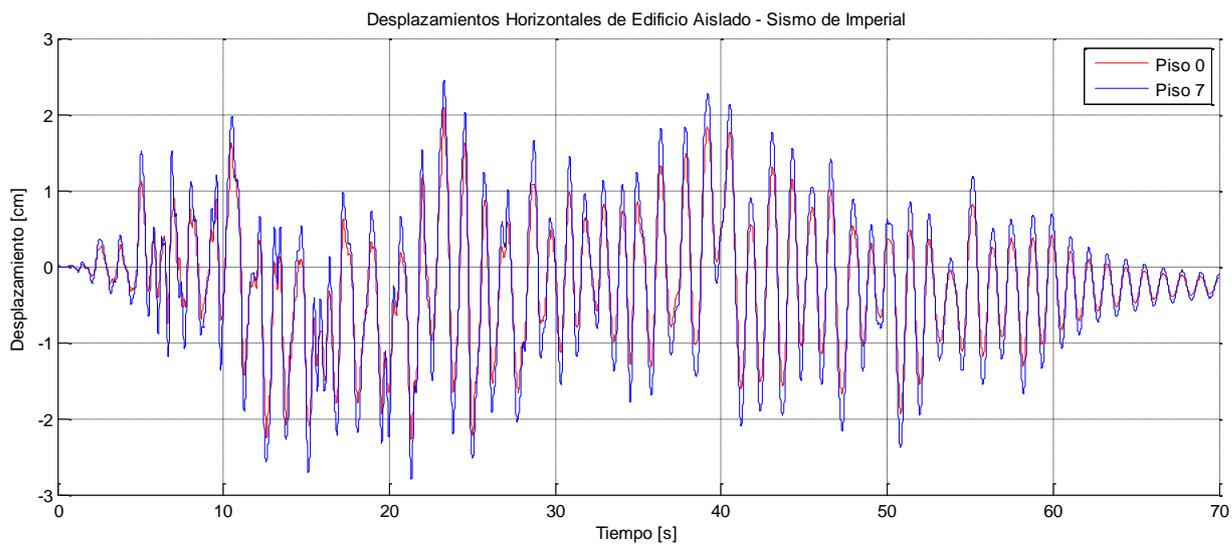


Figura5.6.1.3.2. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – Sismo de Imperial

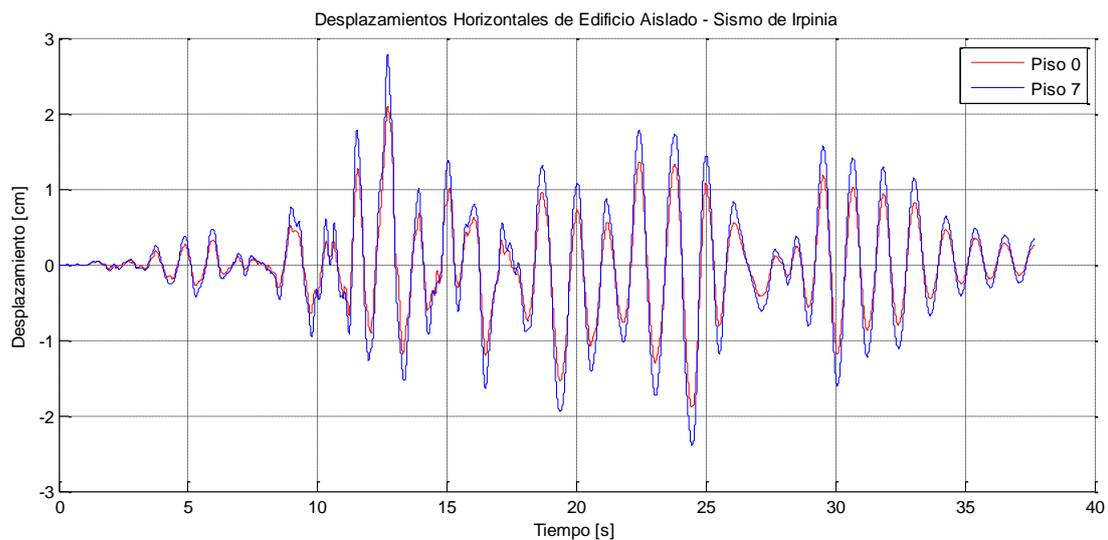


Figura5.6.1.3.3. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – Sismo de Irpinia

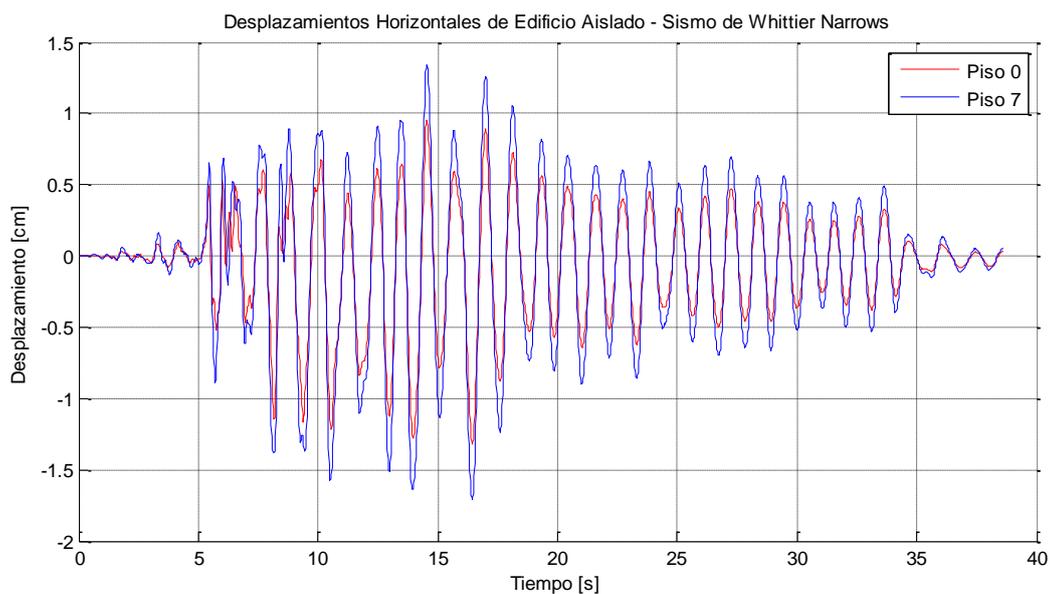


Figura5.6.1.3.4. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – Sismo de Whittier Narrows

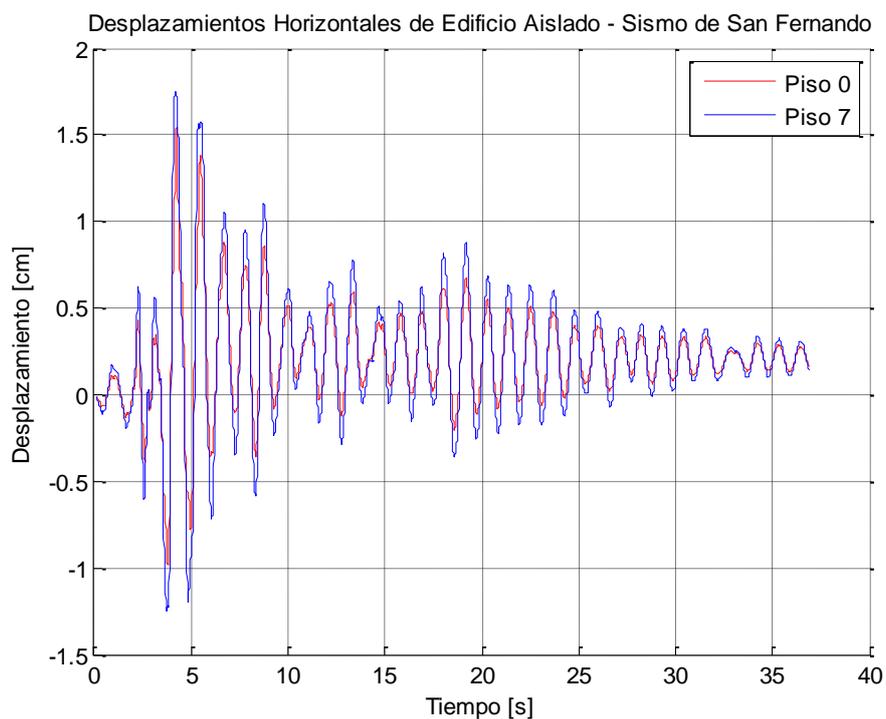


Figura5.6.1.3.5. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – Sismo de San Fernando

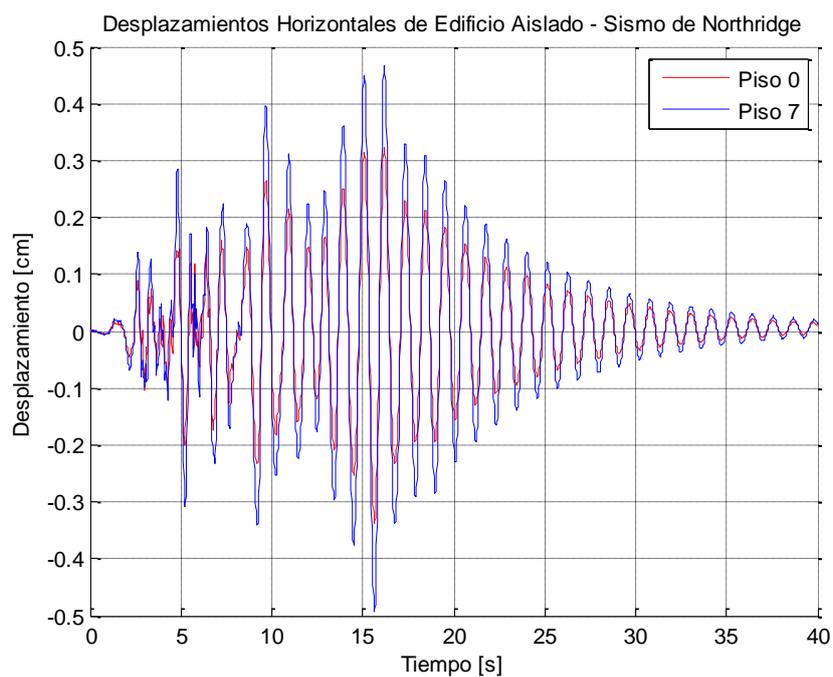


Figura5.6.1.3.6. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – Sismo de Northridge

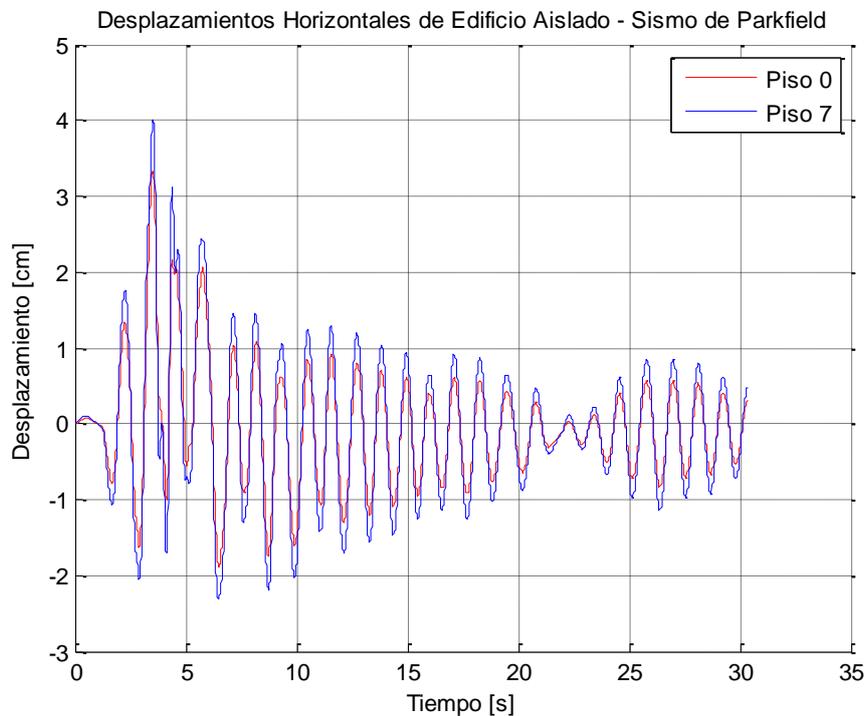


Figura5.6.1.3.7. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – Sismo de Parkfield

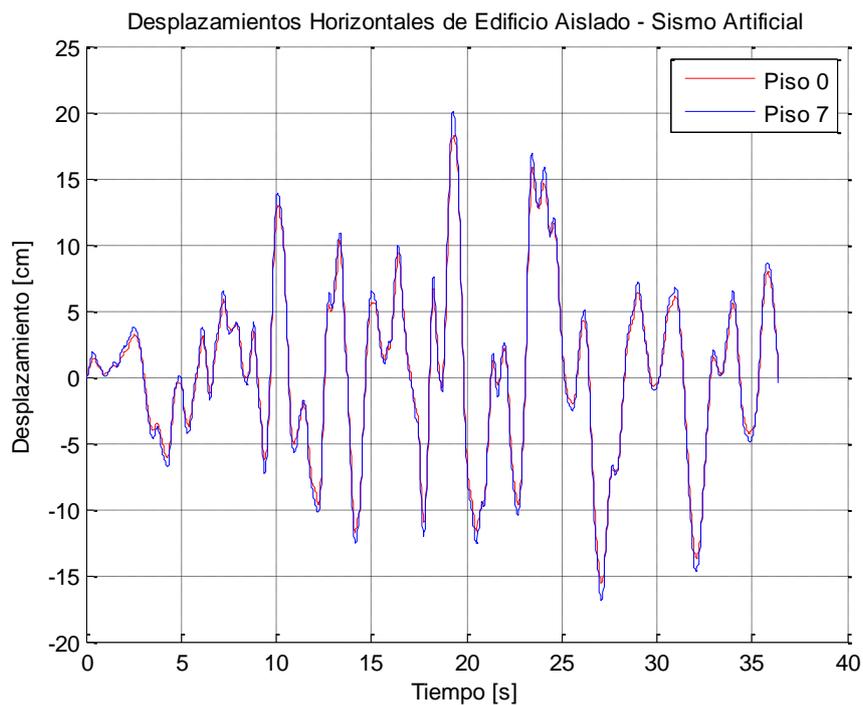


Figura5.6.1.3.8. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – Sismo Artificial

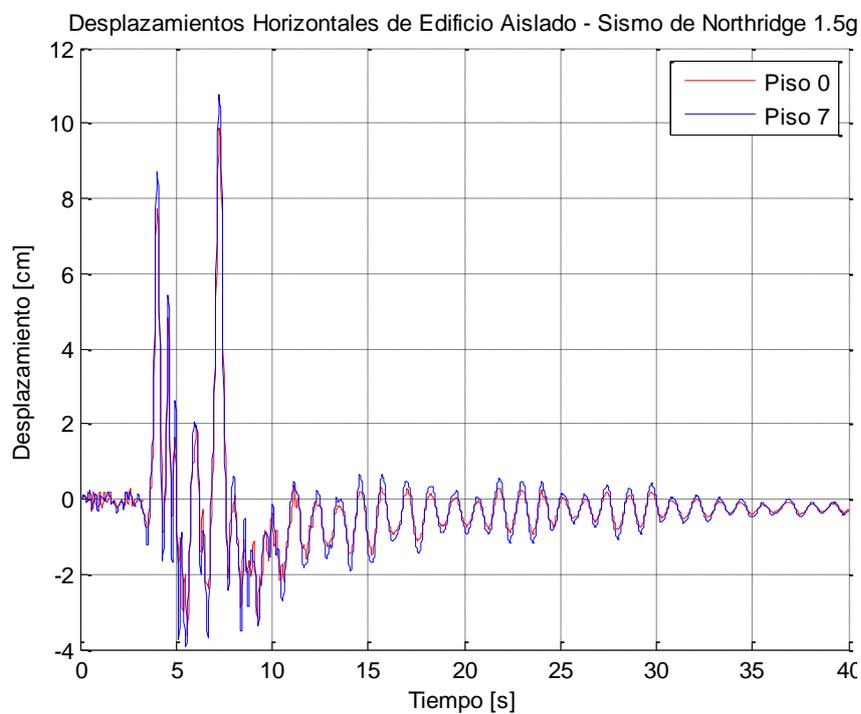


Figura5.6.1.3.9. Gráfico de los desplazamientos horizontales de la estructura de período corto aislada del último piso y del plano de aislamiento – Sismo Northridge 1.5g

Los gráficos indicados del desplazamiento de la estructura de período corto aislada muestran la eficiencia de este tipo de sistemas de aislamiento elastomérico, ya que, la diferencia entre el desplazamiento del último piso y del plano de aislación es muy pequeña. En todos los registros sísmicos que se indican los resultados, se puede ver claramente el trabajo del aislador el cual absorbe la mayor parte de deformación producida por el terremoto. De los registros analizados, en todos los casos el sistema de aislamiento de base cumple con su propósito, el cual es reducir las deformaciones de los elementos estructurales, en este caso, de las columnas del edificio. En el sismo de diseño máximo, Northridge 1.5g, se ve claramente que existe un desempeño eficiente de los aisladores, ya que, del desplazamiento horizontal máximo de la edificación, 11 cm aproximadamente, los aisladores absorben 10cm de esta deformación total, lo que nos da como resultado un desplazamiento absoluto de 1cm de las columnas, el cual se distribuye uniformemente en todos los pisos. En la siguiente sección se comparan los desplazamientos absolutos del último piso de la edificación aislada y no aislada de período corto.

5.6.1.4. Comparación de desplazamientos horizontales absolutos de la estructura aislada y no aislada de período corto

Para visualizar la eficiencia del sistema de aislamiento de base elastomérico, en la presente sección se comparan los desplazamientos absolutos de la estructura. Para esto se procedió a restar al desplazamiento horizontal del último piso la deformación del aislador, lo que nos proporciona la verdadera deformación de las columnas en el plazo horizontal. A continuación se indican los gráficos del resultado de deformaciones absolutas del último piso tanto de la estructura aislada como de la no aislada. Para el caso de la estructura no aislada la deformación es la misma al tener su base empotrada.

