



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**METODOLOGÍA ALTERNATIVA PARA DISEÑO DE SISTEMAS DE AISLACIÓN
SÍSMICA BASADO EN OPTIMIZACIÓN DE DESEMPEÑO SÍSMICO**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN
INGENIERÍA ESTRUCTURAL, SÍSMICA Y GEOTÉCNICA

GABRIEL EDUARDO GÓMEZ RUGEL

PROFESOR GUÍA:
RODRIGO RETAMALES SAAVEDRA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FABIÁN ROJAS BARRALES
RAFAEL RUIZ GARCÍA

SANTIAGO DE CHILE

2020

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL GRADO

DE: Magister en Ciencias de la Ingeniería, Mención Ingeniería Estructural, Sísmica y Geotécnica

POR: Gabriel Eduardo Gómez Rugel

FECHA: 27/01/2020

PROF. GUÍA: Dr. Rodrigo Retamales Saavedra.

METODOLOGÍA ALTERNATIVA PARA DISEÑO DE SISTEMAS DE AISLACIÓN SÍSMICA BASADO EN OPTIMIZACIÓN DE DESEMPEÑO SÍSMICO

El diseño de sistemas de aislación sísmica en Chile y el mundo se basa en una combinación de métodos prescriptivos definidos en las normativas vigentes, como NCh2745 en Chile y ASCE/SEI 7 en EEUU; procedimientos teóricos y conocimiento empírico, basado en la extensa serie de ensayos efectuados en los últimos 40 años sobre aisladores sísmicos de distinto tipo. Sin embargo, los procedimientos actuales, si bien conservadores, pueden resultar en diseños con comportamientos subóptimos o inesperados. Dichos métodos de diseño se basan en el uso de parámetros de rigidez efectiva (K_{eff}) y amortiguamiento viscoso equivalente (β_{eff}), dependientes de las propiedades de los materiales, geometría de los aisladores y del nivel de deformación esperado del sistema. La experiencia observada durante eventos sísmicos de gran magnitud ocurridos a nivel mundial en los últimos 10 años muestra que las deformaciones de los sistemas de aislación, así como las aceleraciones registradas en las estructuras, difieren en muchos casos sustancialmente de los valores anticipados por las normativas vigentes y procedimientos de análisis actualmente considerados. Por esta razón, se propone una metodología que considera nuevos parámetros para el diseño de sistemas de aislación sísmica. El proceso utiliza espectros no lineales de aceleración absoluta y deformación del sistema de aislación (ADRS), los cuales se derivan de los parámetros fundamentales genéricos del sistema de aislación, dados por la resistencia característica (Q_d) y la rigidez post-fluencia (K_p). Ambos parámetros pueden ser seleccionados directamente por el diseñador, dado que son independientes de la respuesta de desplazamientos, motivo por el cual son preferibles sobre los actualmente utilizados.

Las demandas sísmicas consideradas para la selección del sistema de aislación son estimadas mediante análisis no lineal de respuesta en el tiempo de sistemas de 1 GDL utilizando registros sísmicos reales no escalados y escalados a los espectros de demanda de las normativas de referencia, considerando distintas técnicas de escalamiento. La metodología ha sido anteriormente investigada para la evaluación de diseños de aisladores sísmicos desarrollados en países como Nueva Zelanda, Estados Unidos, Canadá y Turquía.

El presente estudio demuestra la eficiencia de la metodología propuesta como un proceso complementario al diseño normativo de estructuras con sistemas de aislación sísmica, a fin de mejorar la predicción de la respuesta sísmica y desempeño de las estructuras con aislación sísmica de base.

Se agradecido por tu esposa
y date cuenta del favor que
has recibido de Dios.

A mi esposa Gabriela

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa Gabriela por ser mi apoyo incondicional dándome las fuerzas y motivación necesaria durante esta travesía.

A mis padres Gabriel y Fanny, que siempre han sido el pilar fundamental de mi vida, enseñándome cada día a ser una mejor persona y alcanzar cualquier meta que me proponga. Estoy muy agradecido con Dios por tenerlos como mis padres.

A mis hermanos Ricardo y Stephanie, que a pesar de la distancia, hemos jugado, reído y especialmente brindado apoyo mutuo.

A mi familia política por estar siempre pendiente de mi esposa y de mí y en especial a mí cuñada Kristina quien nos ha brindado mucho apoyo emocional, y a quien considero una hermana.

A los amigos que me dio este magister, que con el tiempo pude llamarlos hermanos: Mariale, Abraham, Lucho, Roberto, Pedro Pablo, Jaime, Paul, Alejandro y Dayanna. Gracias por compartir conmigo estos años, siempre estarán presentes a pesar de la distancia.

A mi profesor guía Rodrigo Retamales, por saber guiarme a lo largo de esta investigación, respondiendo todas mis dudas, no importa la hora o el lugar y por ser un excelente docente. Sin duda alguna un ejemplo a seguir. A mis profesores Fabián Rojas y Rafael Ruiz, por haberme ayudado en el magister durante las clases y el desarrollo de esta tesis.

A la Universidad de Chile por brindarme una educación de calidad.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Motivación	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. General.....	4
1.3.2. Específicos	4
1.4. Metodología.....	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA	7
2.1. Sistemas de aislación sísmica de base.....	7
2.2. Normativas y estándares aplicables al diseño de sistemas de aislación sísmica.	9
2.2.1. Normativas internacionales para el diseño de sistemas de aislación sísmica	10
2.2.1.1. Uso e implementación normativa en EEUU.....	11
2.2.1.2. Normativa utilizada en Europa (EUROCODE).....	12
2.2.1.3. Normativa en la región Latinoamericana	13
2.2.2. Normativa Nacional Chilena NCh2745 “Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica”.....	14
2.3. Diseño de sistemas de aislación sísmica.....	15
2.4. Objetivos de desempeño normativo.....	16
2.4.1. Estructuras convencionales	19
2.4.2. Estructuras con aislación sísmica	19
2.5. Comportamiento de estructuras con sistemas de aislación sísmica de base observado durante eventos sísmicos severos	20
3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA EN ESTUDIO SISMICAMENTE AISLADA	22
3.1. Diseño de estructura de base fija.....	22
3.1.1. Descripción de la estructura	22
3.1.2. Análisis Sismorresistente.....	24
3.2. Diseño del sistema de aislación sísmica.....	27
3.2.1. Aplicaciones generales de la norma NCh2745:2013 a la estructura	28
3.2.2. Procedimiento de diseño	30
3.2.3. Desempeño sísmico de la estructura aislada.....	34
4. METODOLOGÍA ADRS	42
4.1. Descripción de la metodología ADRS	42
4.2. Parámetros óptimos del sistema de aislación sísmica que utiliza la metodología ADRS	45

4.2.1.	Parámetros óptimos de corte basal	45
4.2.2.	Límites para la resistencia característica (Qd)	50
4.2.3.	Periodo límite para metodología ADRS	54
5.	DEMANDAS SÍSMICAS PARA EVALUACIÓN DEL DISEÑO	59
5.1.	Selección de registros sísmicos.....	59
5.1.1.	Base de datos RENADIC.....	62
5.1.2.	Variables consideradas en selección de registros sísmicos.....	64
5.1.3.	Medidas de intensidad del movimiento del suelo	64
5.2.	Número de registros sísmicos a utilizar	66
5.3.	Métodos de escalamiento de registros sísmicos.....	68
5.3.1.	Escalamiento espectral.....	69
5.3.1.1.	Escalamiento en el dominio de la frecuencia.....	70
5.3.1.2.	Escalamiento en el dominio del tiempo	71
5.3.2.	Escalamiento con factor de escala constante	76
5.4.	Espectros objetivo para escalamiento de registros	80
5.4.1.	Espectro objetivo: Sismo Máximo Posible (SMP) de la norma NCh2745	80
5.4.2.	Espectro objetivo: Espectro Medio Condicional (EMC)	81
5.4.2.1.	Introducción	81
5.4.2.2.	Espectro Medio Condicional (EMC)	82
5.4.2.2.1.	Modelo de atenuación.....	84
5.4.2.2.2.	Diferencia de amplitud espectral	85
5.4.2.2.3.	Factores de correlación.....	86
5.4.2.3.	Cálculo del Espectro Medio Condicional	87
5.4.2.3.1.	Espectro de Amenaza Uniforme (UHS) y Sismo Máximo Posible (SMP)	88
5.4.2.3.2.	Modelo de atenuación para valores de M y R	89
5.4.2.3.3.	Espectro Medio Condicional.....	91
5.5.	Aplicaciones de los registros sísmicos en el modelo estructural	92
5.6.	Interpretaciones en la estimación de la respuesta estructural.....	93
6.	PROCEDIMIENTOS DE MODELACIÓN PARA APLICACIÓN DE METODOLOGIA ADRS	95
6.1.	Modelamiento de amortiguamiento en análisis no lineal de respuesta en el tiempo....	95
6.1.1.	Sistemas con amortiguamiento.....	96
6.1.2.	Construcción de la matriz de amortiguamiento	97
6.1.2.1.	Matriz de amortiguamiento.....	97
6.1.2.2.	Tasa de amortiguamiento (β_i).....	97

6.1.2.2.1.	Tasa de amortiguamiento a partir de procedimiento teórico.....	98
6.1.2.2.2.	Tasa de amortiguamiento a baja deformación obtenida a partir de datos experimentales.....	99
6.1.2.3.	Matriz de amortiguamiento clásico.....	107
6.1.2.3.1.	Amortiguamiento de Rayleigh.....	107
6.1.2.4.	Matriz de amortiguamiento no clásico.....	111
6.1.3.	Modelación del amortiguamiento usando Rayleigh.....	112
6.1.3.1.	Amortiguamiento de Rayleigh para sistemas elásticos.....	113
6.1.3.2.	Amortiguamiento de Rayleigh para sistemas inelásticos.....	114
6.1.3.2.1.	Efecto del cambio global de rigidez en estructuras modeladas con amortiguamiento de Rayleigh.....	115
6.1.4.	Modelación del amortiguamiento usando amortiguamiento viscoso e hysterético.....	118
6.1.4.1.	Componente hysterética.....	119
6.1.4.2.	Componente viscosa.....	120
6.2.	Modelamiento hysterético.....	120
6.2.1.	Modelo hysterético Bi-lineal.....	120
6.2.2.	Modelo hysterético Bouc-Wen.....	121
6.3.	Método de integración numérico.....	123
6.3.1.	Método de Newmark.....	124
6.3.2.	Método de Hilber, Hughes y Taylor.....	125
6.3.3.	Método alpha generalizado.....	127
6.4.	Relación entre la rigidez inicial y la rigidez post-fluencia.....	128
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	130
7.1.	Análisis de sensibilidad de los parámetros de la metodología ADRS.....	130
7.2.	Selección de parámetros para la metodología ADRS.....	156
7.3.	Diseño del sistema de aislación para los parámetros óptimos de la metodología ADRS.....	157
7.4.	Análisis de desempeño.....	162
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	168
8.1.	Resumen y Conclusiones.....	168
8.2.	Recomendaciones y líneas futuras de investigación.....	174
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	176
10.	ANEXOS.....	182
10.1.	Anexo A. Valores de frecuencias f_i , f_p , f_{eff} obtenidas a partir de las rigideces inicial, post-	

fluencia y efectiva respectivamente para la Transformada de Fourier de los registros de Angol, Constitución y Talca.....	182
10.2. Anexo B. Tasa de amortiguamiento de aisladores sísmicos obtenidos a partir de ensayos de laboratorio a bajas deformaciones.....	200
10.3. Anexo C. Tasa de amortiguamiento aisladores sísmicos obtenidos a partir de registros sísmicos.....	208
10.4. Anexo D. Análisis de sensibilidad	212
10.5. Anexo E. Gráficos ADRS.....	226

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Niveles de demanda sísmica. Fuente: Medina y Music (2018)	18
Tabla 2.2 Matriz de objetivos de diseño, Vision 2000 (SEAOC, 1995)	18
Tabla 2.3 Valores de desplazamiento máximo para distintos niveles de desempeño objetivo. .	19
Tabla 2.4 Registros sísmicos observados de edificios con sistemas de aislación sísmica durante el terremoto de Tohoku, Japón 2011. Fuente: Takayama & Morita 15WCEE-403	21
Tabla 3.1 Cargas muertas y vivas distribuidas en la estructura.....	22
Tabla 3.2 Factores de Reducción para cada tipo de Solicitación	23
Tabla 3.3 Peso sísmico de la estructura por pisos.	24
Tabla 3.4 Factores de reducción de respuesta en ambas direcciones de análisis.	25
Tabla 3.5 Relación de masa participativa por cada modo de la estructura.....	26
Tabla 3.6 Parámetros para estructuras aisladas definidos en la norma NCh2745	29
Tabla 3.7 Propiedades, geometría y parámetros del aislador	31
Tabla 3.8 Propiedades efectivas obtenidas a partir de los parámetros del aislador	31
Tabla 3.9 Datos de desplazamientos a partir del modelo en el software de análisis estructural.	32
Tabla 3.10 Verificación del aislador	33
Tabla 3.11 Parámetros para las secciones críticas	35
Tabla 3.12 Características de los registros empleados en el análisis.....	35
Tabla 3.13 Respuesta de Aceleraciones, Desplazamientos y Derivas de Entrepiso de la estructura aislada.	40
Tabla 3.14 Respuesta de Aceleraciones, Desplazamientos y Derivas de Entrepiso de la estructura de base fija.	40
Tabla 3.15 Porcentajes de reducción en Aceleraciones, Desplazamientos y Drifts para cada piso al comparar la estructura de base fija y la estructura aislada.	41
Tabla 4.1 Valores de A_0	51
Tabla 4.2 Valores de resistencia característica óptima ($\%W_s$) mediante amortiguamiento óptimo para $T_2 = 3$ y 4 seg para distintas zonas sísmicas y tipos de suelo.	54
Tabla 4.3 Valores máximos de periodo post-fluencia para zona sísmica y tipo de suelo específico	58
Tabla 4.4 Valores de resistencia característica óptima ($\%W_s$) para T_2 entre 2 y 5 seg para distintas zonas sísmicas y tipos de suelo señalando los límites de periodo máximo.....	58
Tabla 5.1 Registros sísmicos procesados.....	63
Tabla 5.2 Especificaciones para la selección de registros sísmicos para diferentes normativas.	67
Tabla 5.3 Factores de escala para los registros según su selección y el espectro objetivo al cual	

son escalados.....	80
Tabla 5.4 Valores de Magnitud de Momento y Distancia a la Ruptura para el periodo de interés.	89
Tabla 6.1 Datos de ensayo de aislador a bajas deformaciones.	100
Tabla 6.2 Valores de amortiguamiento obtenidos de los ensayos de los 15 aisladores sísmicos.	101
Tabla 6.3 Propiedades modales de la estructura prototipo	116
Tabla 6.4 Matriz de Rigidez utilizada en los distintos análisis.	117
Tabla 7.1 Valores promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (VSWS) en función del número de registros sísmicos, para todos los valores de Qd y $T2$	135
Tabla 7.2 Valores de desviación estándar de los promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (VSWS) en función del número de registros sísmicos, para todos los valores de Qd y $T2$	136
Tabla 7.3 Valores promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (VSWS) en función de la selección de registros sísmicos, para todos los valores de Qd y $T2$	137
Tabla 7.4 Valores de desviación estándar de los promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (VSWS) en función de la Selección de registros sísmicos, para todos los valores de Qd y $T2$	138
Tabla 7.5 Valores promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (VSWS) en función del modelo histerético, para todos los valores de Qd y $T2$	139
Tabla 7.6 Valores de desviación estándar de los promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (VSWS) en función del modelo histerético, para todos los valores de Qd y $T2$	140
Tabla 7.7 Valores promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (VSWS) en función del método de escalamiento, para todos los valores de Qd y $T2$	142
Tabla 7.8 Valores de desviación estándar de los promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (VSWS) en función del método de escalamiento, para todos los valores de Qd y $T2$	143
Tabla 7.9 Valores promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (VSWS) en función del espectro objetivo, para todos los valores de Qd y $T2$	146
Tabla 7.10 Valores de desviación estándar de los promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (VSWS) en función del espectro objetivo, para todos los valores de Qd y $T2$	147
Tabla 7.11 Valores promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (VSWS) en función de la relación entre la rigidez inicial y post fluencia, para todos los valores de Qd y $T2$.	