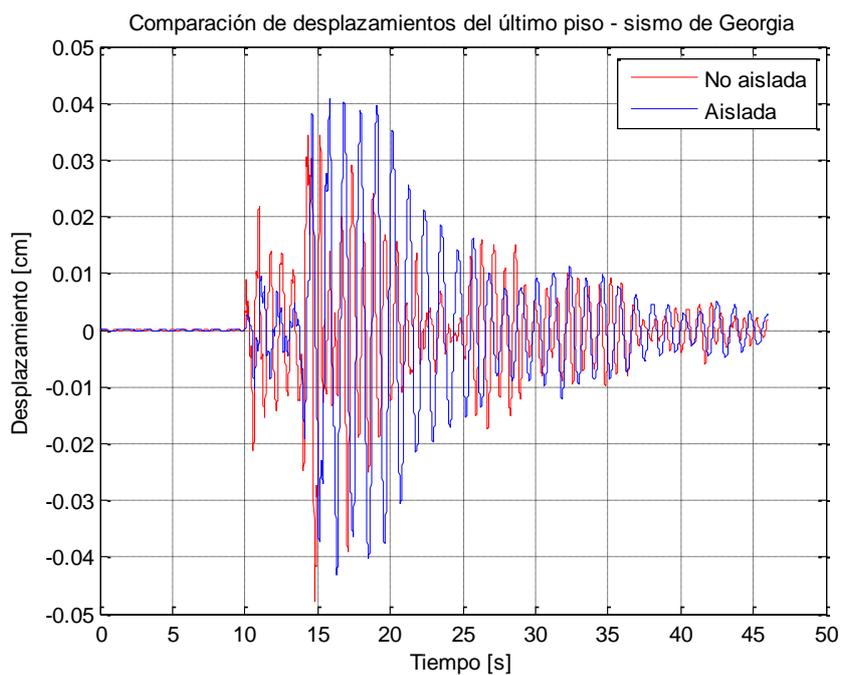


Figura5.6.1.4.1. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – Sismo Georgia

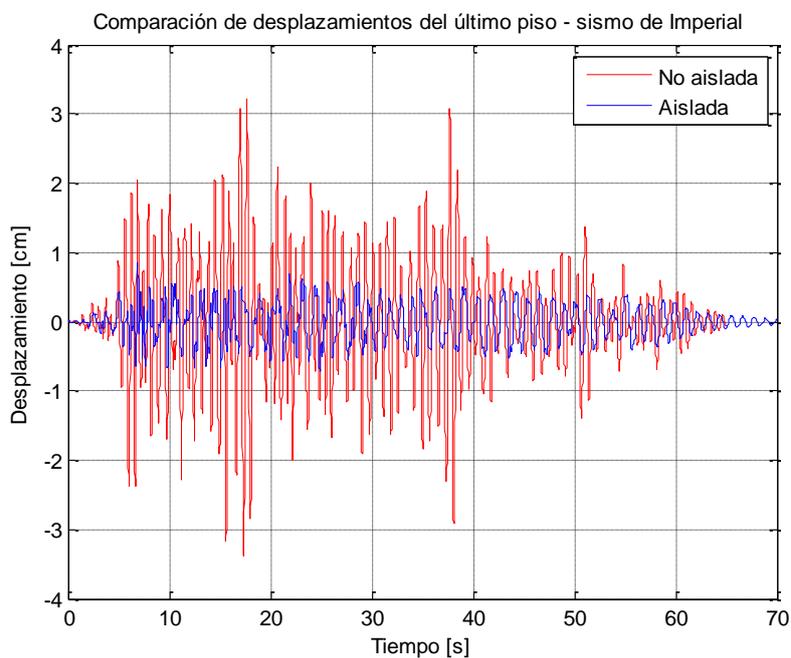


Figura5.6.1.4.2. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – Sismo Imperial

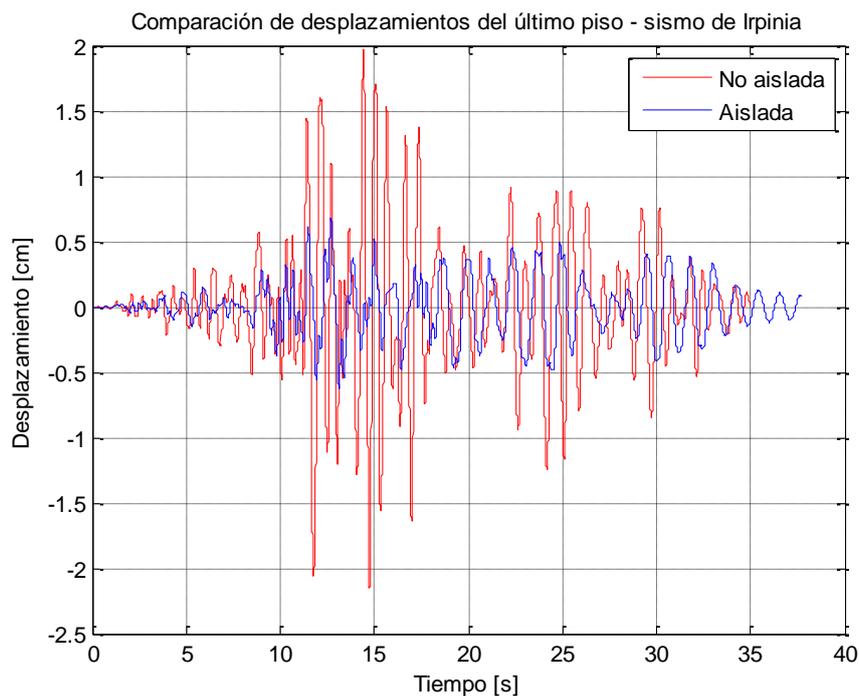


Figura5.6.1.4.3. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – Sismo Irpinia

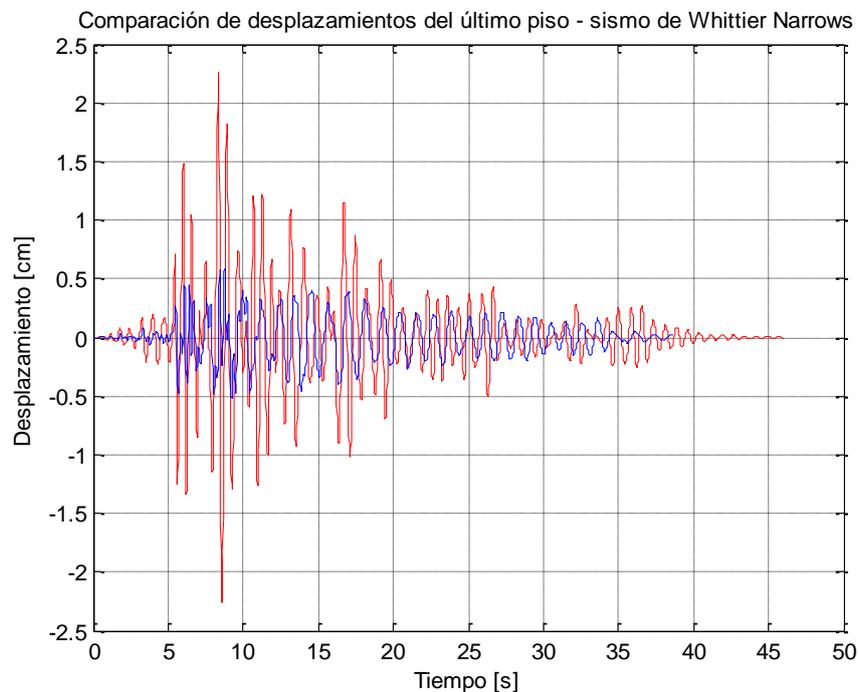


Figura5.6.1.4.4. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – Sismo Whittier Narrows

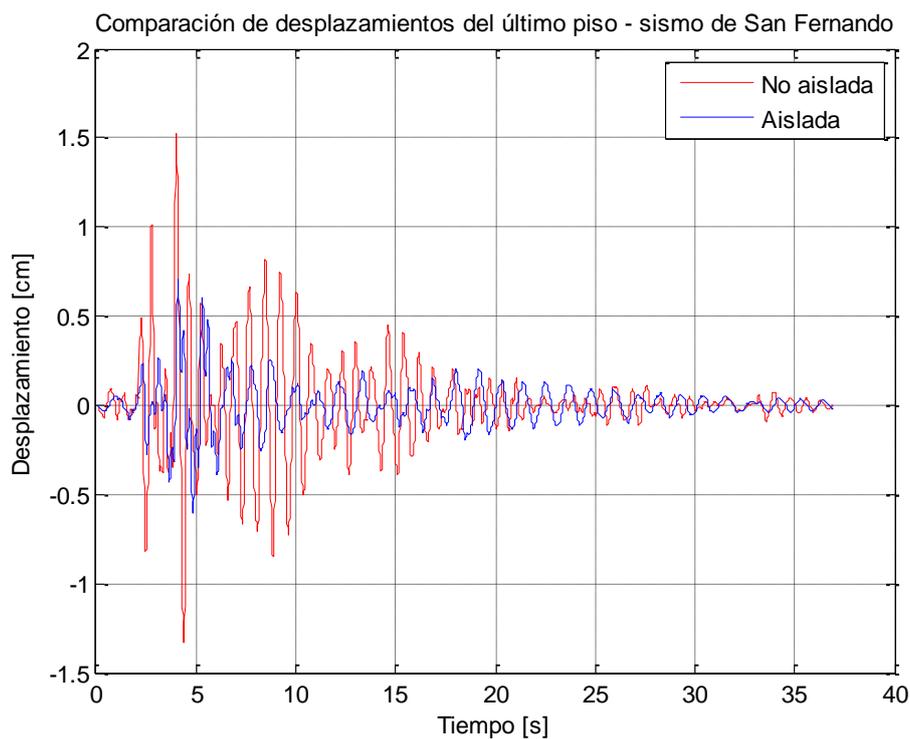


Figura5.6.1.4.5. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – Sismo de San Fernando

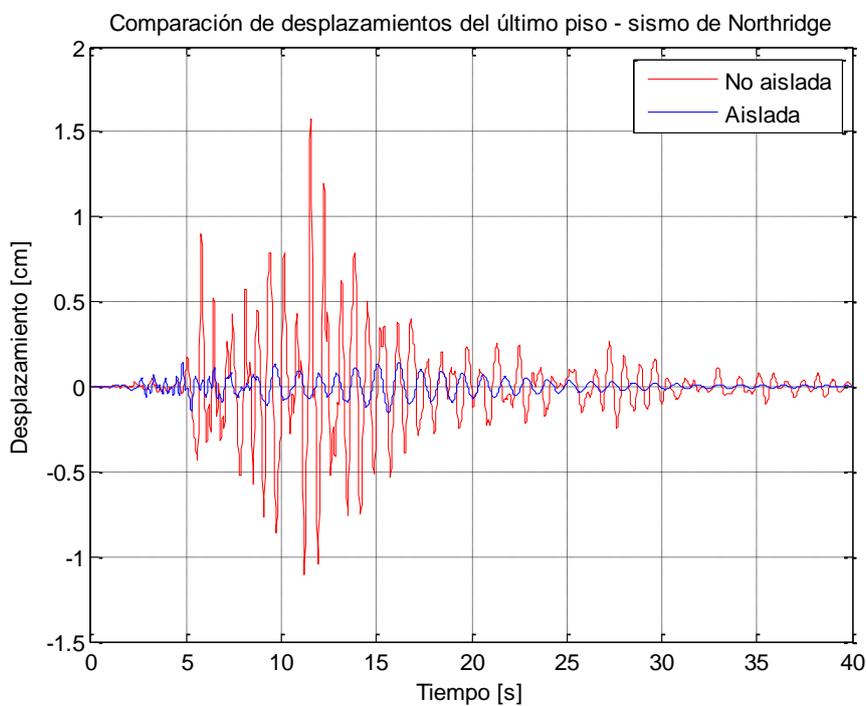


Figura5.6.1.4.6. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – Sismo de Northridge

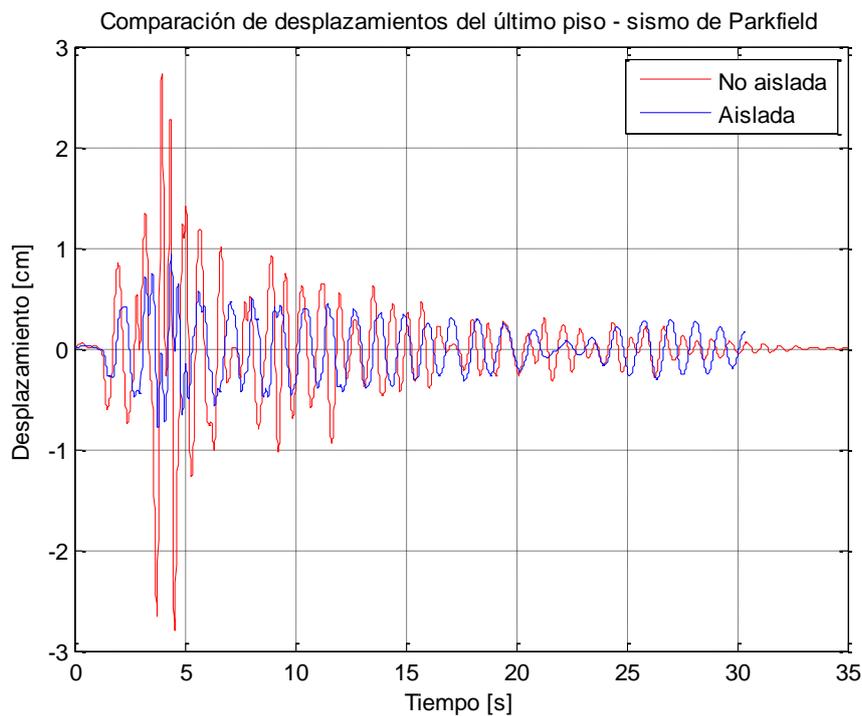


Figura5.6.1.4.7. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – Sismo de Parkfield

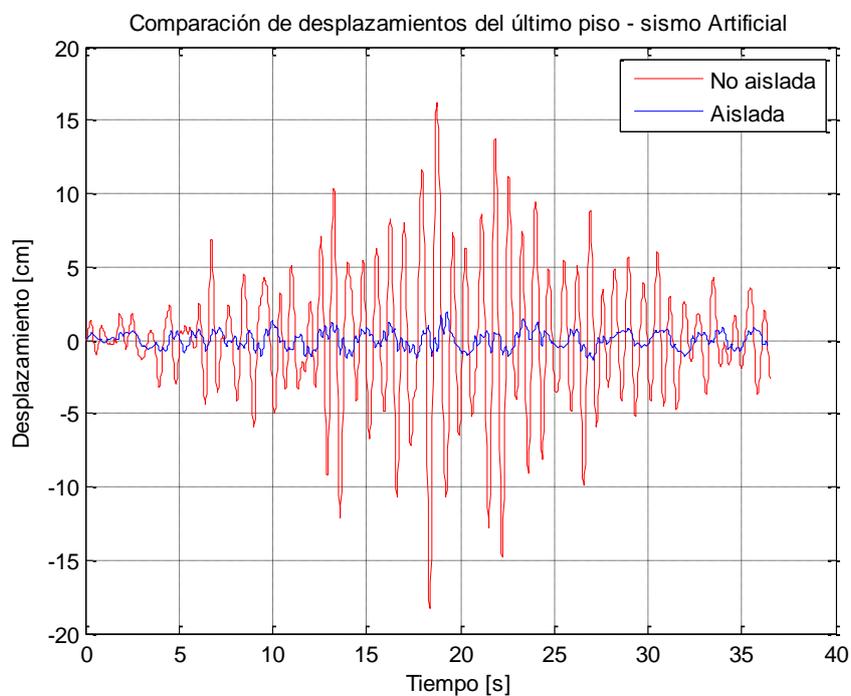


Figura5.6.1.4.8. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – Sismo Artificial

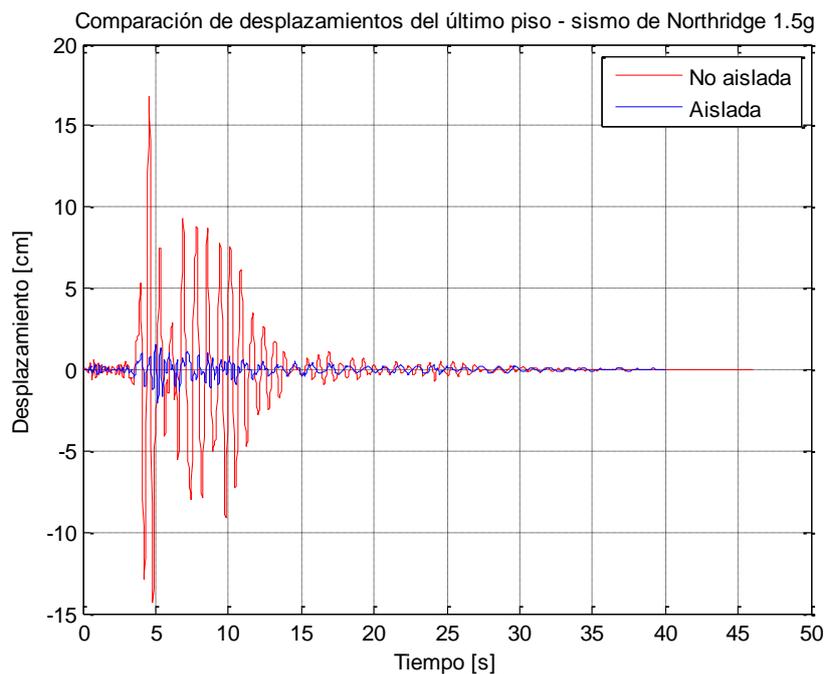


Figura5.6.1.4.9. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período corto aislada y no aislada del último piso – Sismo Northridge 1.5g

Los resultados obtenidos de cada uno de los registros sísmicos indican claramente la forma en la que, los aisladores de base elastoméricos, reducen las deformaciones en los elementos estructurales en una edificación de período corto como es la analizada en esta sección. En todos los registros sísmicos el desempeño de los aisladores reduce notablemente las deformaciones horizontales de las columnas, tomando como ejemplo el sismo de diseño más fuerte, Northridge 1.5g, el edificio sin base aislada sufre de grandes deformaciones que llegan hasta los 16cm aproximadamente, lo que, al aplicar un sistema de aislamiento de base se reduce notablemente a menos de 2cm.