.....	149
Tabla 7.12 Valores de desviación estándar de los promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (VSWS) en función de la relación entre la rigidez inicial y post fluencia, para todos los valores de Qd y $T2$	150
Tabla 7.13 Valores promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (VSWS) en función del método de integración numérico, para todos los valores de Qd y $T2$	153
Tabla 7.14 Valores de desviación estándar de los promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (VSWS) en función del método de integración numérico, para todos los valores de Qd y $T2$	154
Tabla 7.15 Propiedades y Geometría del aislador	159
Tabla 7.16 Propiedades efectivas para el análisis lineal	160
Tabla 7.17 Verificación del aislador	161
Tabla 7.18 Parámetros de Aceleración, Desplazamiento y Drifts de la estructura aislada diseñada por el método convencional.	166
Tabla 7.19 Parámetros de Aceleración, Desplazamiento y Drifts de la estructura aislada diseñada por la metodología ADRS.	166

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Comparación de respuesta sísmica de edificio sin/con aislación sísmica de base. Fuente: Documentos Técnicos No 29 (CChC, 2011)	7
Figura 2.2 Numero de edificios sísmicamente aislados en Japón. Fuente: Takayama y Morita (2011).	10
Figura 2.3 Proceso para el diseño de un sistema de aislación sísmica mediante un análisis modal espectral.	16
Figura 2.4 Relación entre desplazamientos del sistema de aislación con respecto a la distancia epicentral de las estructuras para el terremoto de Tohoku M_w 9.0 de 2011.....	21
Figura 3.1 Espectro elástico de aceleraciones de NCh433.Of96	23
Figura 3.2 Diagrama de la estructura hospitalaria de estudio.....	25
Figura 3.3 Curvas de los Drifts entre piso con respecto a la altura de la estructura para los sismos en X e Y.....	27
Figura 3.4 Estructura hospitalaria prototipo con aisladores sísmicos en su base.	28
Figura 3.5 Espectro Sismo Máximo Posible de la norma NCh2745	30
Figura 3.6 Esquema de la configuración del aislador.	34
Figura 3.7 Registro de aceleraciones empleados en el análisis	36
Figura 3.8 Espectro de aceleraciones de los registros empleados en el análisis.	36
Figura 3.9 Izquierda: Aceleraciones máximas para la estructura de base fija. Derecha: Aceleraciones máximas para la estructura aislada.	37
Figura 3.10 Izquierda: Desplazamientos máximos para la estructura de base fija. Derecha: Desplazamientos máximos para la estructura aislada.....	38
Figura 3.11 Izquierda: Derivas de entrepiso para la estructura de base fija. Derecha: Derivas de entrepiso para la estructura aislada.	38
Figura 3.12 Superior: Incursiones inelásticas en vigas y columnas para la estructura de base fija. Inferior: Incursiones inelásticas en vigas y columnas para la estructura aislada.	39
Figura 4.1 Ejemplo de Espectro ADRS	44
Figura 4.2 Relación entre el Corte Basal, Amortiguamiento y Periodo Post-Fluencia para un suelo tipo B y zona sísmica 3.	47
Figura 4.3 Relación entre el Corte Basal, Resistencia Característica y Periodo Post-Fluencia para un suelo tipo B y zona sísmica 3.....	50
Figura 4.4 Valores de periodo post-fluencia máximos para valores de amortiguamiento efectivo y para un tipo de suelo específico.....	56
Figura 4.5 Relación entre el amortiguamiento efectivo y el periodo post-fluencia para distintas combinaciones de zona sísmica y tipo de suelo.....	57

Figura 5.1 FAS para la componente este-oeste de la estación de Arica para determinar valor de f_{max} y valor preliminar de f_{min}	60
Figura 5.2 Lado Izquierdo: Registro de aceleración, velocidad y desplazamiento respectivamente sin corregir. Lado Derecho: Registro de aceleración, velocidad y desplazamiento respectivamente corregidos.....	62
Figura 5.3 Ubicación de epicentros de terremotos y estaciones de registro de sismos.....	63
Figura 5.4 Superior: Registro de aceleraciones de la estación C18O en la dirección Este-Oeste. Inferior Izquierda: Espectro de aceleraciones del registro C18O. Inferior Derecha: Intensidad de Arias normalizada del registro C18O	66
Figura 5.5 Escalamiento en el dominio de la frecuencia de un registro sísmico a un espectro objetivo.	71
Figura 5.6 Escalamiento en el dominio del tiempo de un registro sísmico a un espectro objetivo.	75
Figura 5.7 Espectro de ductilidad constante para $\mu=30$	76
Figura 5.8 Valores de frecuencias f_i , f_p y f_{eff} obtenidas a partir de las rigideces inicial, post-fluencia y efectiva respectivamente para la Transformada de Fourier del registro de Angol escalado en el dominio del tiempo del terremoto del Maule del 27 de febrero de 2010.....	77
Figura 5.9 Superior Izquierda: Promedio de los espectros SRSS de los registros seleccionados aleatoriamente escalados al SMP. Superior Derecha: Promedio de los espectros SRSS de los registros seleccionados aleatoriamente escalados al EMC. Inferior Izquierda: Promedio de los espectros SRSS de los registros seleccionados por Intensidad de Arias escalados al SMP. Inferior Derecha: Promedio de los espectros SRSS de los registros seleccionados por Intensidad de Arias escalados al EMC.....	79
Figura 5.10 Espectro objetivo Sismo Máximo Posible de la norma NCh2745.	81
Figura 5.11 Valores de ε para un valor de periodo condicionante usando el modelo de atenuación de Abrahamson et al. (2012). Izquierda: Ordenadas en g. Derecha: Ordenadas en logaritmo natural del espectro, $\ln(S_a)$	86
Figura 5.12 Espectro de Amenaza Uniforme para un periodo de retorno de 2475 años.	88
Figura 5.13 Sismo Máximo Posible para zona sísmica 3 y suelo tipo B.	89
Figura 5.14 Aceleraciones Espectrales para magnitud y distancia de $T^*=0.9\text{ seg}$ utilizando el modelo de atenuación de Abrahamson et al. (2012) para el UHS.....	90
Figura 5.15 Aceleraciones Espectrales para magnitud y distancia de $T^*=0.9\text{ seg}$ utilizando el modelo de atenuación de Abrahamson et al. (2012) para el SMP.....	90
Figura 5.16 Aceleraciones Espectrales para magnitud y distancia de $T^*=0.9\text{ seg}$ utilizando el modelo de atenuación de Abrahamson et al. (2012) para el UHS.....	91

Figura 5.17 Aceleraciones Espectrales para magnitud y distancia de $T^* = 0.9 \text{ seg}$ utilizando el modelo de atenuación de Abrahamson et al. (2012) para el SMP.....	91
Figura 5.18 Comparación del Espectro Medio Condicional a partir del SMP y UHS; y el Sismo Máximo Posible de la norma NCh2745.....	92
Figura 6.1 Curva de tasa de amortiguamiento vs desplazamiento para un sistema de aislación con $Q_0 = 0.025w$, $T_2 = 4 \text{ seg}$ y desplazamiento de fluencia de $DY = 0.025 \text{ m}$	99
Figura 6.2 Azul: Registro de aceleraciones sin corregir, Naranja: Registro de aceleraciones, velocidad y desplazamiento corregidos respectivamente.....	102
Figura 6.3 Señales registradas por el sensor del edificio #1 en la dirección Oriente, con coordenada local X. La imagen superior corresponde a la señal sobre el sistema de aislación sísmica y la inferior a la señal debajo del sistema de aislación sísmica.	103
Figura 6.4 Señales registradas por el sensor del edificio #1 en la dirección Oriente, con coordenada local X sobre y debajo del sistema de aislación sísmica. La imagen superior corresponde a las señales con desfase y la imagen inferior a las señales en fase.	104
Figura 6.5 Ventanas enumeradas desde arriba hacia abajo. (1) PSD de señal registrada por el sensor del edificio #1 en la dirección Oriente, con coordenada local X sobre el sistema de aislación sísmica; (2) PSD de la señal registrada por el sensor del edificio #1 en la dirección Oriente, con coordenada local X bajo el sistema de aislación sísmica; (3) Cociente entre las amplitudes de los PSD de las señales sobre y bajo el sistema de aislación sísmica; (4) Raíz cuadrada del cociente entre PSD.	105
Figura 6.6 Raíz cuadrada del cociente entre PSD donde se obtienen las frecuencias. f_1 y f_2	106
Figura 6.7 Lado izquierdo: amortiguamiento proporcional a la masa, lado derecho: amortiguamiento proporcional a la rigidez. Fuente: Chopra (2014).....	108
Figura 6.8 Azul: amortiguamiento proporcional a la rigidez, Rojo: amortiguamiento proporcional a la masa, Negro: amortiguamiento de Rayleigh.....	110
Figura 6.9 Ensamble de las matrices de los subsistemas	112
Figura 6.10 Tasa de Amortiguamiento versus Frecuencia para la estructura con Rigidez Uniforme Deteriorada.....	116
Figura 6.11 Ejemplo de un modelo histerético sin degradación para diferentes niveles de resistencia característica Q_d	119
Figura 6.12 Modelo histerético Bi-Lineal. Fuente: Vidal 2008.....	121
Figura 6.13 Modelo histerético Bouc-Wen. Fuente: Ma et al. 2004.	122
Figura 6.14 Gráfico ADRS a partir del método de integración de Newmark.	125
Figura 6.15 Radio espectral versus paso de tiempo. Fuente: Hilber (1977).	126

Figura 6.16 Gráfico ADRS a partir del método de integración de HHT.....	127
Figura 6.17 Gráfico ADRS a partir del método de integración alpha generalizado.....	128
Figura 6.18 Modelo histerético bilineal y sus principales parámetros.....	129
Figura 7.1 Análisis de sensibilidad para $T2 = 3$ con parámetro de entrada: número de registros sísmicos a utilizar	131
Figura 7.2 Análisis de sensibilidad para $T2 = 4$ con parámetro de entrada: número de registros sísmicos a utilizar	132
Figura 7.3 Gráfico ADRS utilizando 21 pares de registros	133
Figura 7.4 Gráfico ADRS utilizando 7 pares de registros	133
Figura 7.5 Gráfico ADRS utilizando 3 pares de registros	134
Figura 7.6 Gráfico ADRS para los registros seleccionados por Intensidad de Arias.....	138
Figura 7.7 Gráfico ADRS para los registros seleccionados aleatoriamente.....	139
Figura 7.8 Gráfico ADRS para el modelo histerético Bi-lineal.	140
Figura 7.9 Gráfico ADRS para el modelo histerético Bouc-Wen.	141
Figura 7.10 Gráfico ADRS para el método de escalamiento escalar.....	144
Figura 7.11 Gráfico ADRS para el método de escalamiento en el dominio del tiempo.....	144
Figura 7.12 Gráfico ADRS para el método de escalamiento en el dominio de la frecuencia. ...	145
Figura 7.13 Gráfico ADRS para el Espectro Medio Condicional.....	147
Figura 7.14 Gráfico ADRS para el Sismo Máximo Posible.....	148
Figura 7.15 Gráfico ADRS para $\alpha = 5$	151
Figura 7.16 Gráfico ADRS para $\alpha = 10$	151
Figura 7.17 Gráfico ADRS para $\alpha = 15$	152
Figura 7.18 Gráfico ADRS para el método de integración de Newmark.	154
Figura 7.19 Gráfico ADRS para el método de integración de HHT.....	155
Figura 7.20 Gráfico ADRS para el método de integración alpha generalizado.....	155
Figura 7.21 Gráfico ADRS resultante de los parámetros seleccionados.	157
Figura 7.22 Izquierda: Dimensiones de aislador diseñado mediante metodología ADRS. Derecha: Dimensiones de aislador diseñado mediante método convencional.....	162
Figura 7.23 Izquierda: Aceleraciones máximas para la estructura aislada (método convencional). Derecha: Aceleraciones máximas para la estructura aislada (metodología ADRS).....	163
Figura 7.24 Izquierda: Desplazamientos máximos para la estructura aislada (método convencional). Derecha: Desplazamientos máximos para la estructura aislada (metodología ADRS).	163
Figura 7.25 Izquierda: Derivas de entrepiso para la estructura aislada (método convencional). Derecha: Derivas de entrepiso para la estructura aislada (metodología ADRS).....	164

Figura 7.26 Superior: Incursiones inelásticas en vigas y columnas para la estructura la estructura aislada (método convencional). Inferior: Incursiones inelásticas en vigas y columnas para la estructura aislada (metodología ADRS).....	165
Figura 7.27 Gráfico ADRS para 21 registros sísmicos sin escalar.	167

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción

En la actualidad los dispositivos de aislación sísmica comúnmente utilizados corresponden a los aisladores elastoméricos de goma natural con y sin núcleo de plomo y los péndulos friccionales. Estos dispositivos son utilizados en distintos sistemas estructurales, para extender los periodos de vibración y alcanzar significativos niveles de amortiguamiento, resultando en reducciones de esfuerzos, deformaciones de entrepiso y aceleraciones en la estructura, y por consiguiente en un menor daño estructural y no estructural. Estos dispositivos de aislación son capaces de disipar grandes cantidades de energía sísmica debido a que sus curvas de histéresis resultan predecibles, replicables y estables. Comúnmente, en los diseños de sistemas de aislación sísmica, los comportamientos histéreticos son modelados utilizando sistemas lineales equivalentes, caracterizados por una rigidez efectiva (K_{eff}) y un amortiguamiento viscoso efectivo (β_{eff}).

Los parámetros rigidez efectiva y amortiguamiento viscoso efectivo son dependientes de las propiedades de los materiales, geometría del aislador y del nivel de deformación esperado en el sistema; por lo que un nuevo concepto surge al utilizar otros parámetros fundamentales genéricos del sistema de aislación. El concepto de Espectros de Respuesta no lineales de Aceleración y Desplazamientos (ADRS, por sus siglas en inglés) constituye una herramienta útil para diseño sísmico basado en desempeño, y en particular para la evaluación de la respuesta dinámica de estructuras con sistemas de aislación sísmica. Este método permite mostrar gráficamente la relación entre el corte basal de la estructura y el desplazamiento del sistema de aislación, para un rango de resistencias características y rigideces post-fluencia. Esto permite al diseñador mejorar su conocimiento de la demanda sísmica y el punto de desempeño efectivo de la estructura, proveyendo una aproximación más directa y significativa en el proceso de diseño que los comúnmente utilizados métodos iterativos lineales basados en propiedades efectivas.

Inicialmente, el uso del ADRS por parte de Whittaker and Jones (2014) comprendía el análisis del comportamiento de osciladores no lineales de un grado de libertad, representativos del comportamiento de sistemas de aislación sísmica, que fueron sometidos a registros sísmicos reales obtenidos durante el terremoto de Canterbury magnitud M_w 6.3 del 22 de febrero de 2011. Con posterioridad a dicha investigación, otros autores como Jones and Aiken (2015), aplicaron la misma metodología a diferentes sitios en Wellington (NZ), San Francisco (EEUU), Vancouver (Canadá) y dos zonas de alta sismicidad en Turquía. En Chile se realizó esta misma metodología propuesta por Whittaker and Jones (2014), donde compararon los terremotos de Maule magnitud

M_w 8.8 del 27 de febrero de 2010, Iquique magnitud M_w 8.2 del 1 de abril de 2014 y el de Illapel magnitud M_w 8.3 del 16 de septiembre de 2016. En cada caso, un set 7, 8 y 6 pares de registros sísmicos respectivamente, escalados mediante un factor de escala constante y un escalamiento en el dominio de la frecuencia en conformidad con la normativa NCh2745:2013 fue utilizado en el trabajo realizado por Jones et al. (2017).