5.6.2. Análisis de desplazamientos de la estructura de período largo

5.6.2.1. Desplazamientos de la estructura no aislada de período largo

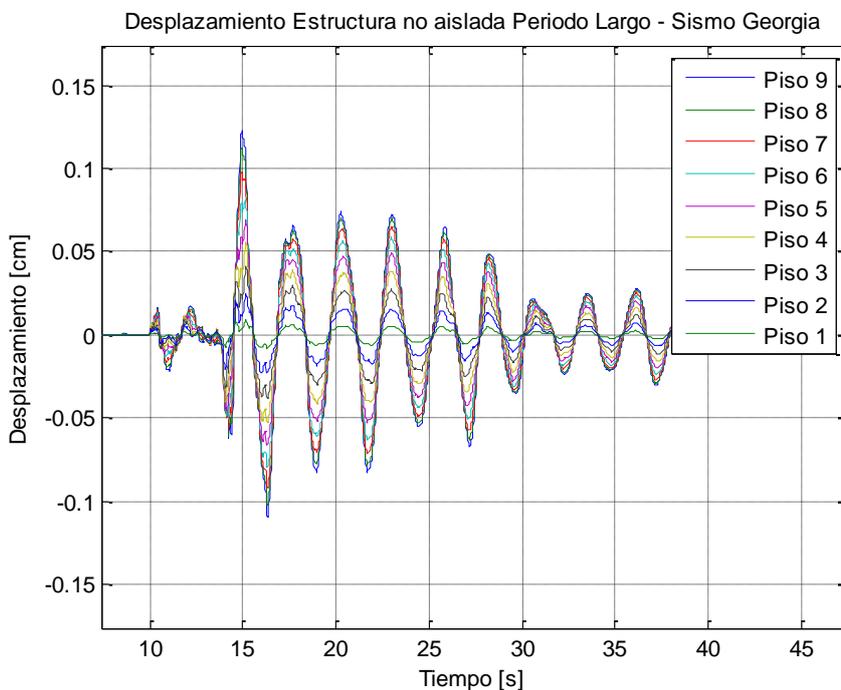


Figura 5.6.2.1.1. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo de Georgia

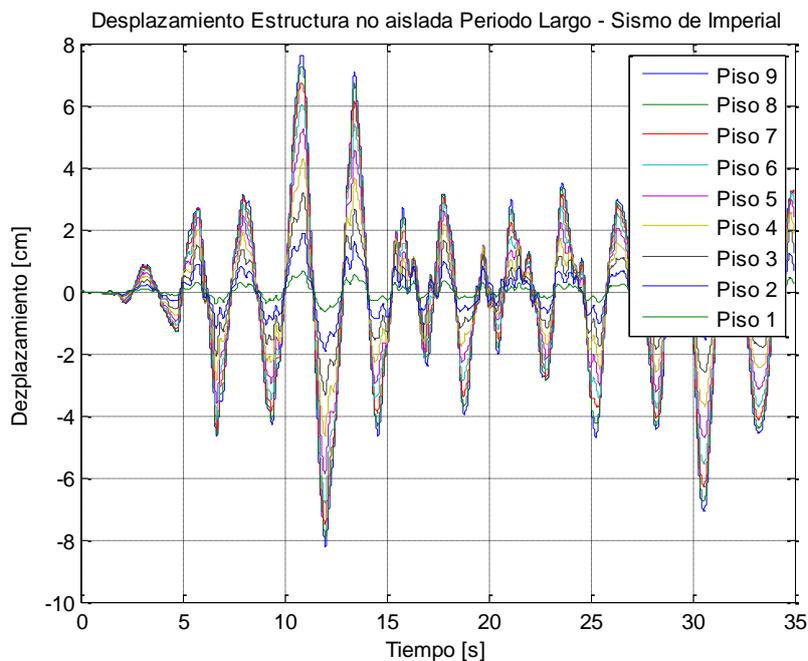


Figura 5.6.2.1.2. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo de Imperial

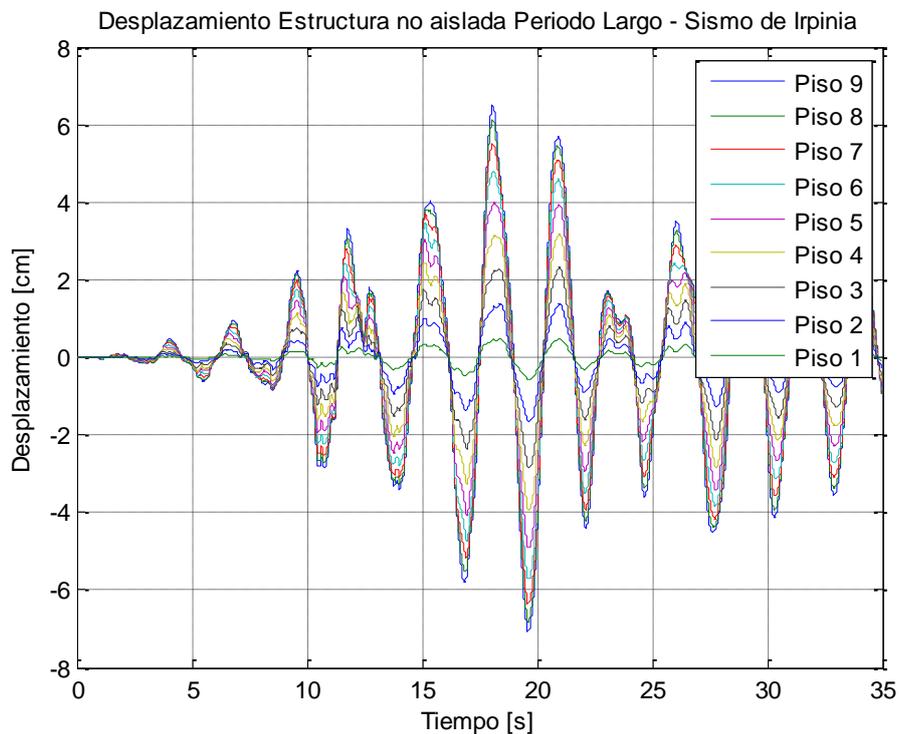


Figura 5.6.2.1.3. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo de Irpinia

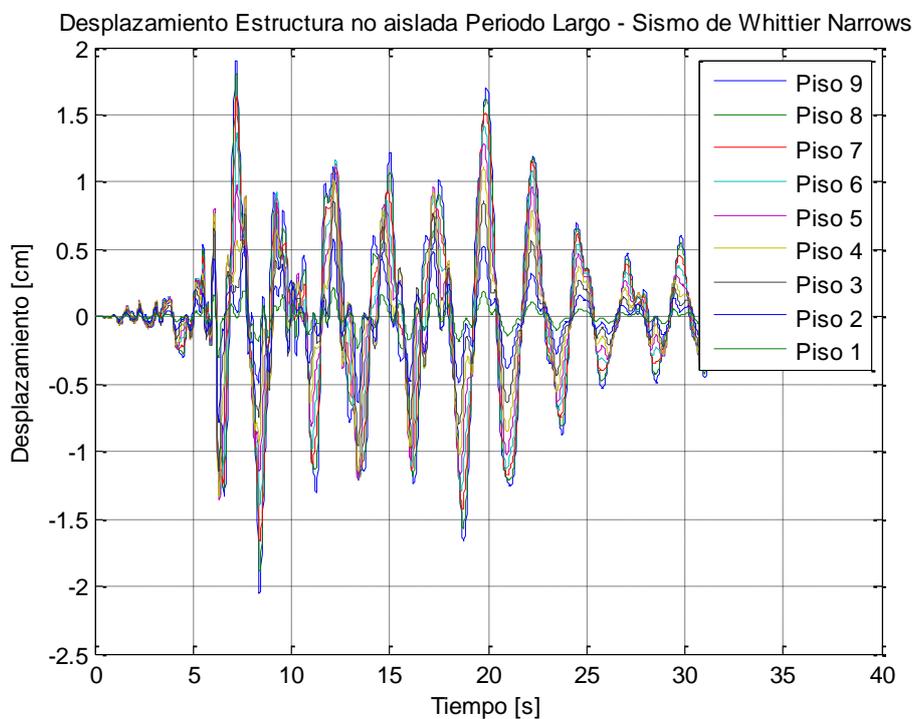


Figura 5.6.2.1.4. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo de Whittier Narrows

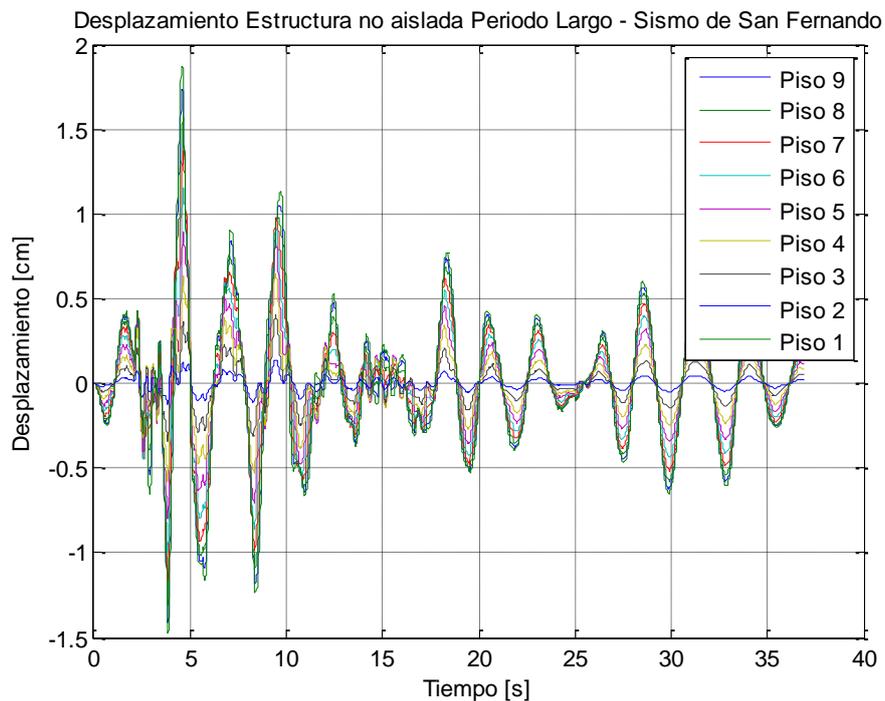


Figura5.6.2.1.5. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo de San Fernando

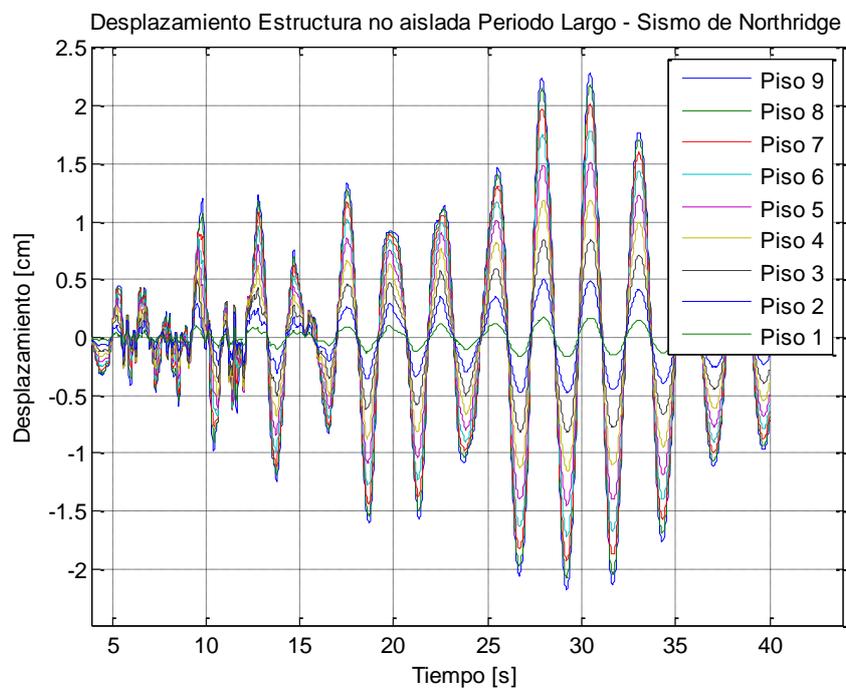


Figura5.6.2.1.6. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo de Northridge

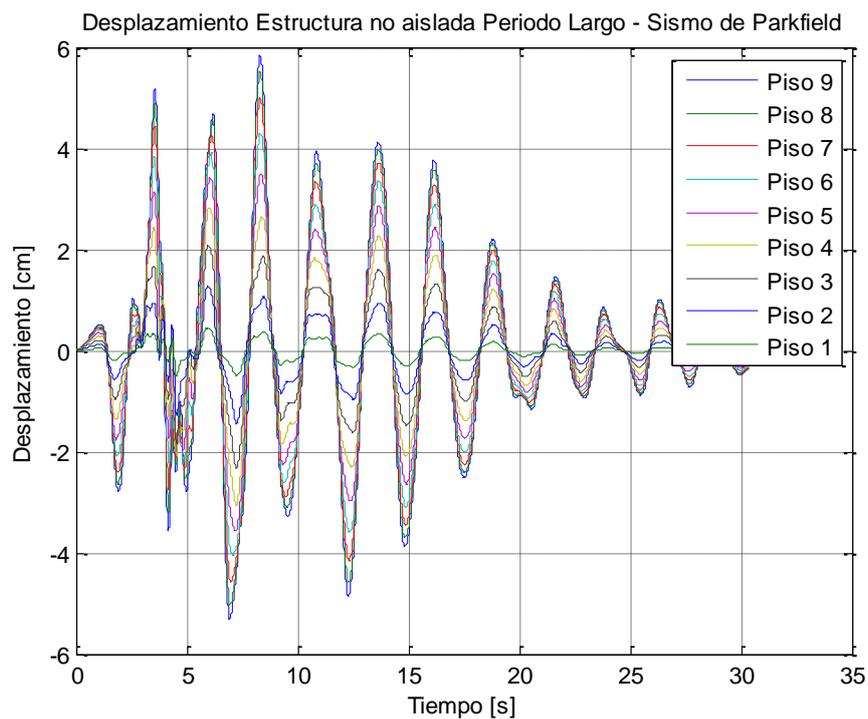


Figura5.6.2.1.7. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo de Parkfield.

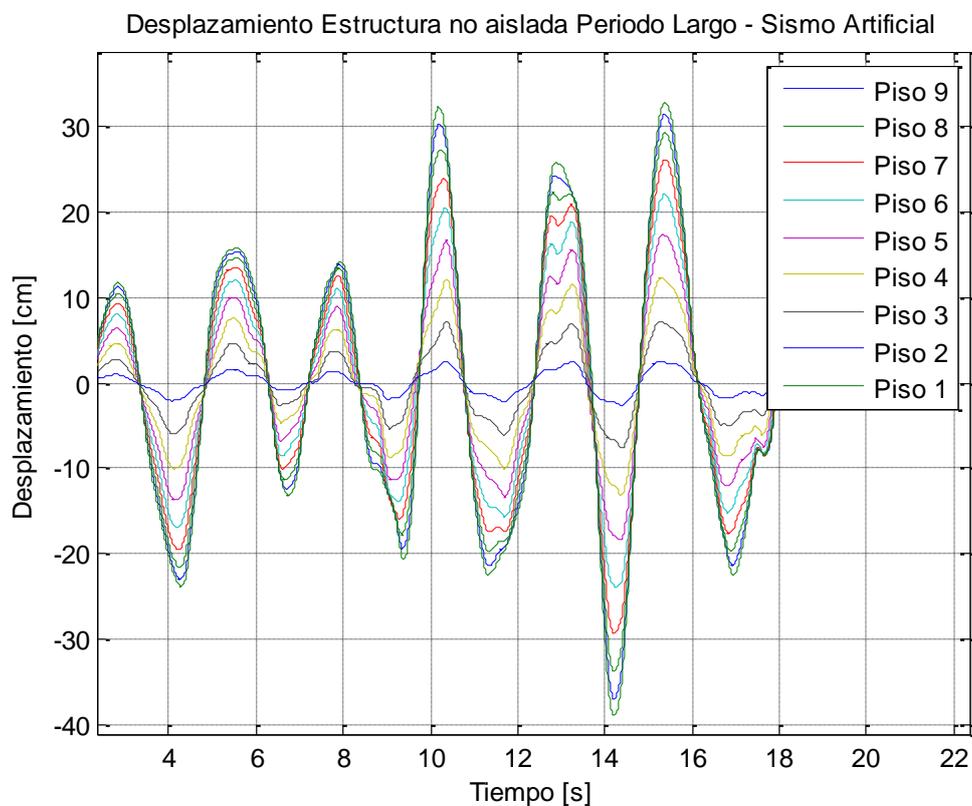


Figura5.6.2.1.8. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo Artificial.

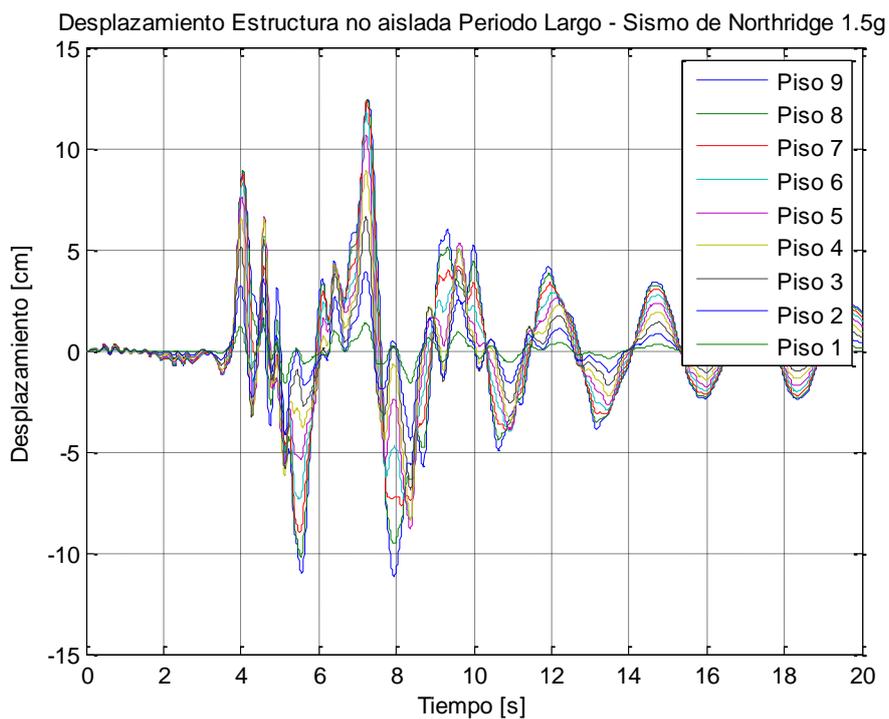


Figura5.6.2.1.9. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura no aislada de período largo durante el sismo Northridge 1.5g.