En el presente estudio se busca continuar con los análisis realizados por Jones et al. (2017) para registros sísmicos chilenos, efectuar una comparación de los resultados obtenidos al utilizar la metodología ADRS para el diseño de sistemas de aislación sísmica con respecto a los métodos comúnmente utilizados por los códigos de diseño, y establecer las bases para la aplicación estandarizada de la metodología.

La actividad sísmica chilena en las últimas décadas y la extensa instrumentación disponible para el registro de eventos sísmicos permiten analizar la respuesta de sistemas de aislación sísmica y avanzar con el estudio de la metodología ADRS. Para la presente investigación se utilizaron 149 pares de registros los cuales fueron:

- 21 pares de registros del terremoto del Maule magnitud M_w 8.8 del 27 de febrero de 2010.
- 25 pares de registros del terremoto de Iquique magnitud M_w 8.2 del 1 de abril de 2014.
- 52 pares de registros del terremoto de Illapel magnitud M_w 8.3 del 16 de septiembre de 2016.
- 23 pares de registros del terremoto de Chiloé magnitud M_w 7.6 del 25 de diciembre de 2016.
- 3 pares de registros del terremoto de Punitaqui magnitud M_w 7.1 del 14 de octubre de 1997.
- 14 pares de registros del terremoto de Tarapacá magnitud M_w 7.9 del 13 de junio de 2005.
- 3 pares de registros del terremoto de Chusmiza magnitud M_w 6.3 del 24 de julio de 2001.
- 1 par de registro del terremoto de Curicó magnitud M_w 6.6 del 3 de mayo de 2004.
- 7 pares de registros del terremoto del Sur de Perú magnitud M_w 8.4 del 5 de septiembre de 2011.

1.2. Motivación

Chile cuenta con una de las sismicidades más altas del mundo, evidenciada por la ocurrencia en algún punto de su territorio de terremotos con magnitud de momento M_w mayor a 7.5 cada 8 a 10 años en promedio. Esto se atribuye principalmente a la subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Placa Sudamericana, dando como resultado eventos sísmicos del tipo inter-placa. Adicional y esporádicamente se observa la ocurrencia de terremotos intra-placa de profundidad intermedia y profundos, que ocurren en el interior de la Placa de Nazca, y la ocurrencia de terremotos corticales costeros y cordilleranos, que ocurren en la corteza continental de la Placa Sudamericana.

El presente estudio realiza un análisis de varios terremotos, incluido el terremoto del Maule M_w 8.8 del 27 de febrero de 2010. Este terremoto ha sido uno de los de mayor magnitud registrado e instrumentado en territorio chileno y fue el causante de pérdidas económicas oficiales que excedieron los 30 billones de dólares americanos. Un gran porcentaje de estas pérdidas estuvo asociado al daño de componentes y sistemas no estructurales, incluidos elementos arquitectónicos y equipamiento eléctrico y mecánico. Estas pérdidas, sumadas a la percepción del público respecto al impacto del terremoto en la propiedad, han alentado a los inversionistas y a los promotores de bienes raíces a incorporar sistemas de protección sísmica en sus estructuras, con el fin de alcanzar objetivos de desempeño más altos, que exceden los niveles mínimos requeridos por los códigos nacionales chilenos y extranjeros vigentes. Con casi 130 aplicaciones en Chile, la aislación sísmica de base es el sistema de protección sísmica que ha experimentado el mayor crecimiento desde el año 2010, protegiendo infraestructuras que incluyen desde edificios gubernamentales y hospitales hasta edificios residenciales y de oficinas.

Los primeros estudios sobre la aplicabilidad de la metodología ADRS (Acceleration Displacement Response Spectra) para la evaluación del desempeño sísmico de estructuras con aislación sísmica (Whittaker et al., 2014) fueron realizados luego de los terremotos de 2010 y 2011, con magnitudes M_w 7.1 y 6.3 respectivamente, ocurridos en Christchurch, Nueva Zelanda (Platt, 2012). El trabajo publicado por Whittaker obtuvo gráficos de espectros de aceleración y desplazamiento a partir de análisis no lineales de respuesta en el tiempo, que proporcionan a los diseñadores una herramienta directa para determinar las demandas de aceleración y desplazamiento de las estructuras sísmicamente aisladas de Christchurch. Esta metodología se ha continuado aplicando en diferentes países, entre ellos Chile, obteniendo espectros ADRS que permiten efectuar en forma más precisa el diseño preliminar de sistemas de aislación sísmica. El presente estudio busca extender estos resultados para todo el territorio chileno y analizar los efectos de los distintos métodos y procedimientos de modelación de los parámetros requeridos

para la caracterización de sistemas de aislación sísmica y la obtención de los espectros ADRS.

La finalidad de esta metodología alternativa de diseño es evaluar en forma explícita el desempeño sísmico de estructuras que incorporan sistemas de aislación sísmica e identificar parámetros óptimos de respuesta. Para esto, se comparan los diseños óptimos que resultan de aplicar los requisitos prescriptivos de la normativa nacional vigente y los resultantes de considerar la metodología propuesta. De esta manera se busca concluir respecto de cuál metodología resulta más adecuada para utilizar en la selección de los sistemas de aislación sísmica.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología alternativa que permita a los diseñadores determinar rápidamente los parámetros de diseño de sistemas de aislación sísmica más efectivos para un determinado nivel de peligro sísmico mediante el uso de espectros ADRS de una manera conveniente y gráficamente efectiva.

1.3.2. Específicos

Los objetivos específicos del presente trabajo son:

- i. Evaluar procedimientos de diseño de sistemas de aislación sísmica basados en la normativa vigente NCh2745, usando parámetros de rigidez efectiva (K_{eff}) y amortiguamiento viscoso efectivo (β_{eff}).
- ii. Identificar parámetros óptimos de sistemas de aislación sísmica diseñados en conformidad con la norma NCh2745, para distintas zonas sísmicas y tipos de suelo.
- iii. Diseñar sistemas de aislación sísmica utilizando espectros no lineales de aceleración absoluta y deformación del sistema de aislación (ADRS).
- iv. Determinar efectos del procedimiento de modelación del amortiguamiento intrínseco de la estructura y del sistema de aislación sobre los espectros ADRS.
- v. Realizar un análisis comparativo del efecto del modelamiento histerético del sistema de aislación sísmica de base sobre los espectros ADRS.
- vi. Evaluar el efecto de la relación entre la rigidez inicial y la rigidez post-fluencia del sistema de aislación sobre los espectros ADRS.

- vii. Estudiar los efectos del método de integración considerado para obtener los espectros ADRS.
- viii. Realizar un análisis del método de escalamiento de registros y del número de registros a utilizar para la aplicación de la metodología propuesta.
- ix. Evaluar conveniencia de considerar Espectro Medio Condicional (EMC) como espectro objetivo al momento de efectuar los escalamientos de registros sísmicos.
- x. Realizar una comparación del desempeño sísmico alcanzado por sistemas de 1 GDL con aislación sísmica para los casos que consideran sismos reales y registros escalados mediante distintos procedimientos.
- xi. Realizar un ejemplo comparativo del desempeño sísmico de una estructura de arquetipo con aislación sísmica de base diseñada usando los métodos prescriptivos de la normativa vigente y la metodología que se propone en esta tesis.

1.4. Metodología

La respuesta del sistema de aislación sísmica, requerida para el desarrollo de espectros ADRS, es determinada a partir del análisis no lineal de respuesta en el tiempo de un modelo histerético de un oscilador de un grado de libertad (1GDL), considerado para representar el comportamiento no lineal del sistema de aislación. La respuesta sísmica del sistema es determinada directamente usando Matlab y Opensees.

Las propiedades del sistema de aislación sísmica utilizadas para el desarrollo de la metodología ADRS son el periodo asociado a la rigidez post-fluencia (T_2) y la resistencia característica (Q_d) del sistema. Estos parámetros, a diferencia de la rigidez efectiva (K_{eff}) y el amortiguamiento viscoso efectivo (β_{eff}), son independientes del desplazamiento del sistema de aislación, y resultan fundamentales para la selección del sistema de aislación.

Las respuestas sísmicas son calculadas para pares de valores de resistencia característica y periodos post-fluencia del sistema de aislación, y cada registro sísmico del set de registros a ser considerado para el análisis debe ser escalado al espectro de amenaza de la norma considerada y/o al espectro medio condicional (EMC), considerando distintas técnicas de escalamiento de registros. El gráfico resultante permite al diseñador evaluar fácilmente el efecto de variar cualquiera de las propiedades del sistema de aislación sobre el diseño óptimo del sistema.

Para el análisis desarrollado en este estudio, se estudia la relación entre la rigidez elástica (K_i) y

la rigidez post-fluencia (K_p) obteniendo un problema que resulta completamente caracterizado por el periodo post-fluencia del sistema de aislación, T_2 y el rango de resistencia característica normalizada por el peso sísmico del sistema Q_d/W_s .

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Sistemas de aislación sísmica de base

Los sistemas de aislación sísmica de base son los sistemas pasivos de protección sísmica más eficientes para la protección de estructuras relativamente bajas y rígidas. Estos sistemas funcionan independizando el movimiento de la estructura del movimiento horizontal del suelo, reduciendo así la demanda de aceleraciones transmitida a la estructura. Los sistemas de aislación sísmica de base aumentan el nivel de amortiguamiento del sistema, reduciendo la demanda de desplazamientos, y reduciendo o aumentando los esfuerzos en la estructura dependiendo del nivel de amortiguamiento provisto. Generalmente los sistemas de aislación sísmica se ubican entre la estructura y su fundación o a nivel del cielo del subterráneo. Sin embargo, existen casos en los cuales los aisladores sísmicos se han ubicado en pisos superiores. La incorporación de estos sistemas permite reducir la rigidez del sistema estructural logrando que el período de vibración de la estructura aislada sea, aproximadamente, tres veces mayor al período de la estructura sin sistema de aislación. En la Figura 2.1 se muestra esquemáticamente el comportamiento de estructuras sin y con aislación sísmica de base. Dado que un sistema de aislamiento sísmico incrementa el nivel de protección de la estructura, resulta adecuado para su uso en estructuras que deben mantenerse operativas durante un terremoto, tales como hospitales, estaciones de bomberos, centros de atención de emergencias, etc.

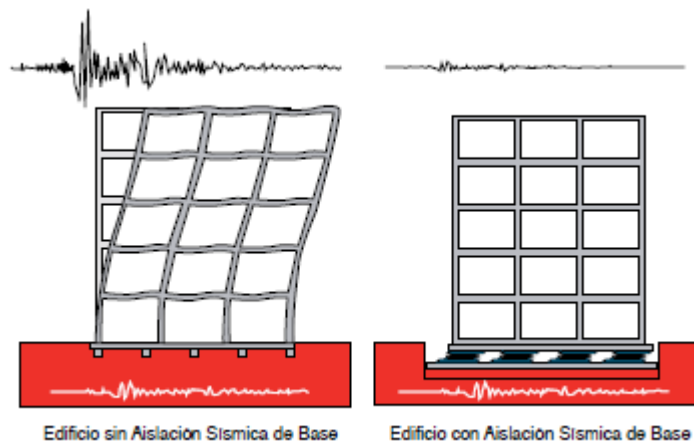


Figura 2.1 Comparación de respuesta sísmica de edificio sin/con aislación sísmica de base.
Fuente: Documentos Técnicos No 29 (CChC, 2011)

Los aisladores sísmicos más desarrollados y utilizados en la actualidad son los aisladores elastoméricos (con o sin núcleo de plomo) y los aisladores friccionales. Las siguientes son las principales características de estos sistemas de aislación sísmica:

- **Aisladores elastoméricos:** están conformados por la combinación de láminas planas de elastómeros intercaladas con capas de acero. Estas láminas de elastómero son vulcanizadas a las capas de acero y presentan una geometría generalmente circular. Mediante este tipo de configuraciones, se obtiene la flexibilidad lateral necesaria que permite el desplazamiento horizontal del sistema de aislación. La rigidez vertical del sistema, aportada por las láminas de acero, es comparable con la rigidez vertical de una columna de hormigón armado. El comportamiento de este tipo de aisladores depende de la amplitud de la deformación a la que son sometidos durante los eventos sísmicos, así como, en menor grado, de otros factores tales como temperatura, envejecimiento, contaminación y velocidad del movimiento. Existen varios tipos de sistemas elastoméricos, entre ellos se encuentran los aisladores de goma natural (NRB, Natural Rubber Bearing), los aisladores de goma de bajo amortiguamiento (LDRB, Low-Damping Rubber Bearing) y alto amortiguamiento (HDRB, High-Damping Rubber Bearing), y los aisladores de goma con núcleo de plomo (LRB, Lead-plug Rubber Bearing). Este último tipo de aislador puede aumentar el amortiguamiento efectivo del sistema a niveles que fluctúan entre 15 y 30%.
- **Deslizadores friccionales planos:** Utilizan una superficie de deslizamiento típicamente de acero inoxidable sobre la cual desliza una placa de acero revestida de Poli Tetra Fluoro Etileno (PTFE), donde se soporta parcialmente la estructura (no más del 15% del peso sísmico de la estructura en total). La superficie de deslizamiento permite el movimiento horizontal de la estructura de manera independiente del suelo. La disipación de energía en este tipo de sistemas de aislación es obtenida por las fuerzas de rozamiento que se generan durante el evento sísmico. El coeficiente de fricción del deslizador depende de variables tales como la temperatura, la presión de contacto, la velocidad del movimiento, el tipo y estado de las superficies de contacto y el envejecimiento. Este tipo de deslizadores por lo general están acompañados por mecanismos o sistemas restitutivos (aisladores elastoméricos con o sin núcleo de plomo) que regresan la estructura a su posición original después del sismo. Una de las principales desventajas de estos sistemas es que cualquier modificación en las superficies deslizantes puede variar el coeficiente de fricción establecido en el diseño.
- **Aislador Friccional:** Los aisladores friccionales cuentan con un deslizador articulado ubicado sobre una superficie cóncava. Estos aisladores, a diferencia de los aisladores deslizantes, poseen la característica de ser autocentrantes. Luego de un movimiento sísmico, la estructura regresa a su posición inicial gracias a la geometría de la superficie y a las fuerzas inducidas por la gravedad.

A través de la utilización de sistemas de protección sísmica se consigue una mejora considerable en el comportamiento sísmico de las estructuras. Esto permite una reducción en los daños en elementos estructurales, no estructurales y en los contenidos de los edificios. Una consecuencia directa de esto último es el aumento de la probabilidad de utilizar los recintos protegidos sísmicamente durante e inmediatamente después de ocurridos eventos sísmicos severos. Su uso puede abarcar todo tipo de estructura, nueva o existente, donde se requiera proteger su contenido, su continuidad de operación durante o inmediatamente después de ocurrido un evento sísmico severo, o donde se necesite alcanzar objetivos de desempeño superiores al de la normativa nacional vigente. Las estructuras más propicias para el uso de sistemas de protección sísmica son estructuras críticas, esenciales, estratégicas y/o con contenidos de gran valor, tales como hospitales, colegios, edificios públicos e industriales, museos, datacenters, puertos, puentes y aeropuertos, entre otros. Los sistemas de protección también se han utilizado con éxito en edificios de oficinas y residenciales, ajustándose a los costos del mercado.