5.6.2.2. Desplazamientos de la estructura aislada de período largo

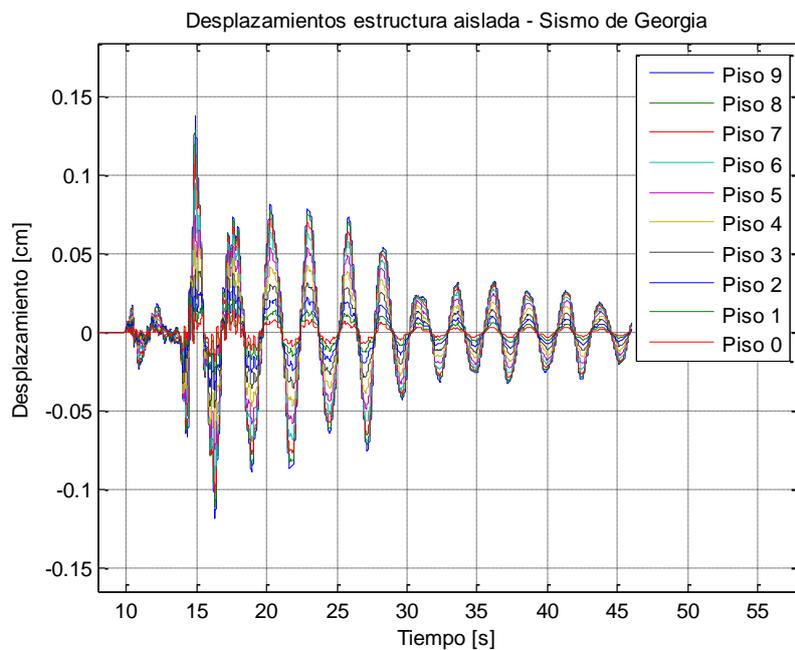


Figura5.6.2.2.1 Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de Georgia

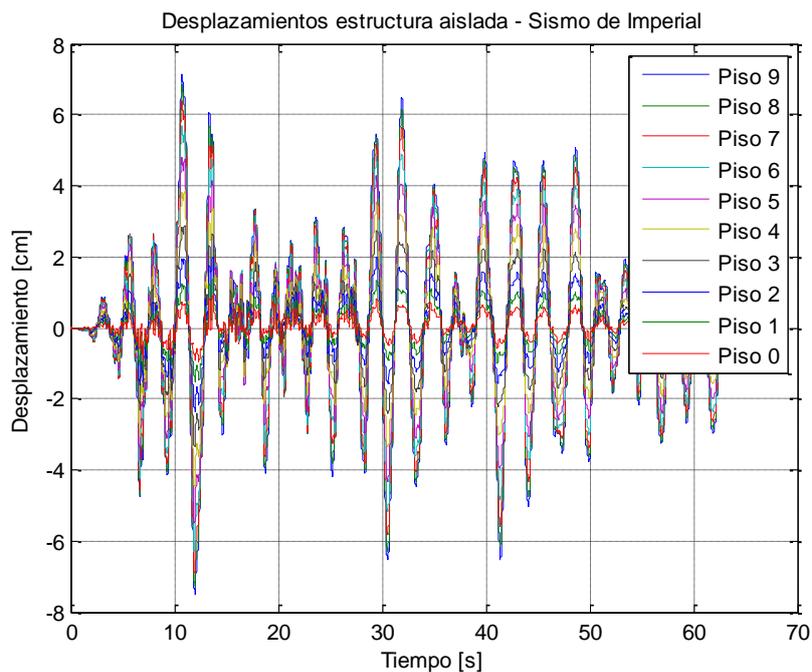
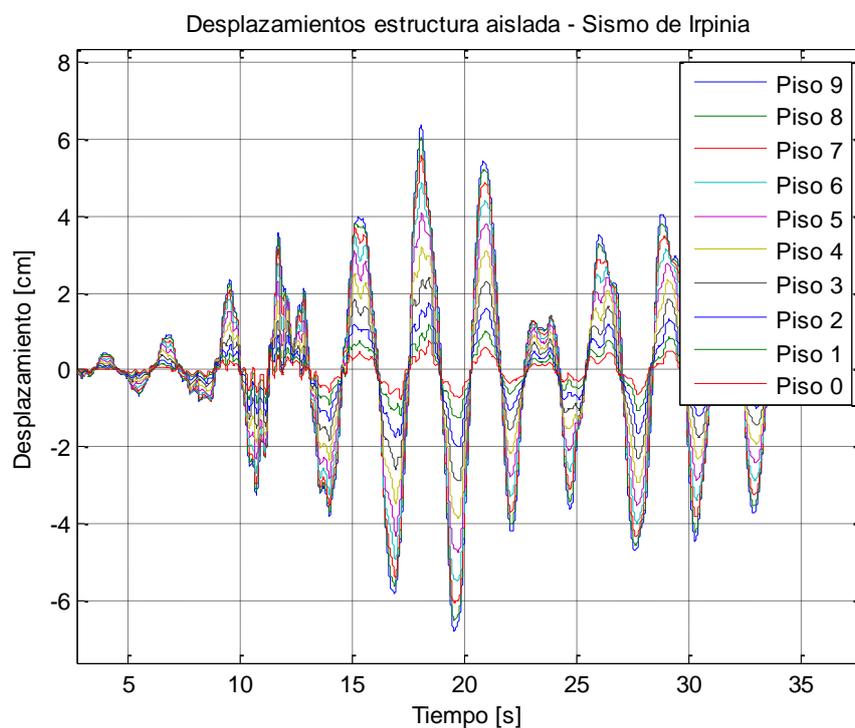


Figura5.6.2.2.2. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de Imperial



Figura#. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de Irpinia

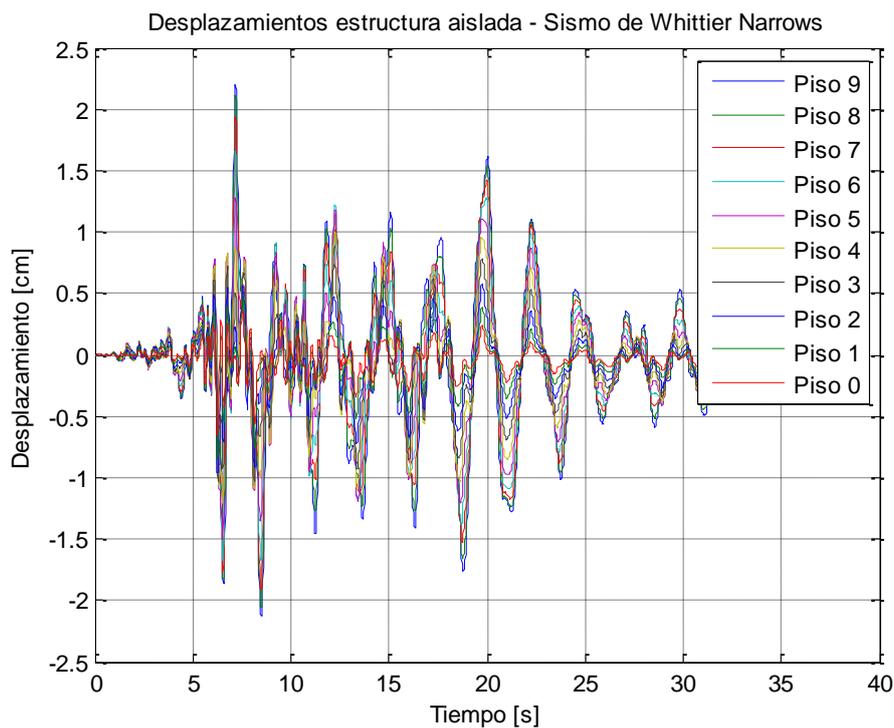


Figura5.6.2.2.4. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de Whittier Narrows

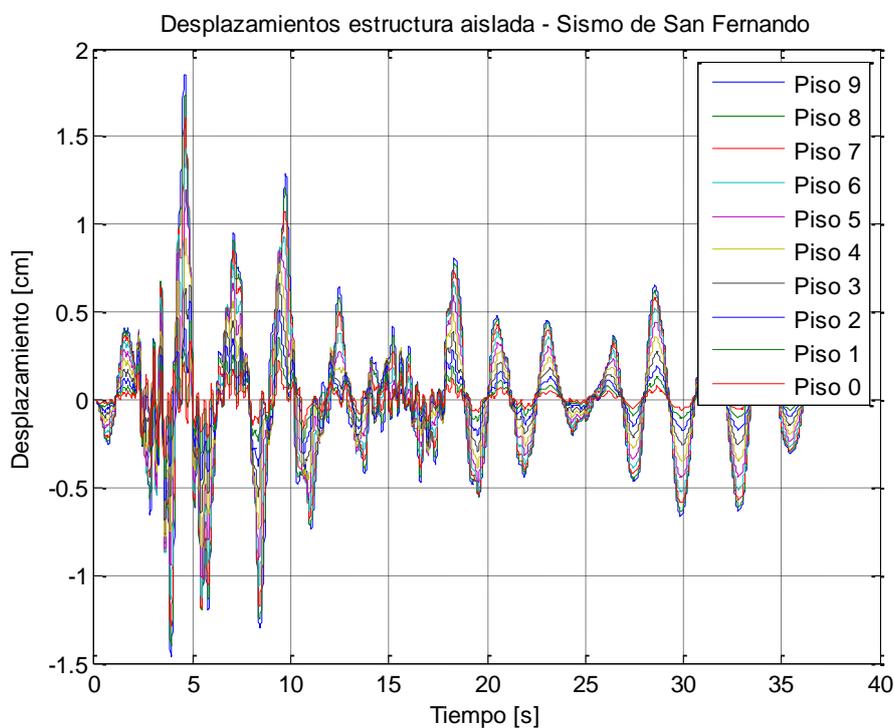


Figura5.6.2.2.5. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de San Fernando

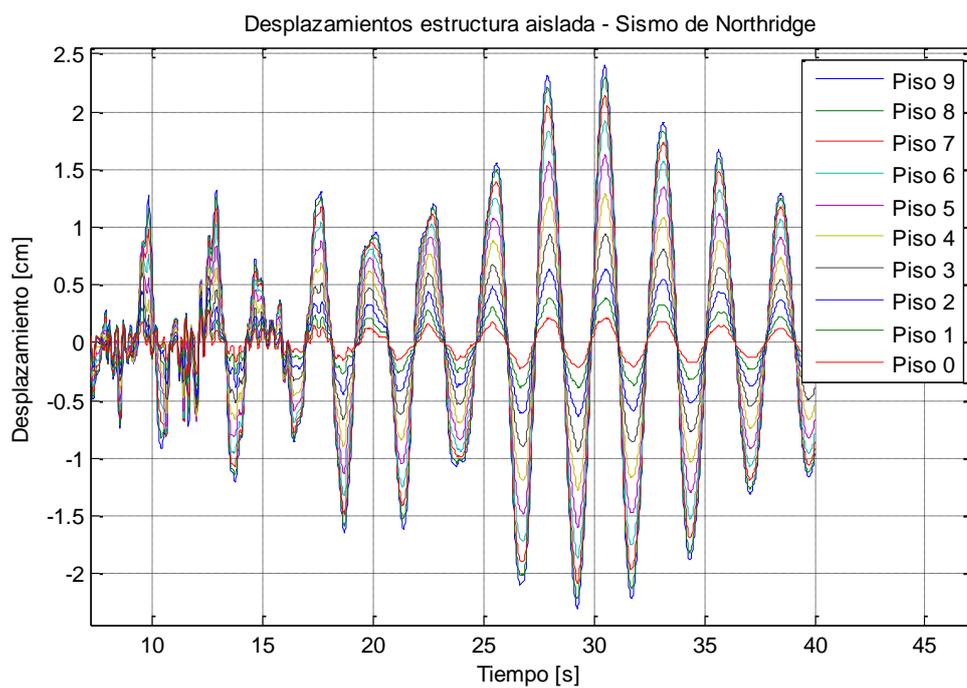


Figura 5.6.2.2.6. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de San Northridge

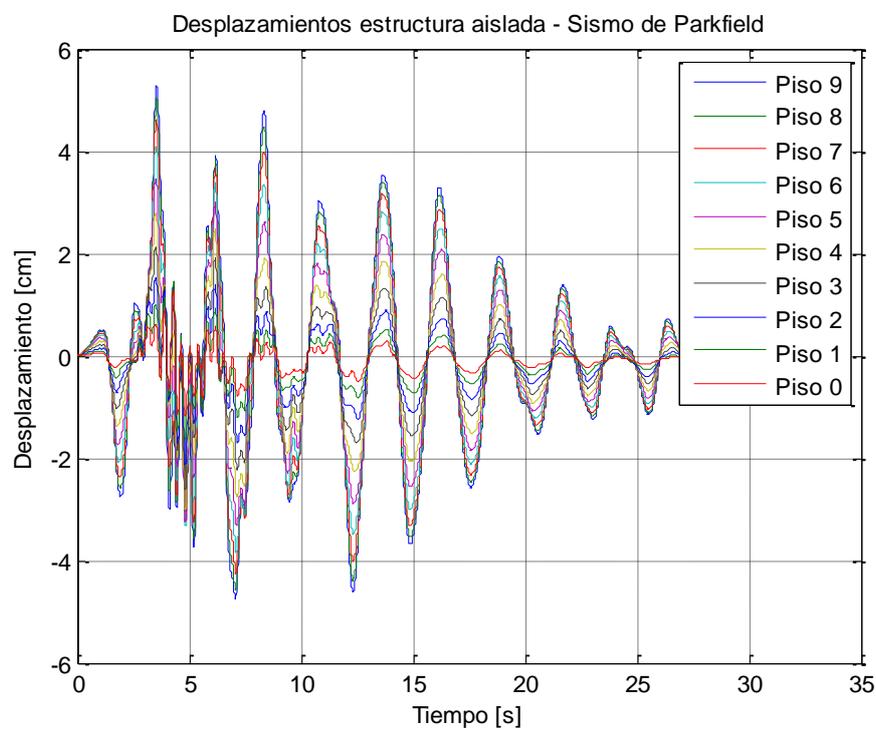


Figura 5.6.2.2.7 Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de San Parkfield

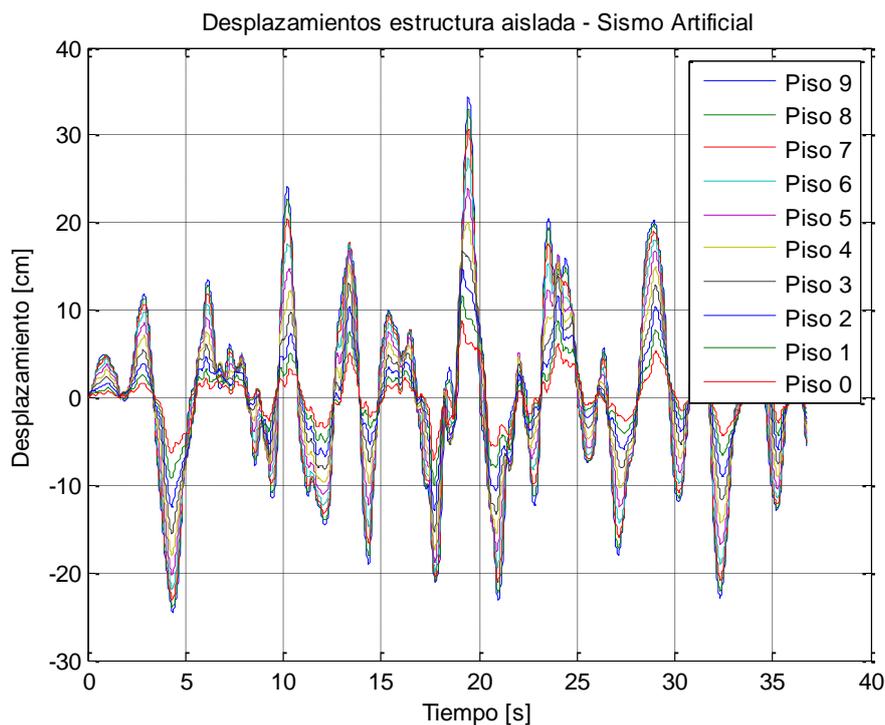


Figura5.6.2.2.8 Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo Artificial

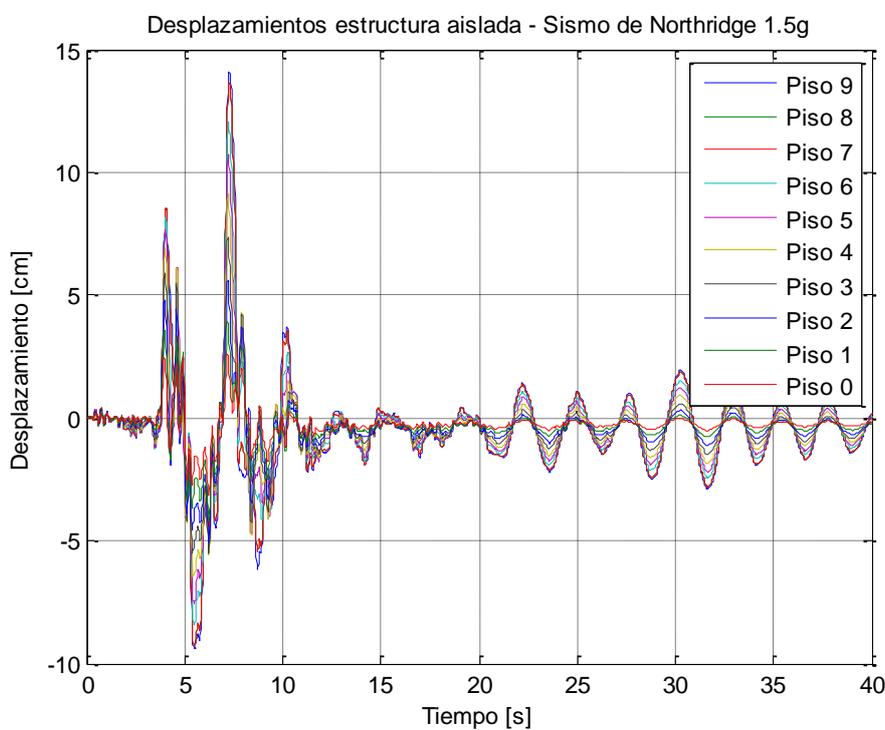


Figura5.6.2.2.9. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de Northridge 1.5g.