2.2. Normativas y estándares aplicables al diseño de sistemas de aislación sísmica.

Procedimientos para el análisis y diseño de edificios y puentes para cargas sísmicas existen en el mundo desde la década de 1920. Una detallada historia y resumen de los procedimientos usados para el diseño sísmico de edificios se puede encontrar en el documento ATC-34 (ATC, 1995). Para edificios, los efectos sísmicos fueron incorporados por primera vez en el Uniform Building Code (UBC) de 1927 en Estados Unidos. Sin embargo, el código no incorporaba requerimientos de diseño. Los requerimientos de diseño se incorporaron en el código de 1930. En general, el desarrollo de normativa a nivel mundial ha estado siempre relacionado con la ocurrencia de terremotos de gran magnitud. Chile no ha sido la excepción. Luego del terremoto de Talca de 1928 se publicó el primer reglamento de diseño sísmico que comenzó a regir en 1935 a través de la Ordenanza General de Construcciones y Urbanización.

El primer documento para el diseño de estructuras con aislación sísmica de base fue publicado en 1986 por el SEAOC (Structural Engineering Association of California). Estados Unidos y Japón son los principales precursores del uso de estas tecnologías de protección. Los sistemas de protección sísmica presentaron su mayor auge luego de los terremotos de Northridge (EEUU) en 1994 y Kobe (Japón) en 1995. La Figura 2.2 muestra el aumento del uso de sistemas de aislación sísmica en Japón después del terremoto de Kobe de 1995. En ambos terremotos se observó que las construcciones que poseían sistemas de aislación sísmica se comportaron de excelente forma, lo que estimuló la masificación de este tipo de tecnología. La experiencia internacional muestra que el uso de sistemas de protección sísmica no solo aplica para estructuras nuevas, sino que también es utilizada como estrategia de refuerzo o rehabilitación (retrofit) de estructuras

ya existentes. Algunos ejemplos emblemáticos de estas aplicaciones son el Capitolio de Utah (EEUU), el Municipio de San Francisco (EEUU) y el puente Golden Gate en San Francisco (EEUU). En la actualidad Japón cuenta con más de 5000 construcciones con sistemas de aislación sísmica, mientras que Estados Unidos con alrededor de 200. En Chile, el primer edificio con aislación sísmica de base fue construido en el año 1991. Este edificio de viviendas sociales, de cuatro pisos, corresponde al conjunto habitacional de la Comunidad Andalucía, ubicado en la comuna de Santiago. Posteriormente, un centenar de estructuras con sistemas de protección sísmica han sido construidos, entre los que destacan el viaducto Marga-Marga, el Muelle Coronel, el puente Amolanas, el Nuevo Hospital Militar La Reina, la Clínica UC San Carlos de Apoquindo, la Torre Titanium, y los edificios de la Asociación Chilena de Seguridad en Santiago y Viña del Mar, entre muchas otras.

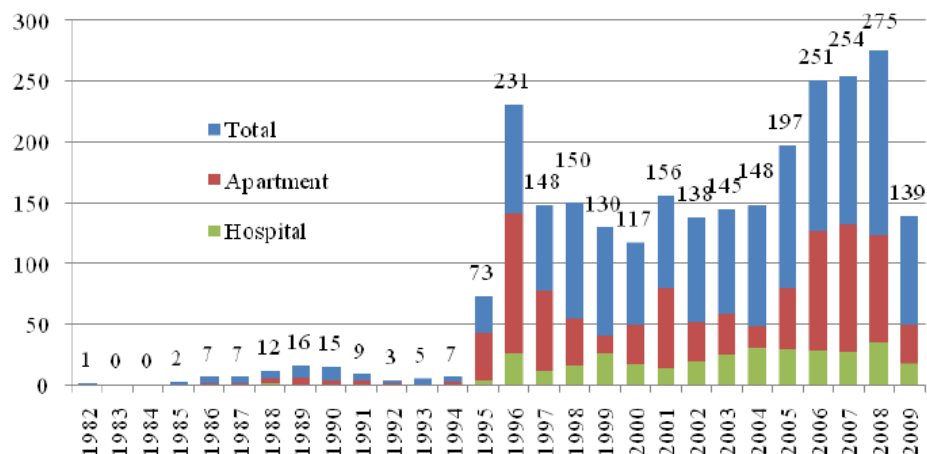


Figura 2.2 Numero de edificios sísmicamente aislados en Japón. Fuente: Takayama y Morita (2011).

2.2.1. Normativas internacionales para el diseño de sistemas de aislación sísmica

En las secciones subsiguientes se analizan brevemente las normas que han sido desarrolladas para el diseño de sistemas de aislación sísmica. Como primer punto se menciona la evolución de las normas y reglamentos que se han utilizado en EEUU. De la misma manera se estudian los lineamientos normativos en el EUROCODE, y finalmente se comenta el contexto normativo que utilizan varios países latinoamericanos. Esta sección se basa en el documento de Genatios et al. (2016) y tiene como fin dar a conocer las distintas referencias e instrumentos normativos utilizados a nivel mundial y la situación actual en la región.

2.2.1.1. Uso e implementación normativa en EEUU

El presente análisis se basa en el capítulo 9 del documento FEMA 274 (FEMA, 1997), en el cual se analiza la evolución del uso de sistemas de aislación sísmica en edificios nuevos en Estados Unidos. De este documento se estudian varios aspectos descritos a continuación.

El documento publicado en 1986 por la *Northern Section of the Structural Engineers Association of California* (SEAOC) tiene como título *Tentative Seismic Isolation Design Requirements*. Este documento fue el primero que estableció criterios para el uso de sistemas de aislación sísmica en EEUU. Luego de varias versiones de este documento, la SEAOC publicó en 1990: *General Requirements for the Design and Construction of Seismic-Isolated Structures*. Este documento fue utilizado por el *International Conference of Building Officials* en el *Uniform Building Code* de 1991, con varios cambios de su versión original. Si bien, estos lineamientos se encontraban a disposición, su uso no era obligatorio. Nuevas versiones de las recomendaciones sobre el uso de aisladores fueron publicadas de manera sucesiva en el Libro Azul del SEAOC, y destaca la versión de 1996. Paralelamente, el *Uniform Building Code* (UBC) también publicó recomendaciones sobre el uso de los aisladores sísmicos. A partir de 1992, el *National Earthquake Hazard Reduction Program* (NEHRP) publicó recomendaciones para el uso de aisladores sísmicos, en el documento *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings* (NEHRP, 1998).

Ambas instituciones, NEHRP y UBC, contaban con disposiciones para el uso de sistemas de aislación sísmica, por lo que en el año 1997 ambas instituciones lograron compatibilizar sus recomendaciones, y a partir de esto se cuenta con propuestas basadas en los mismos criterios técnicos. Por lo tanto, los lineamientos del *International Building Code*, incluidas en la edición de 1997 de *Uniform Building Code* (UBC) son muy similares a las recomendaciones del *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations of New Buildings*, para el uso de sistemas de aislación sísmica. A partir de ese documento de 1997, la publicación del UBC fue sustituida por la del IBC de 2000 (*International Building Code*), con publicación en 2003.

En 1996, un comité de la *American Society of Civil Engineers* (ASCE) estableció los procedimientos de ensayo de los sistemas de aislamiento sísmico, y para ello utilizó como referencia un documento desarrollado por el *National Institute of Standards and Technology* (NIST). La guía desarrollada incluyó ensayos de propiedades básicas, de prototipos y control de calidad, de elastómeros y de sistemas de aislamiento por deslizamiento. En 1997, la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) publicó dos documentos guía para la rehabilitación sísmica de edificios: *FEMA-273 NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic*

Rehabilitation of Buildings y *FEMA-274 HEHRP: Commentary on the guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. El uso de aisladores sísmicos es una de las opciones que estos dos documentos establecen para la rehabilitación de edificios existentes. Las recomendaciones descritas por FEMA son similares a los definidos en los documentos del UBC, pero incluyen la perspectiva de definición de objetivos de desempeño en la rehabilitación de la estructura: ocupación inmediata, protección de la vida y prevención del colapso. En el año 2000, FEMA publicó el documento: *FEMA 356: Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*.

En los Estados Unidos han existido varias normativas y lineamientos para el uso de aisladores sísmicos en las últimas décadas, que han sido actualizados a medida que evolucionan los diseños y los sistemas de aislación sísmica. Esta es una ciencia que está en constante desarrollo y día a día surgen nuevos desafíos, por lo que es imprescindible que las normas vigentes estén en constante actualización.