5.6.2.3. Comparación de desplazamientos del último piso y la base aislada del edificio de período largo

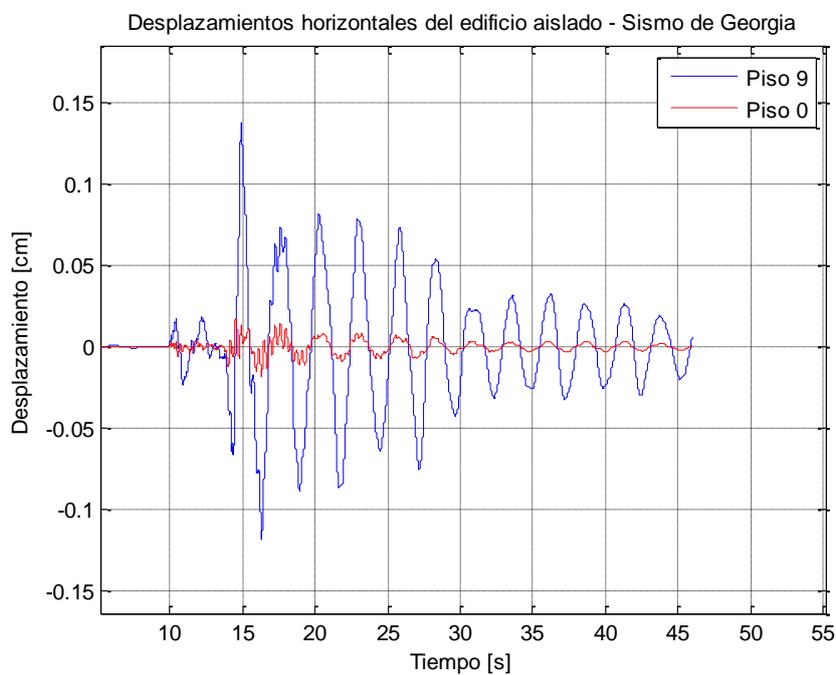


Figura 5.6.2.3.1. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de Georgia.

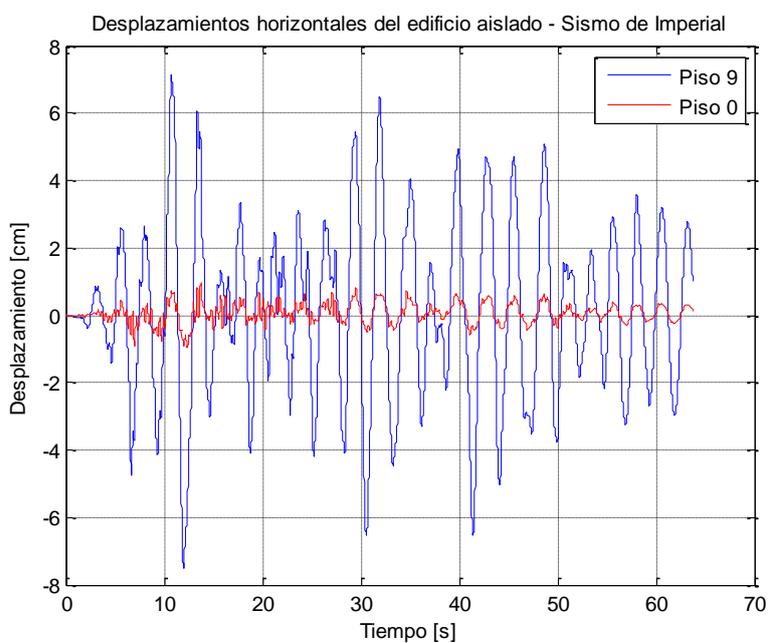


Figura 5.6.2.3.2. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de Imperial.

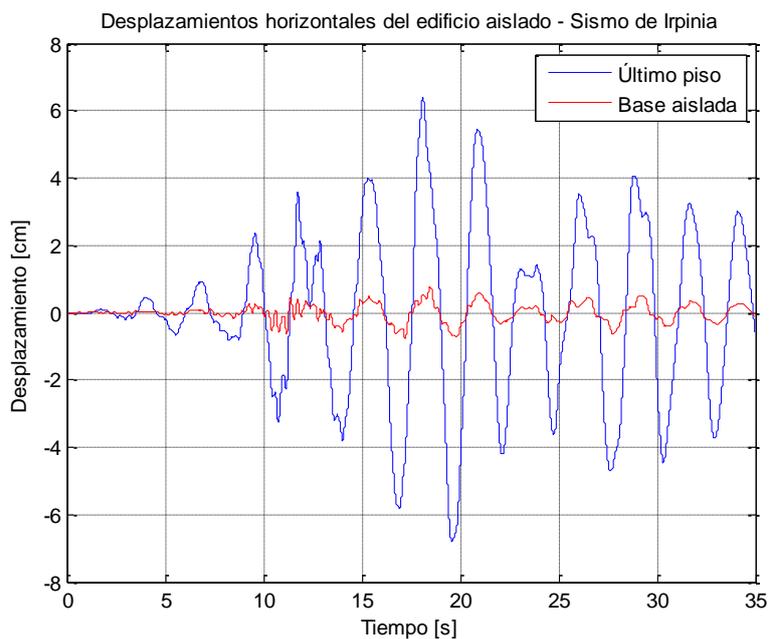


Figura5.6.2.3.3. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de Irpinia.

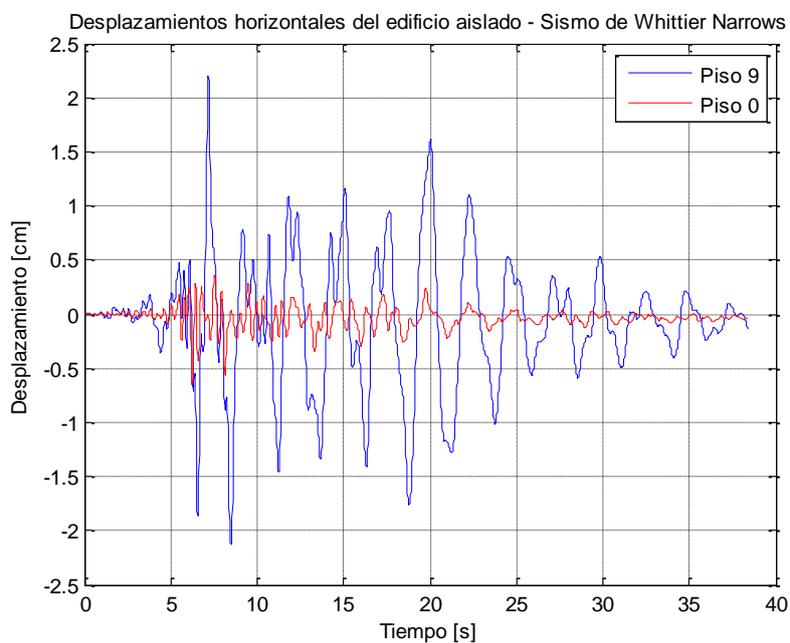


Figura5.6.2.3.4. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de Whittier Narrows.

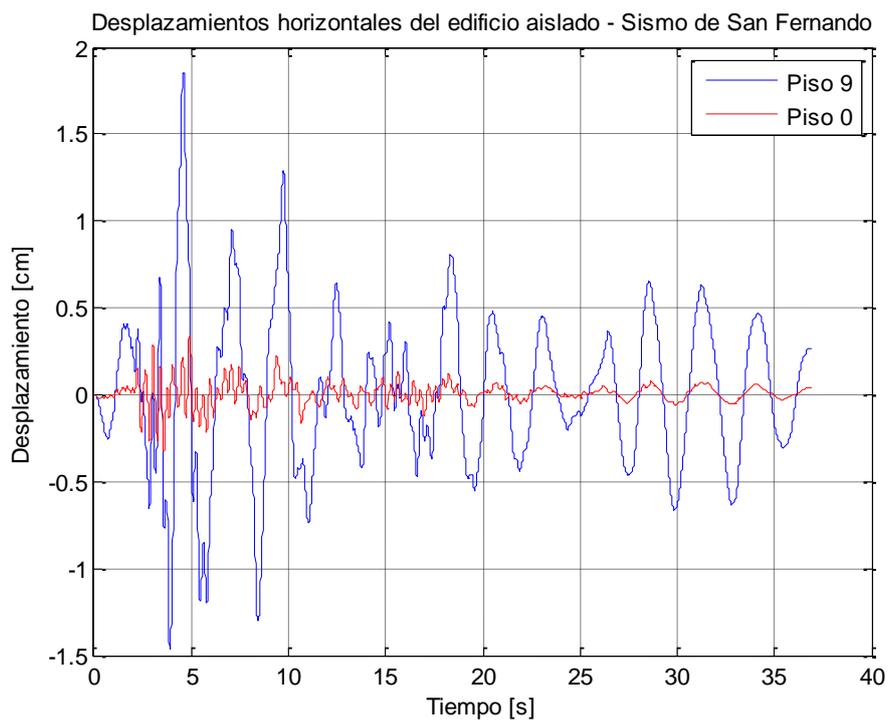


Figura5.6.2.3.5. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de San Fernando.

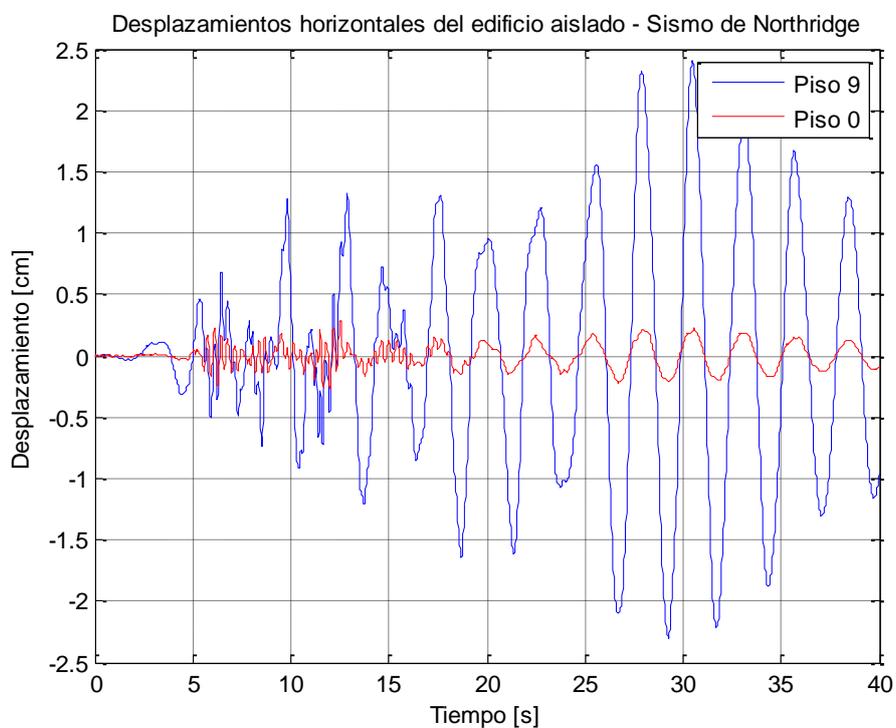


Figura5.6.2.3.6. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de Northridge.

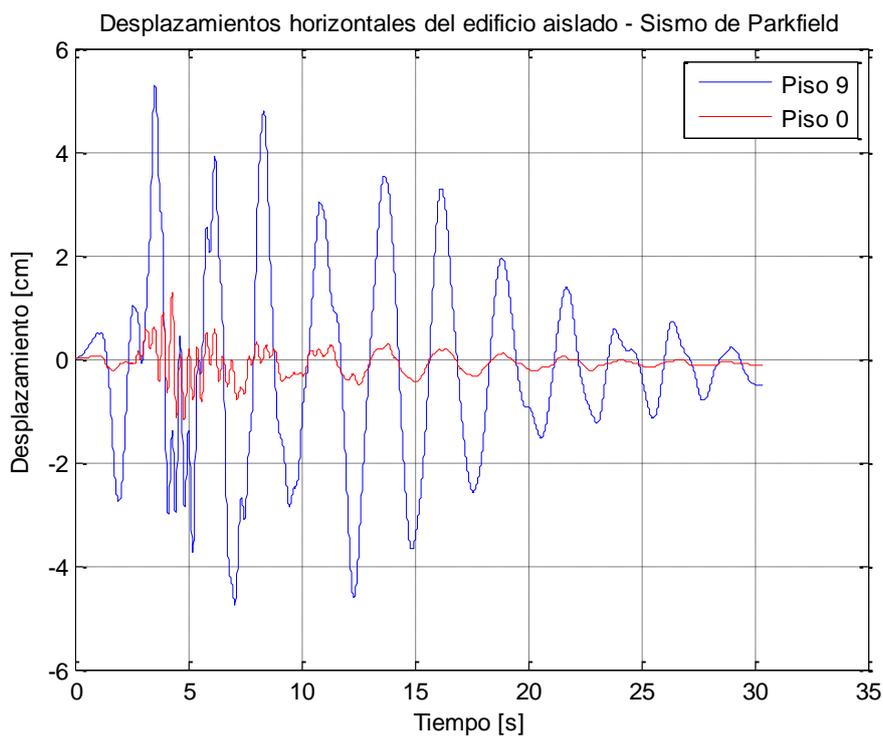


Figura 5.6.2.3.7. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo de Parkfield.

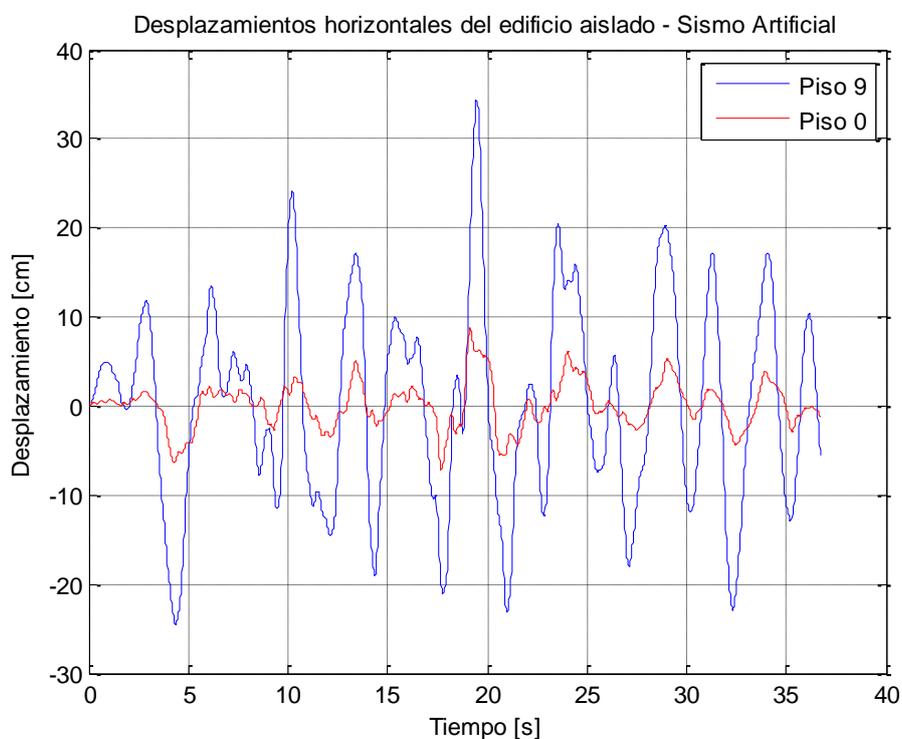


Figura 5.6.2.3.9. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo Artificial.

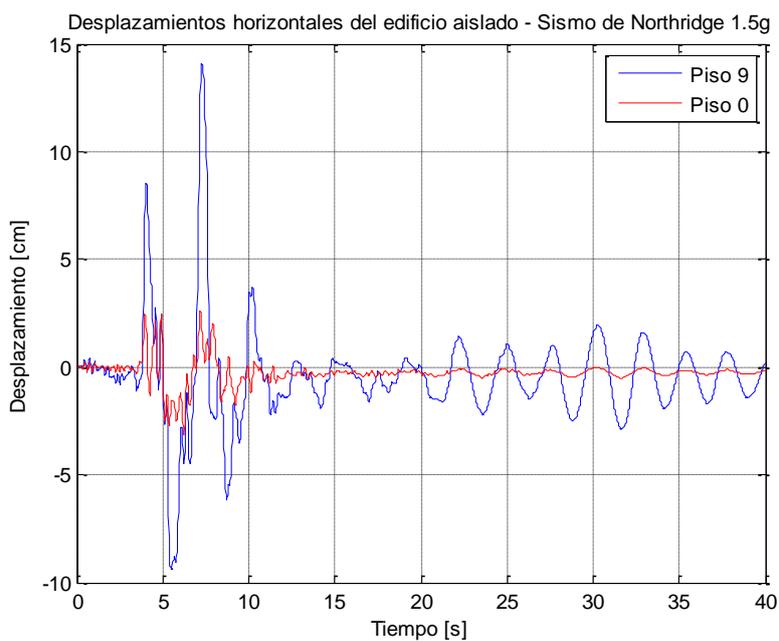


Figura5.6.2.3.9. Gráfico de desplazamientos horizontales de la estructura aislada de período largo – sismo Artificial.

5.6.2.4. Comparación de desplazamientos absolutos del último piso de la estructura aislada y no aislada de período largo

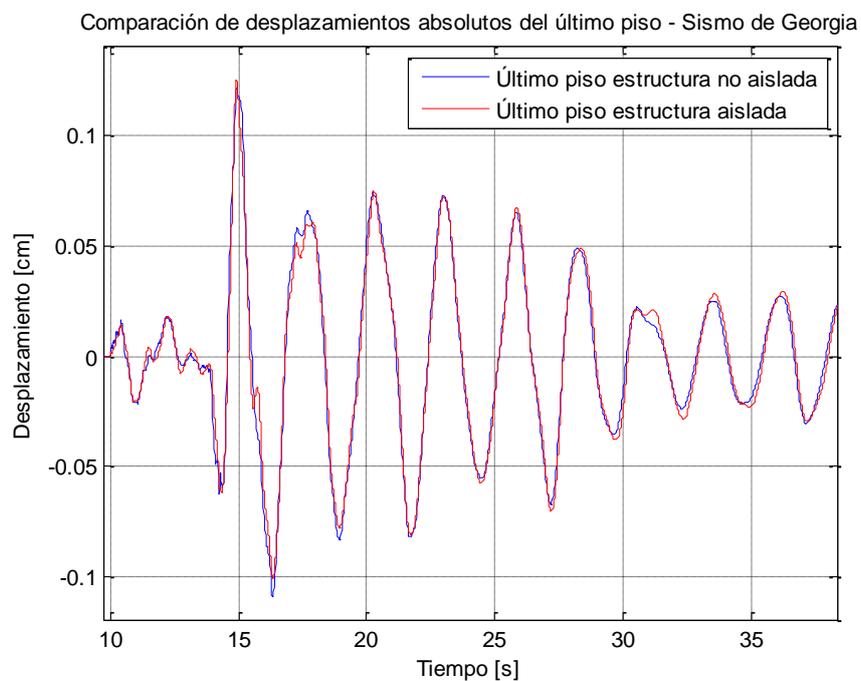


Figura5.6.2.4.1. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – Sismo Georgia.

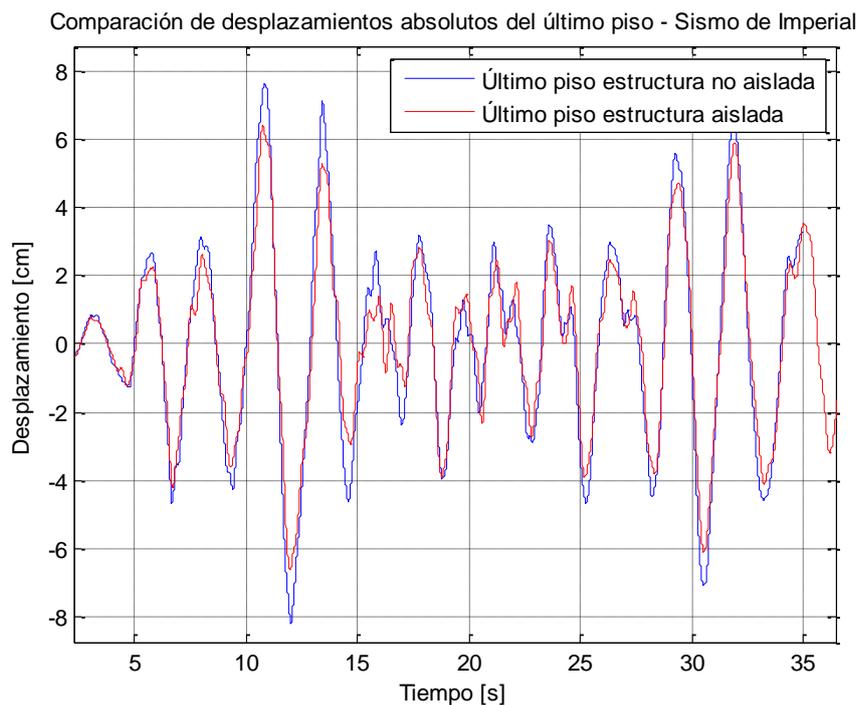


Figura5.6.2.4.2. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – Sismo de Imperial.

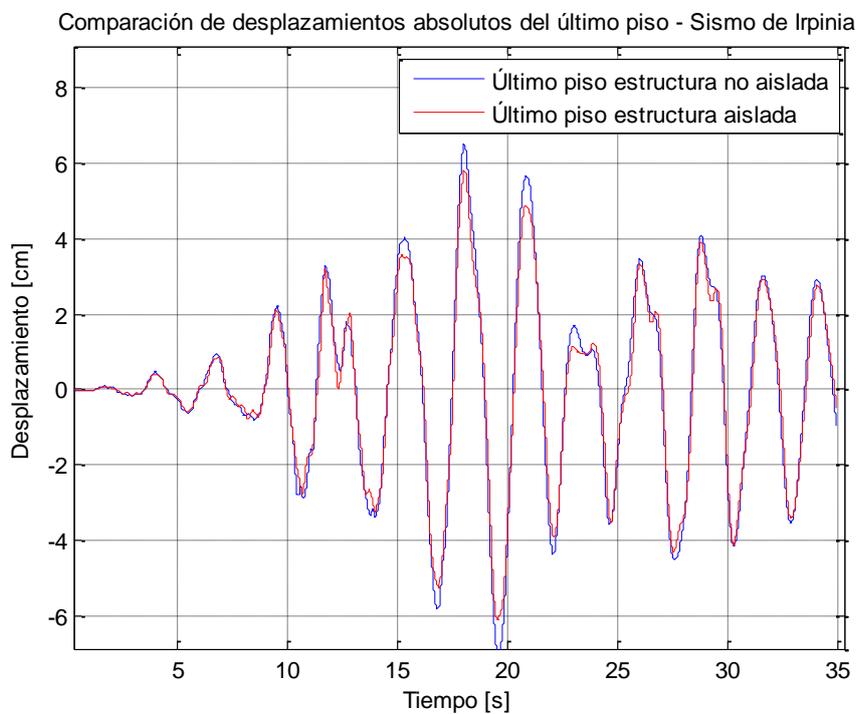


Figura5.6.2.4.3. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – Sismo de Irpinia.

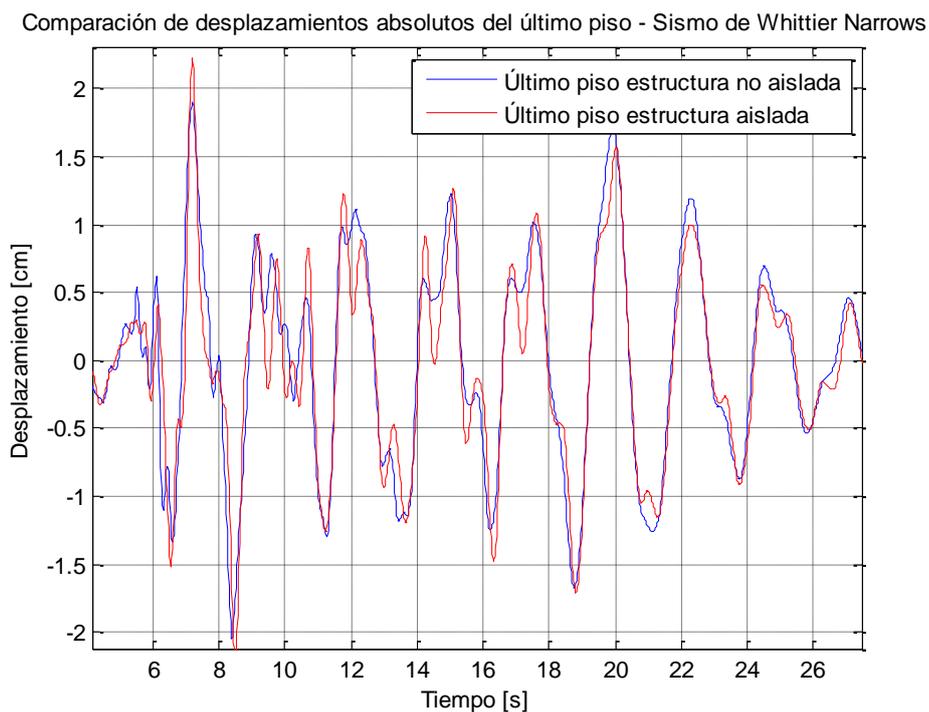


Figura5.6.2.4.4. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – Sismo de Whittier Narrows.

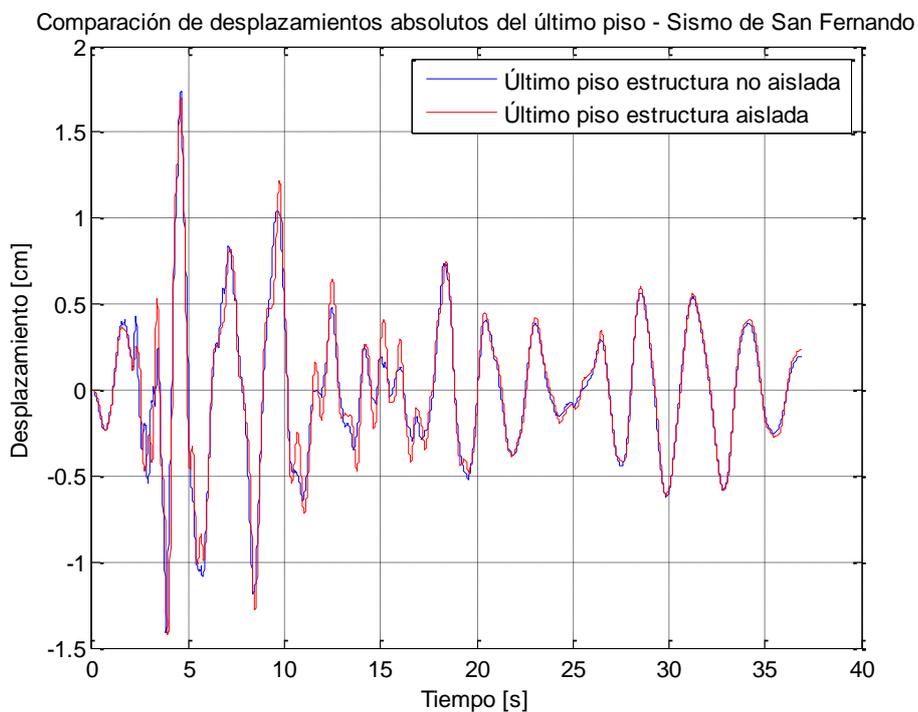


Figura5.6.2.4.5. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – Sismo de San Fernando.

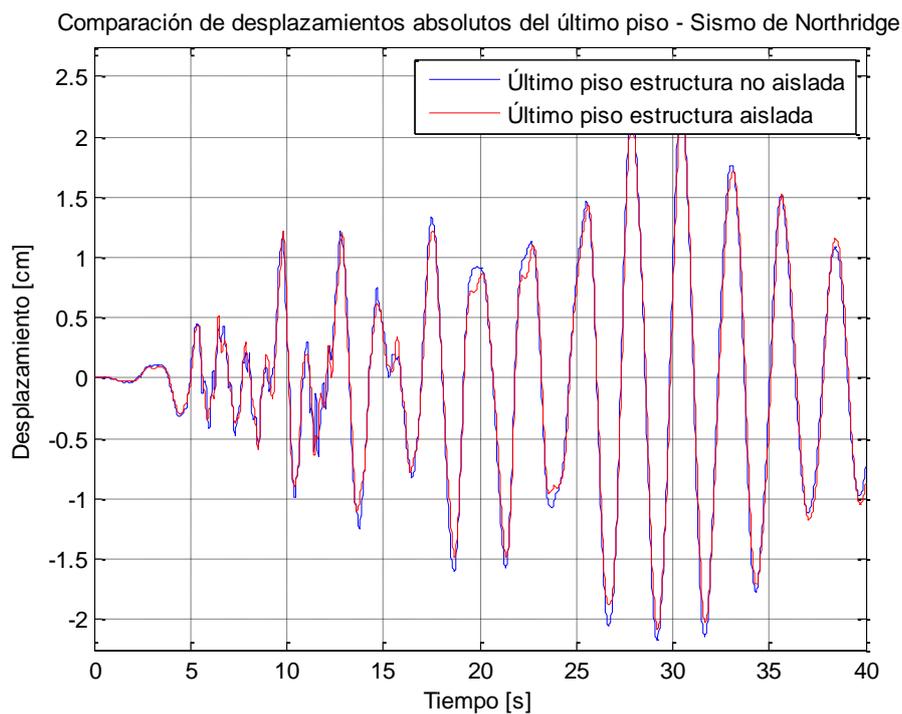


Figura5.6.2.4.6. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – Sismo de Northridge.

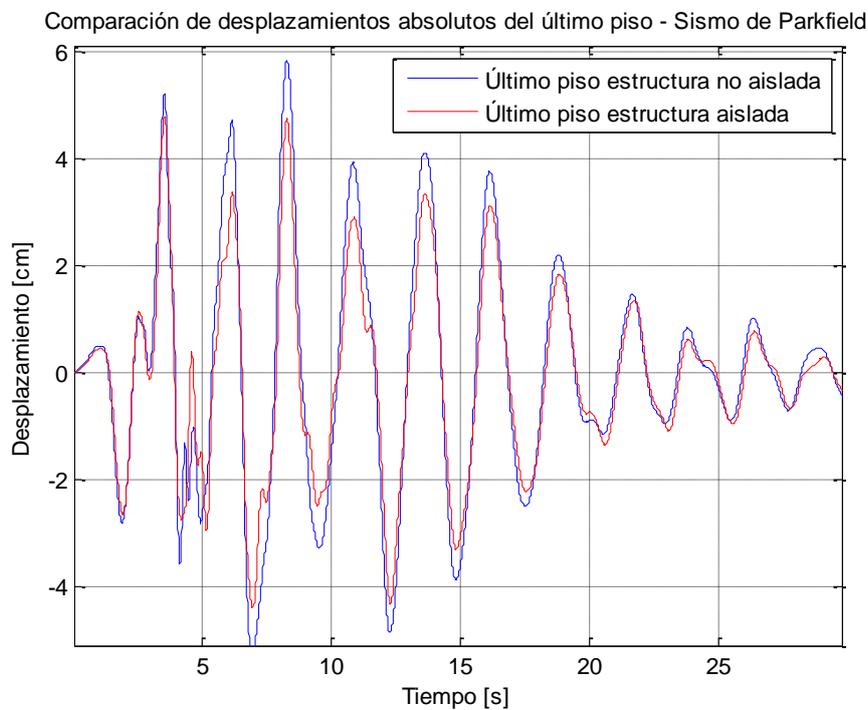


Figura5.6.2.4.7. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – Sismo de Parkfield.

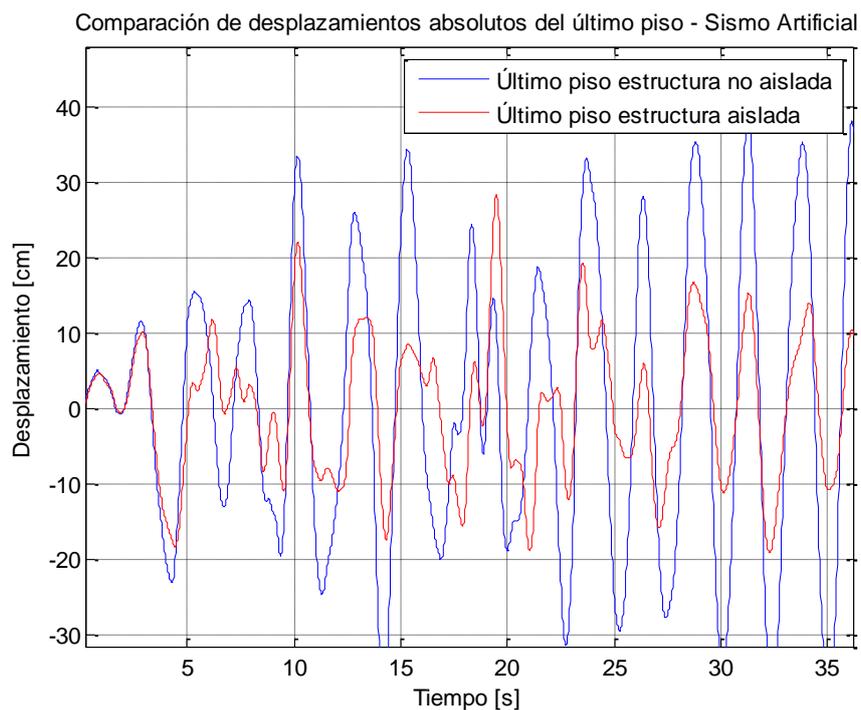


Figura5.6.2.4.8. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – Sismo Artificial.

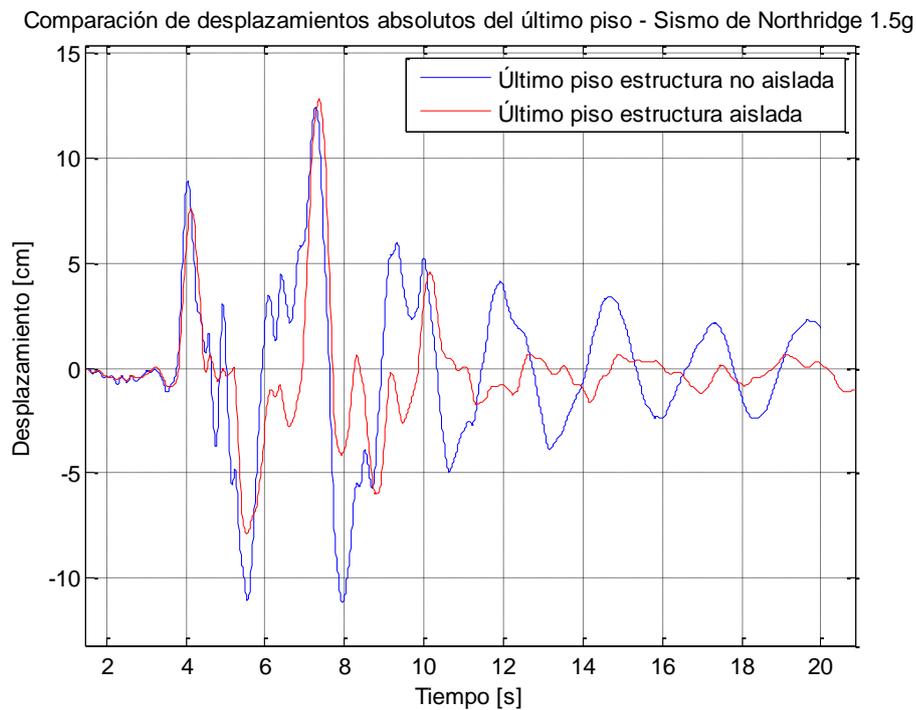
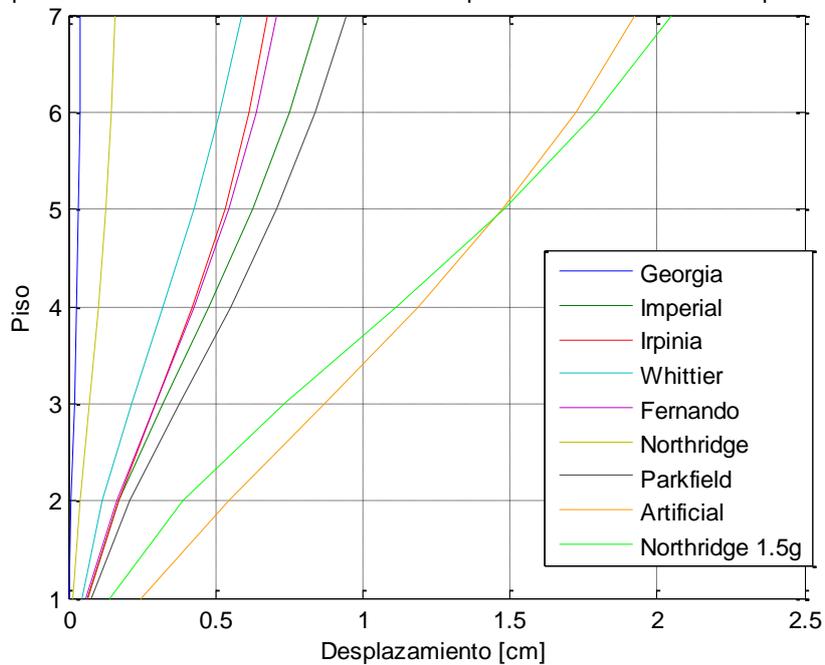


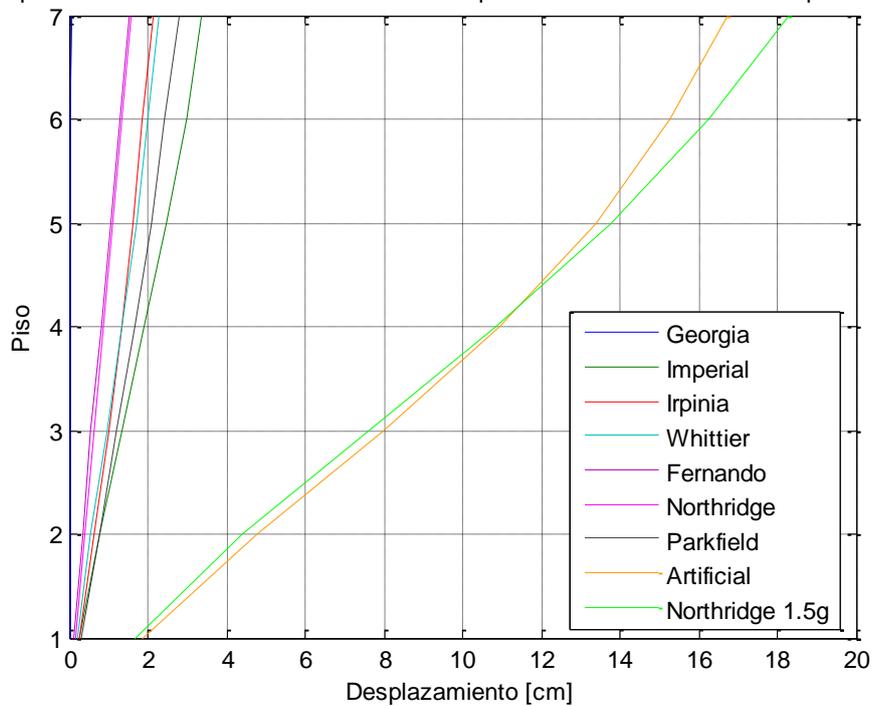
Figura5.6.2.4.9. Gráfico comparativo de desplazamientos absolutos horizontales de la estructura de período largo aislada y no aislada del último piso – Sismo de Northridge.

5.6.2.5. Desplazamientos máximos de cada piso del edificio de período corto y período largo

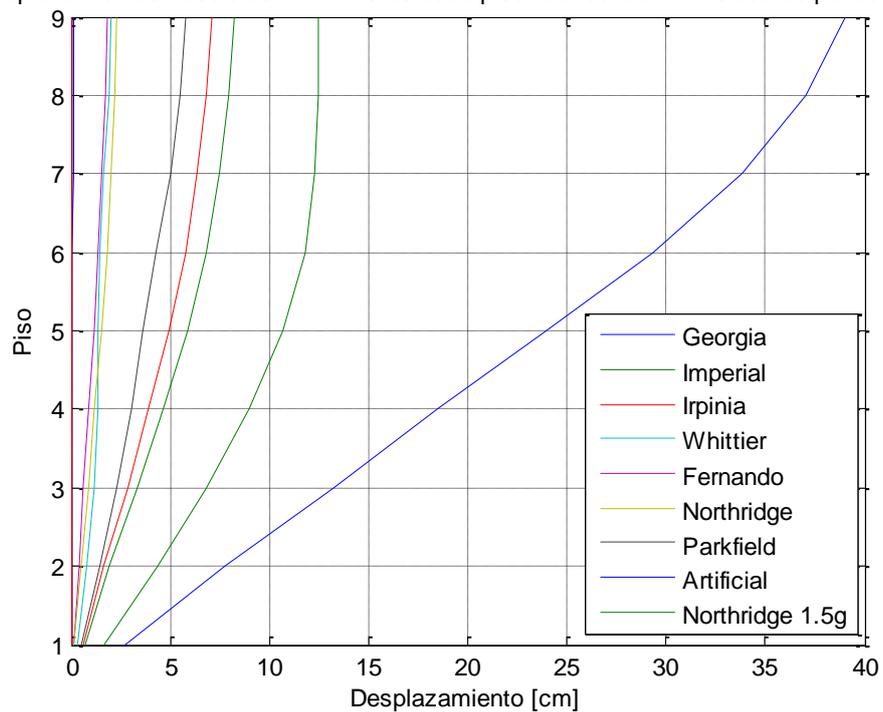
Desplazamientos absolutos máximos de cada piso. Estructura Aislada de periodo corto



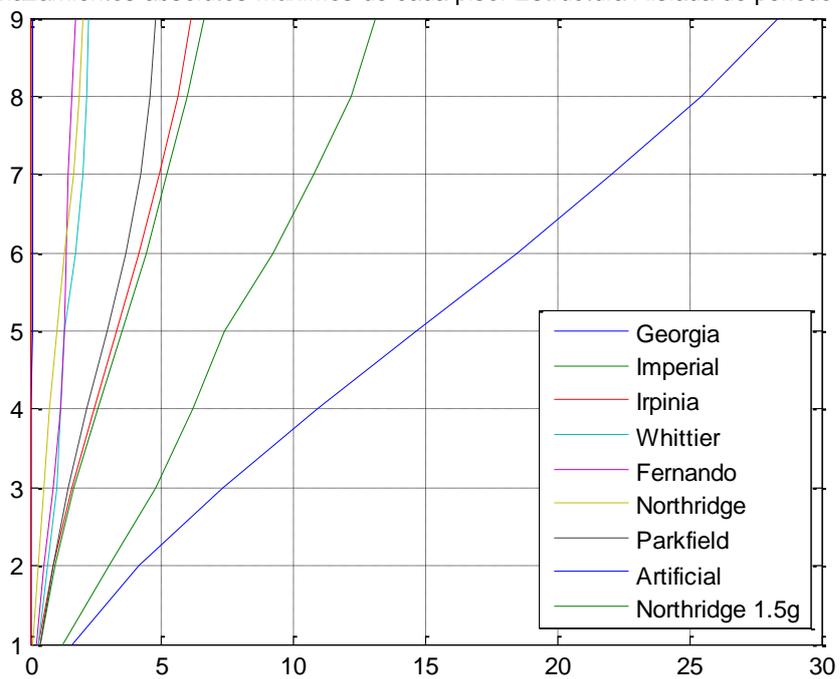
Desplazamientos absolutos máximos de cada piso. Estructura no aislada de periodo corto



Desplazamientos absolutos máximos de cada piso. Estructura no Aislada de período largo.



Desplazamientos absolutos máximos de cada piso. Estructura Aislada de período largo.



6. Conclusiones

Después del análisis de la respuesta dinámica de las dos estructuras, período largo y período corto, sin sistema de aislamiento de base y con sistema de aislamiento de base, se puede sacar varias conclusiones gracias a los resultados obtenidos. A continuación se menciona cada una de las conclusiones obtenidas del presente estudio en cuanto a aceleraciones, desplazamientos, contenido frecuencial y eficiencia del sistema de aislamiento de base.

En cuanto a la aceleración que adopta la estructura durante la acción sísmica, el edificio de período corto sin sistema de aislamiento de base amplifica la señal de ingreso, esto se pudo ver claramente en los resultados de la sección 5.5.1.1. En esta sección se obtuvo como resultado en 8 de los 9 registros analizados que la aceleración se amplifica con respecto a la aceleración del suelo. En el caso del sismo de Georgia, la aceleración del edificio es menor a la del suelo, esto ocurre debido al bajo contenido de energía del registro sísmico, lo que se puede verificar en la transformada de Fourier de esta señal, además, el pico del espectro de Fourier corresponde a frecuencias muy altas, las cuales están alejadas de la frecuencia de la edificación como se indica en la figura 5.2.1. En los demás registros sísmicos, la aceleración del suelo debida al terremoto fue amplificada por la estructura de período corto sin aislar. Esto ocurre debido a que, el período de la edificación tiene un valor cercano a la frecuencia de amplificación espectral de los registros analizados.

En los resultados de aceleración de la estructura de período corto sin aislar, también se observa el efecto de la resonancia en el sismo Artificial, en el cual, el valor de la aceleración que adopta la estructura es un valor amplificado, el cual es mucho mayor en comparación a los resultados de los demás registros. Este fenómeno ocurre debido a que, la

frecuencia natural de la edificación se encuentra muy cercana a uno de los picos del espectro de Fourier indicado en la figura 5.2.8, en el cual, se visualizan varios máximos debido a que, el algoritmo para obtener este registro artificial utiliza varias frecuencias para efectos de modelamiento y diseño sismo resistente.

En conclusión a los resultados de aceleración obtenidos de la edificación de período corto sin aislar, se puede decir que la edificación es apta para la aplicación de un sistema de disipación sísmica, ya que las aceleraciones de la estructura son mayores a las del suelo, y una de las características de estos sistemas de aislamiento elastomérico es la reducción de la aceleración de la edificación debido al sismo, como se ha detallado en el capítulo 1 de este documento.

Dado que la estructura de período corto presentó las condiciones ideales para el uso de sistemas de aislamiento sísmico, el uso de aisladores Bridgestone en la edificación dio como resultado aceleraciones más bajas. Esto sucede debido al incremento del período fundamental de la edificación dada la flexibilidad que aporta el sistema de aislamiento a la estructura. En este caso los valores de la aceleración disminuyen en los 9 registros sísmicos, en el caso de especial de Georgia, la respuesta de aceleración es menor a la del suelo y a la de la estructura no aislada. La reducción de la aceleración en el caso del sismo artificial es del 38% con respecto a la del suelo, la eficiencia del aislador es muy buena ya que en la estructura no aislada tenemos una aceleración que supera a la del suelo en un 265%, teniendo una disminución de aceleración entre la estructura aislada y no aislada del -83% lo que claramente nos indica que la edificación ya no se encuentra en la zona de peligro por efecto de la resonancia. En la tabla a continuación se indican los valores de incremento y decremento de la aceleración, junto con la variación entre la estructura aislada y no aislada.

Nombre de sismo	Estructura no Aislada	Estructura Aislada	Suelo	Porcentaje de disminución en aceleración de la estructura aislada	Amplificación de aceleración de estructura no aislada	Variación entre la estructura aislada y no aislada
Georgia	0,02	0,01	0,04	-87,71%	-54,79%	-73%
Imperial	0,36	0,14	0,17	-15,43%	112,89%	-60%
Irpinia	0,35	0,09	0,20	-54,34%	73,63%	-74%
Whittier N.	0,35	0,11	0,20	-46,83%	71,02%	-69%
San Fernando	0,31	0,10	0,19	-49,09%	62,66%	-69%
Northridge	0,35	0,02	0,23	-89,40%	49,98%	-93%
Parkfield	0,54	0,15	0,36	-57,19%	52,27%	-72%
Artificial	1,52	0,26	0,42	-37,58%	264,75%	-83%
Northridge 1.5g	2,11	0,36	1,58	-77,19%	33,77%	-83%

Tabla 6.1. Resumen de aceleraciones de la estructura de período corto.

Conforme a los resultados obtenidos en cuanto a aceleración de la estructura de período corto aislada, se puede decir con gran acierto que los sistemas de aislamiento de base funcionan eficientemente en estructuras de período corto en suelo firme.

Si bien obtuvimos resultados satisfactorios en la estructura de período corto, del análisis del edificio de período largo se obtuvieron resultados que desfavorecen el uso de sistemas de aislamiento sísmico en este tipo de edificaciones. La estructura de período largo sin aislamiento de base, tiene como característica el estar alejada de la zona de máximas aceleraciones espectrales, como se puede comprobar en las figuras de la sección 5.2 donde se indican los espectros de Fourier de cada uno de los registros sísmicos y las frecuencias de las edificaciones aisladas y no aisladas. Por esta razón, la aceleración que adopta la estructura debido al sismo es menor a la aceleración del suelo debido al incremento de la flexibilidad de la estructura. En la sección 5.5.1.2 se puede ver claramente que en todos los registros sísmicos la aceleración que adopta la estructura es menor a la

aceleración del suelo, por lo tanto, este tipo de comportamiento nos lleva a la conclusión que la estructura no necesita un sistema de aislamiento de base para reducir la aceleración de la estructura, ya que, por sus características lo hace por sí misma. Para comprobar esta afirmación se modeló la estructura de período largo con aisladores y se obtuvieron resultados desfavorables en cuanto a la eficiencia de los aisladores como se pudo observar en la sección 5.5.1.2 donde en todos los casos la aceleración de la estructura aislada es mayor a la aceleración de la estructura no aislada, resultado que no se busca con un sistema de aislamiento. Esto sucede debido a que, la señal de ingreso es modificada por el aislador en una señal de período más largo, y es esta señal amplificada en su período la que actúa sobre la edificación de período largo teniendo como resultado una aproximación de frecuencias, por lo tanto un amplificación en la aceleración.

Como conclusión final respecto a la aceleración que adopta la estructura debido al sismo, se puede decir que, en estructuras de período corto, el sistema de aislamiento de base elastomérico funciona eficientemente, ya que, el mismo reduce la aceleración que adopta la estructura a niveles inferiores a la aceleración del suelo, lo que da como resultado una gran disminución de los valores de aceleración de la estructura aislada en comparación a la no aislada.

Si bien la aceleración fue el primer caso de análisis de este documento, el desplazamiento de la estructura durante la acción sísmica también es un factor muy importante a considerar para el uso de estos sistemas aisladores. En el caso de la estructura de período corto sin aislar, los resultados obtenidos nos brindan una idea del comportamiento que la estructura puede tener ante eventos sísmicos de similares características. Para considerar el uso de aisladores de base, el análisis tiempo historia de

desplazamientos con varios registros sísmicos es beneficioso para el estudio del comportamiento de la estructura ante terremotos con distintas características de frecuencia, amplitud, tipo de suelo, tipo de origen del sismo, distancia a la que ocurre, etc. Entre mayor sea la cantidad de registros que se tomen en cuenta para el análisis, mayor es la seguridad que se puede brindar a la edificación, ya que, como se ha visto en los resultados del análisis tiempo historia, el desplazamiento que tiene la estructura no depende únicamente de la aceleración pico del terremoto, ya que en sismos de aceleraciones bajas tenemos deformaciones más grandes en comparación con registros de aceleraciones altas. En la siguiente tabla podemos ver claramente que, en sismos con aceleraciones bajas, como el terremoto de Imperial, tenemos desplazamientos más grandes que en sismos de aceleraciones altas, como Parkfield. Esto nos demuestra claramente que el valor de la aceleración máxima de un sismo, no es el único ni el principal factor para el diseño sismo resistente, sino, un conjunto de parámetros como son el tipo de suelo, el período de la edificación, aceleración máxima esperada entre otras. Este tipo de análisis se refleja claramente en las normas de construcción como la NEC 11 en sus espectros de diseño.

Nombre del evento	Aceleración del suelo [g]	Desplazamiento máximo de la estructura no aislada [cm]
Georgia	0.041	0.047
Imperial	0.169	3.376
Irpinia	0.199	2.151
Whittier N.	0.202	2.262
San Fernando	0.192	1.523
Northridge	0.234	1.57
Parkfield	0.357	2.793
Artificial	0.416	18.293
Northridge 1.5g	1.585	16.730

Tabla 6.2 Comparación entre aceleración máxima del suelo y desplazamiento máximo de la edificación de período corto.

Como se observó en los resultados obtenidos en el análisis de desplazamientos de la estructura no aislada de período corto, los registros con mayores desplazamientos son en el sismo de Northridge 1.5g y en el sismo artificial, los cuales nos dan como resultado deformaciones de 16.7cm y 18.3 cm respectivamente. Estos valores de deformación horizontal deben ser considerados para el diseño sismo resistente de la edificación, debido al tipo de uso que tendrá la edificación, ya que, al ser un hospital, las vibraciones deben ser mínimas, debido a que en este se van a realizar actividades que requieren gran precisión como una cirugía. Por esta razón se justifica y se recomienda el uso de aisladores elastoméricos en este tipo edificaciones. Dada la justificación del caso, y luego del análisis dinámico de la edificación de período corto con sistemas de asilamiento de base, se obtuvo una reducción considerable en las deformaciones de la estructura, en la tabla 6.2 podemos observar la eficiencia de este tipo de dispositivos aisladores. Dado a los excelentes resultados en cuanto a deformaciones se recomienda el uso de este tipo de sistemas de asilamiento de base, puntualmente, aisladores de base elastoméricos en estructuras de período corto sobre suelo firme.

Nombre del evento	Desplazamientos horizontal máximo de la estructura No aislada [cm]	Desplazamientos horizontal máximo de la estructura Aislada [cm]	Disminución de la deformación horizontal debido a los aisladores
Georgia	0,05	0,04	-10%
Imperial	3,38	0,85	-75%
Irpinia	2,16	0,68	-69%
Whittier N.	2,26	0,59	-74%
San Fernando	1,52	0,71	-54%
Northridge	1,57	0,16	-90%
Parkfield	2,79	0,94	-66%
Artificial	18,29	1,92	-89%
Northridge 1.5g	16,73	2,05	-88%

Tabla 6.3. Disminución de la deformación horizontal del edificio de período corto aislado.

De la misma manera, se realizó el análisis dinámico de desplazamientos de la estructura de período largo sin sistema de aislamiento de base, indicado en la sección 5.6.2. De este análisis se obtuvo que, la deformación horizontal que sufre la estructura es alta debido a la flexibilidad de la estructura. Este resultado indica la necesidad de aplicar un sistema de aislamiento sísmico en la edificación para reducir las deformaciones, sin embargo, en el presente estudio se demostró que el aplicar aisladores elastoméricos a la base del edificio no se reducen las deformaciones considerablemente como ocurrió en la estructura de período corto, por otro lado, en registros como los de Georgia, Whittier Narrows y Northridge 1,5g, la deformación es mayor en la estructura aislada. En la tabla 6.4 se puede verificar el rendimiento del sistema de aislamiento sísmico en la edificación de período largo y concluir que no se recomienda el uso de sistemas de aislamiento sísmico en estructuras de período largo debido a su ineficiencia en la reducción de deformaciones estructurales.

Nombre del evento	Desplazamiento máximo no aislado	Desplazamiento máximo absoluto aislado	Variación de desplazamientos debido al aislamiento
Georgia	0,12	0,13	2%
Imperial	8,22	6,61	-20%
Irpinia	7,08	6,11	-14%
Whittier Narrows	2,05	2,22	8%
San Fernando	1,87	1,70	-9%
Northridge	2,29	2,03	-11%
Parkfield	5,83	4,77	-18%
Artificial	39,01	28,35	-27%
Northridge 1.5g	12,43	13,12	6%

Tabla 6.4 Rendimiento del sistema de aislamiento elastomérico en la estructura de período largo.

Para visualizar de una mejor manera la conclusión a la que se llega en este estudio, en la tabla 6.5 se puede comparar la eficiencia de los aisladores de la estructura de período

largo y período corto, en la cual, claramente, se puede verificar que el rendimiento en la aplicación de aislamiento de base elastomérico en la estructura de período corto es mucho mayor al rendimiento de este tipo de aislamiento en estructuras de período largo.

Nombre del evento	Variación de deformación horizontal debido al aislamiento en la estructura de período corto	Variación de desplazamientos debido al aislamiento en la estructura de período largo.
Georgia	-10%	-2%
Imperial	-75%	20%
Irpinia	-69%	14%
Whittier N.	-74%	-8%
San Fernando	-54%	9%
Northridge	-90%	11%
Parkfield	-66%	18%
Artificial	-89%	27%
Northridge 1.5g	-88%	-6%

Tabla 6.5 Comparación de rendimientos en la variación de la deformación horizontal de la estructura debido al sistema de aislamiento de la estructura de período corto y largo.

Bibliografía

- Aguiar, R., Almazán, J., Dechent, P., & Suárez, V. (2008). *Aisladores de base elastoméricos y FPS*. Quito: ESPE.
- Avilés, M. (2001). *Dispositivos para el control de vibraciones*. Valdivia: Tesis para optar el título de Ingeniero Civil .
- Bridgestone. (Mayo de 2013). *Bridgestone*. Recuperado el 7 de Agosto de 2012, de http://www.bridgestone.com/products/diversified/antiseismic_rubber/product.html
- Design Characteristics of High Damping Rubber Bearing*. (Mayo de 2013). Recuperado el 7 de Agosto de 2012, de Bridgestone: http://www.bridgestone.com/products/diversified/antiseismic_rubber/pdf/H-RB2010_11.pdf
- García, L. (1998). *Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Kelly, T. (2001). *Base Isolation of structures*. Wellington.
- MAURER. (13 de Abril de 2013). Recuperado el 7 de Agosto de 2012, de http://www.maurer-soehne.com/structural_protection_systems/seismic_devices/isolators/
- Miduvi, Cámara de la Construcción de Quito. (2011). *Peligro Sísmico y Requisitos de Diseño Sismo Resistente*. Quito.
- Naeim, F. (1989). *The Seismic Desing Handbook*. Springer.
- Paz, M. (1992). *Dinámica Estructural*. Barcelona: Reverté S.A.
- Yépez, F. (10 de Enero de 2013). PdD.
- Yépez, F. (2001). Últimos avances en la evaluación del riesgo sísmico de Quito. *Gestión de riesgos y prevención de desastres* , 25.

ANEXO A

CATÁLOGO DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE

AISLADORES BRIDGESTONE

ANEXO B

CURVAS DE HISTÉRESIS DE LOS AISLADORES

ELASTOMÉRICOS EN CADA REGISTRO SÍSMICO

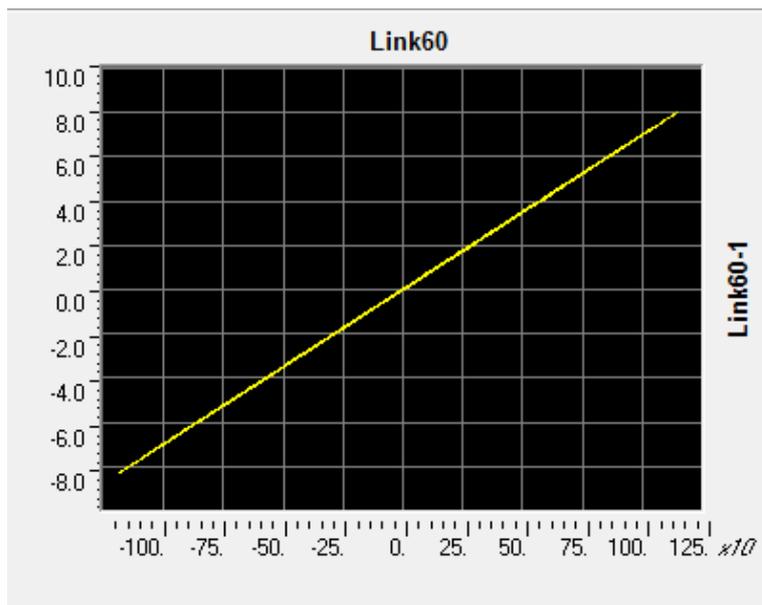


Figura 1B. Curva de histéresis del aislador de la edificación de período corto del sismo de Georgia. Eje vertical Fuerza de corte [kN], eje horizontal desplazamiento [cm]

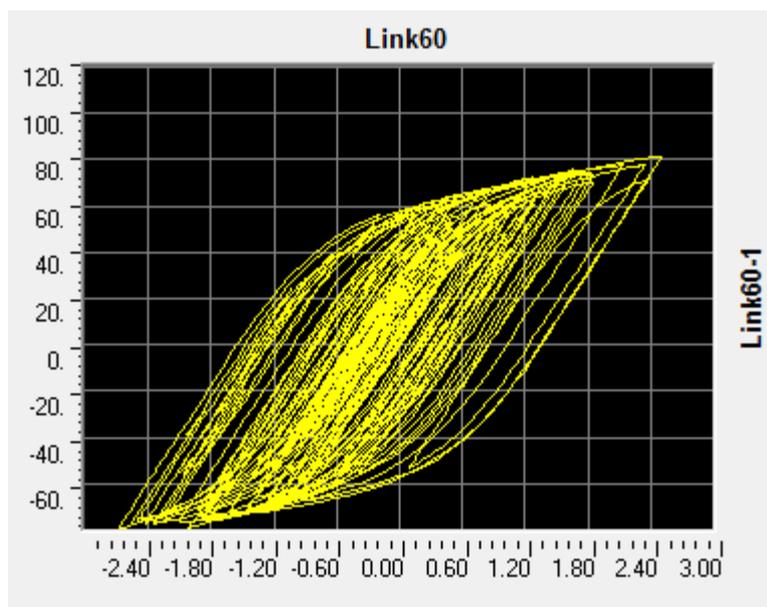


Figura 2B. Curva de histéresis del aislador de la edificación de período corto del sismo de Imperial. Eje vertical Fuerza de corte [kN], eje horizontal desplazamiento [cm]

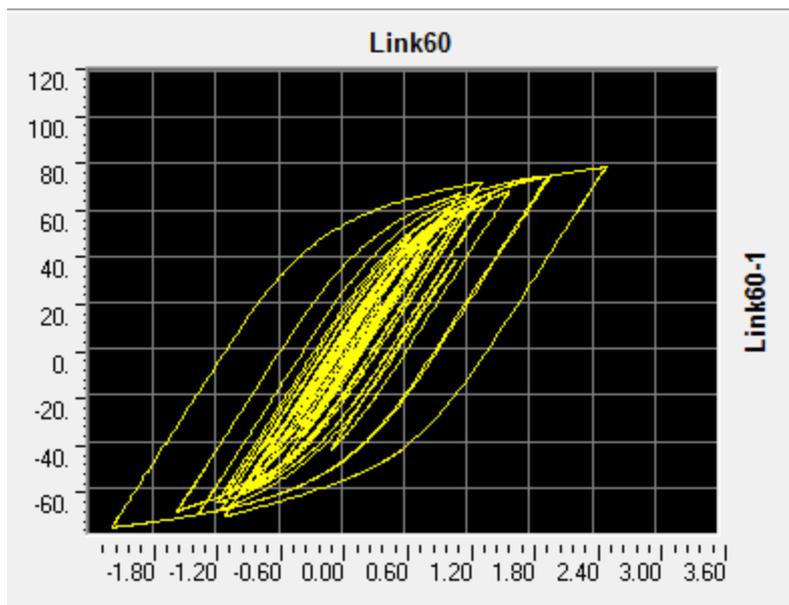


Figura 3B. Curva de histéresis del aislador de la edificación de período corto del sismo de Irpinia. Eje vertical Fuerza de corte [kN], eje horizontal desplazamiento [cm]

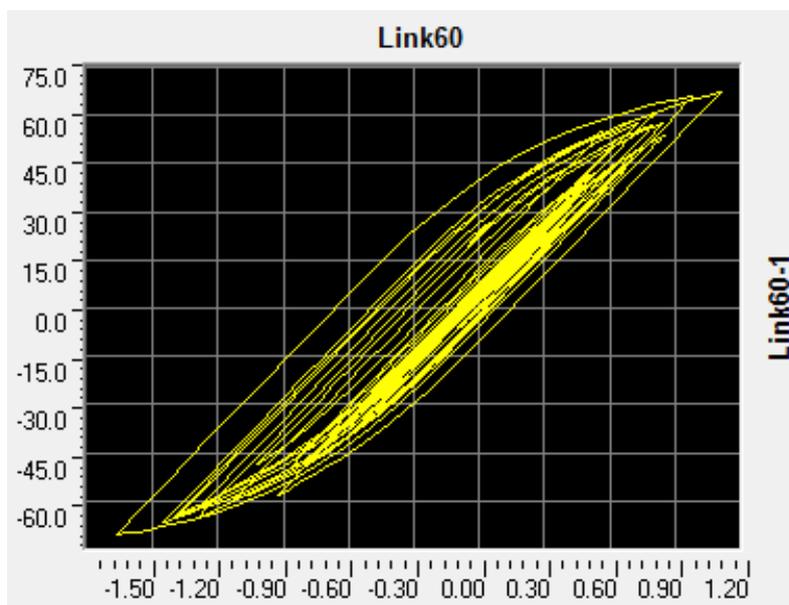


Figura 4B. Curva de histéresis del aislador de la edificación de período corto del sismo de Whittier Narrows. Eje vertical Fuerza de corte [kN], eje horizontal desplazamiento [cm]

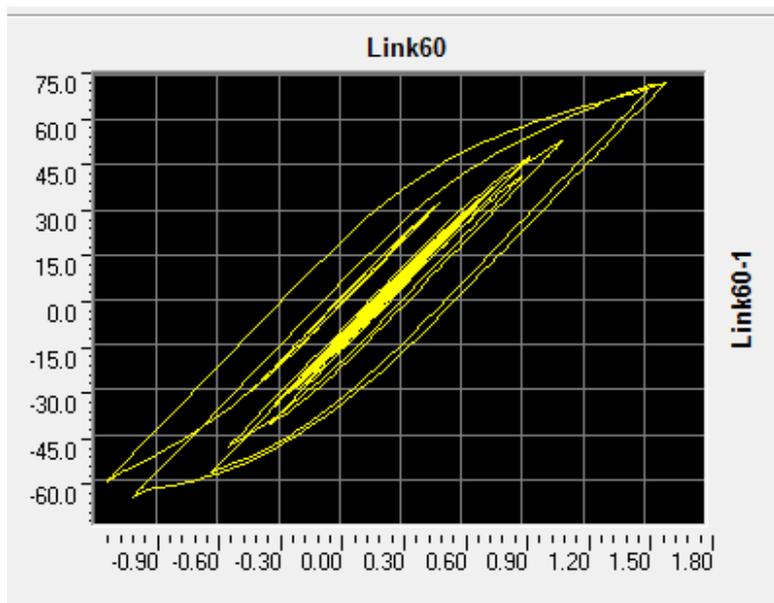


Figura 5B. Curva de histéresis del aislador de la edificación de período corto del sismo de San Fernando. Eje vertical Fuerza de corte [kN], eje horizontal desplazamiento [cm]

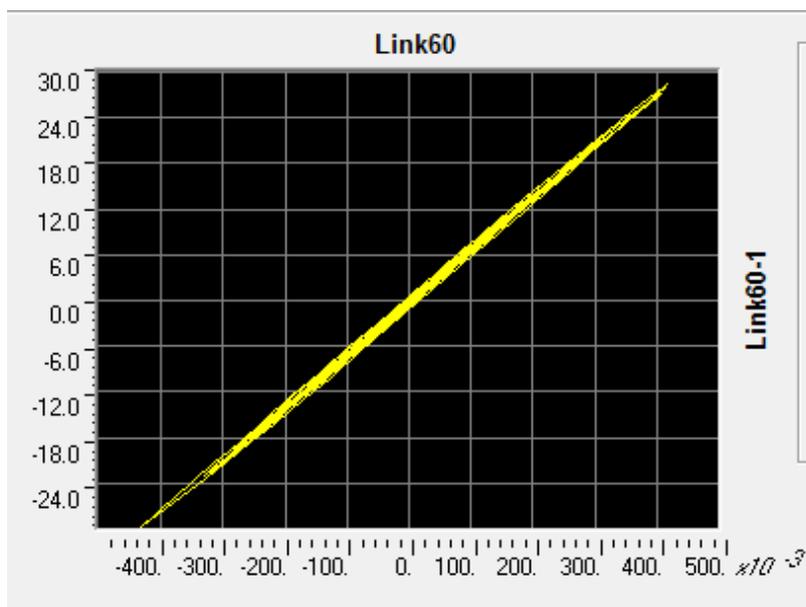


Figura 6B. Curva de histéresis del aislador de la edificación de período corto del sismo de Northridge. Eje vertical Fuerza de corte [kN], eje horizontal desplazamiento [cm]

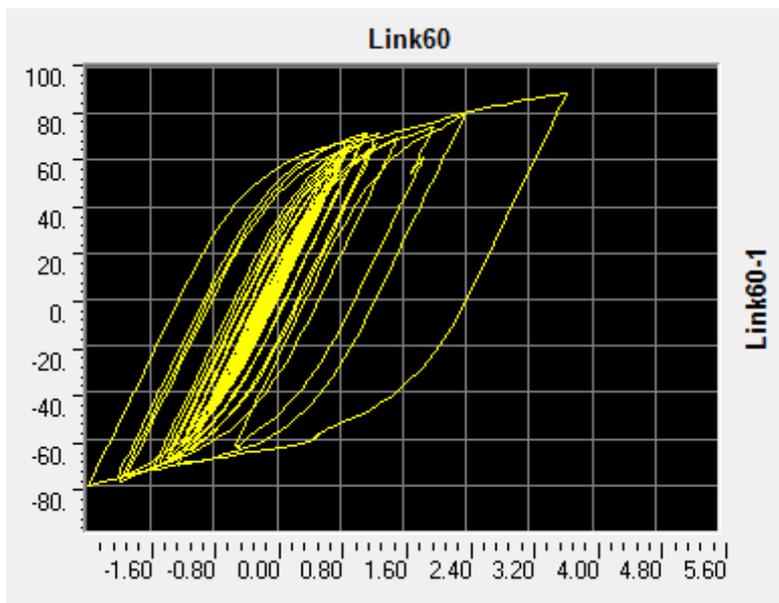


Figura 7B. Curva de histéresis del aislador de la edificación de período corto del sismo de Parkfield. Eje vertical Fuerza de corte [kN], eje horizontal desplazamiento [cm]

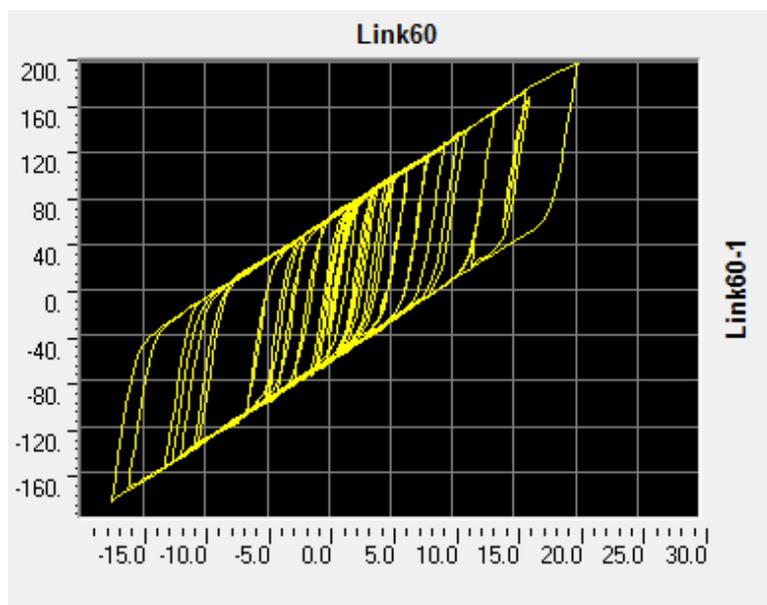


Figura 8B. Curva de histéresis del aislador de la edificación de período corto del sismo Artificial. Eje vertical Fuerza de corte [kN], eje horizontal desplazamiento [cm]

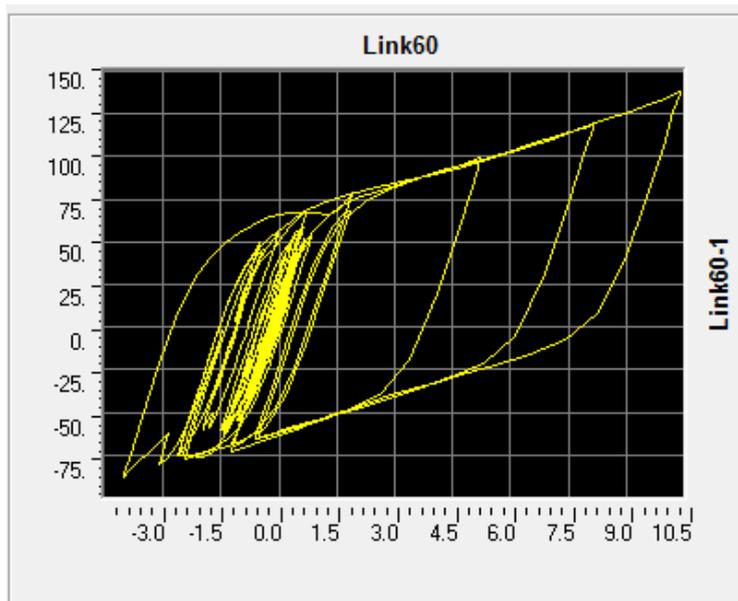


Figura 9B. Curva de histéresis del aislador de la edificación de período corto del sismo Northridge 1.5g. Eje vertical Fuerza de corte [kN], eje horizontal desplazamiento [cm]

ANEXO C

MAPA DE PELIGRO SÍSMICO DEL ECUADOR - NEC 11