2.2.1.2. Normativa utilizada en Europa (EUROCODE)

El EUROCODE 8 (2004) establece una orientación al uso de sistemas de aislación sísmica para edificios en Europa y los lineamientos para su análisis e implementación. La norma establece estándares unificados para todos los países que pertenecen a la Unión Europea. El EUROCODE 8 considera que el aislamiento sísmico puede lograrse mediante el incremento del amortiguamiento, la modificación de la forma del modo fundamental y el incremento del periodo fundamental de la estructura. De esta manera se consigue una reducción en las fuerzas sísmicas, se concentran los desplazamientos en los aisladores y se limitan (y en muchos casos eliminan) las incursiones inelásticas de la estructura, lo cual simplifica su diseño.

En el EUROCODE 8 (2004) se establecen los objetivos de desempeño para estructuras que incorporan sistemas de aislación sísmica, entre los cuales se encuentran la preservación de la vida, el control de daño estructural, no estructural y de los contenidos, y finalmente, para las estructuras de importancia, se debe preservar la operación. Los requisitos fundamentales del diseño son similares a los de estructuras no aisladas: prevención de colapso y daño limitado, pero se introduce un factor de confiabilidad incrementada para los aisladores mediante un factor de magnificación de desplazamientos γ (con un valor recomendado de $\gamma = 1,2$).

Así como las normativas estadounidenses, el EUROCODE describe los principales tipos de aisladores y los principios que rigen su diseño. El EUROCODE incluye reglas para la localización de los aisladores, establece los criterios de diseño para edificios y define los métodos de análisis

de edificios aislados sísmicamente.

2.2.1.3. Normativa en la región Latinoamericana

El uso de sistemas de aislación sísmica en estructuras es un tema de poco desarrollo normativo en la mayoría de países de la región. Aunque en los últimos años el uso de aisladores ha ido en crecimiento principalmente en estructuras como puentes e infraestructuras de importancia como hospitales, sus aplicaciones en edificios habitacionales u oficinas son menos generalizadas. En esta sección se realiza una revisión de los contenidos normativos para el uso de sistemas de aislación sísmica en varios países latinoamericanos, incluidos Ecuador, Perú, Argentina, Venezuela y Chile.

- Ecuador: La normativa sísmica es la NEC-2011. En el Capítulo 2 de NEC 2011 se incluyen requisitos para el diseño de sistemas de aislamiento sísmico en donde se hace referencia a las recomendaciones del Building Seismic Safety Council, BSSC de 2004, NEHRP y FEMA 450 para el diseño de sistemas de aislación sísmica. En la actualidad existen varias estructuras que cuentan con sistemas de protección sísmica, una de ellos es el puente frente a la Universidad Laica Vicente Rocafuerte en la ciudad de Guayaquil, el cual reemplazó al puente que colapsó en el terremoto M_w 7.8 del 16 de abril del año 2016 y que fue reconstruido incorporando aisladores sísmicos y disipadores de energía. Otro ejemplo es el monumento a Guayas y Quil ubicado en la misma ciudad, una escultura de gran envergadura que cuenta con aisladores sísmicos en su base.
- Perú: Reglamento Nacional de Edificaciones RNE – Título III Edificaciones, III.2 Estructuras, E.030 Diseño Sismorresistente. Sin actualización desde el año 2009. El uso de disipadores y aisladores no es mencionado en la norma. Sin embargo, en Perú se ha implementado el uso de aisladores sísmicos en algunos edificios.
- Argentina: La norma argentina para edificaciones sismorresistentes es INPRES-CIRSOC 103. En Argentina el uso de sistemas de protección sísmica es aún poco desarrollado. Uno de los primeros edificios con aisladores sísmicos se construyó en Mendoza en el año 2002 para una residencia de estudiantes universitarios (utilizando aisladores de resorte combinados con amortiguadores viscosos). Los disipadores de energía se han utilizado a nivel de investigación en diversas universidades del país (UNSan Juan, UNCuyo, UTN), mediante la fabricación y ensayo de estructuras con disipadores metálicos (ADAS, TADAS y diagonales con pandeo restringido). Actualmente hay varios proyectos de investigación en desarrollo, con lo cual se espera que el uso de los sistemas de protección sísmica se

incremento en el futuro.

- Venezuela: La norma vigente es la COVENIN 2001 Norma de Edificaciones Sismorresistentes. Esta norma introduce un artículo que permite utilizar dispositivos de control de la respuesta sísmica, aunque no se reglamenta su uso ni se presentan mayores detalles. Se recomienda para ello la utilización de la metodología ICBO 1997 o FEMA 274.
- Chile: En el año 2003 se publicó la norma Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica, que fue la primera de este tipo en la región sudamericana: NCh2745.Of2003 *Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica*. Esta norma regula el diseño de estructuras aisladas sísmicamente y hace referencia a la Norma NCh433.Of96 (norma de diseño sísmico de edificios). La demanda sísmica, los procedimientos de análisis y de diseño de la norma de aislación no son similares a los establecidos en la Norma NCh433.Of96. Sin embargo, se establece que la estructura debe resistir al menos el corte mínimo que establece la norma NCh433.Of96 para estructuras con el período de la estructura aislada.

El uso de sistemas de aislación sísmica es un tema de poco desarrollo normativo en la mayoría de los países de Latinoamérica, con la excepción de Chile, país que dispone de la norma NCh2745:2013, que corresponde a una revisión de la norma de 2003, para el diseño de estructuras con aisladores sísmicos. Sin embargo, en la actualidad se está presentando un gran potencial en el desarrollo, investigación y aplicación de estos sistemas de protección sísmica.

2.2.2. Normativa Nacional Chilena NCh2745 “Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica”

Los sistemas de aislación sísmica han sido utilizados en Chile desde el año 1992 (Arriagada, 2005). Sin embargo, en esa época no se contaba con normativa que definiera los requerimientos y criterios de diseño de este tipo de estructuras. Por tal motivo y en vista de la necesidad de implementar este tipo de sistemas de protección sísmica, la norma NCh2745.Of2003 “Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica” surge para cubrir estos aspectos, haciendo a Chile uno de los primeros países en Latinoamérica en contar con regulación en la materia. La norma contiene la traducción, comentarios y adaptación del capítulo 16 del código *Uniform Building Code* (UBC, 1997).

En Chile, la norma NCh2745:2013 rige el diseño de estructuras con aislación sísmica de base. La filosofía de esta norma es limitar el daño estructural y de contenidos en caso de sismos

severos, proporcionando mayor seguridad en el ámbito social y económico. Sin embargo, la aplicación de las disposiciones de la norma NCh433.Of96 son obligatorias en tanto no contradigan las disposiciones de la norma NCh2745.

2.3. Diseño de sistemas de aislación sísmica

Son muchos los factores que influyen en el diseño de estructuras con aislación sísmica, entre los cuales se incluyen el periodo fundamental de la estructura con base fija, el periodo resultante de la estructura aislada, las características dinámicas del suelo de fundación, el espectro de diseño de la estructura aislada y la relación fuerza-deformación (histéresis) del sistema de aislación sísmica considerado.

Los procedimientos de diseño son definidos en las normativas que aplican en cada país. En Chile el diseño de sistemas de aislación sísmica de base se desarrolla de acuerdo a la normativa NCh2745:2013, la cual define dos niveles de peligro sísmico. El primero es para el diseño de la estructura, denominado Sismo de Diseño (SDI), el cual tiene una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años. El segundo es para el diseño del sistema de aislación sísmica, y corresponde al Sismo Máximo Posible (SMP), el cual tiene una probabilidad de excedencia del 10% en 100 años.

La norma NCh2745 permite realizar distintos tipos de análisis para el diseño del sistema de aislación sísmica, entre los que se encuentran: el análisis estático con fuerzas equivalentes, el análisis no lineal de respuesta en el tiempo y el análisis dinámico modal espectral, siendo este último el método más utilizado para el diseño de sistemas de aislación sísmica. El análisis dinámico modal espectral es un análisis de tipo lineal, que considera las propiedades efectivas del sistema de aislación. Este es un método iterativo, que se explica en la Figura 2.3:

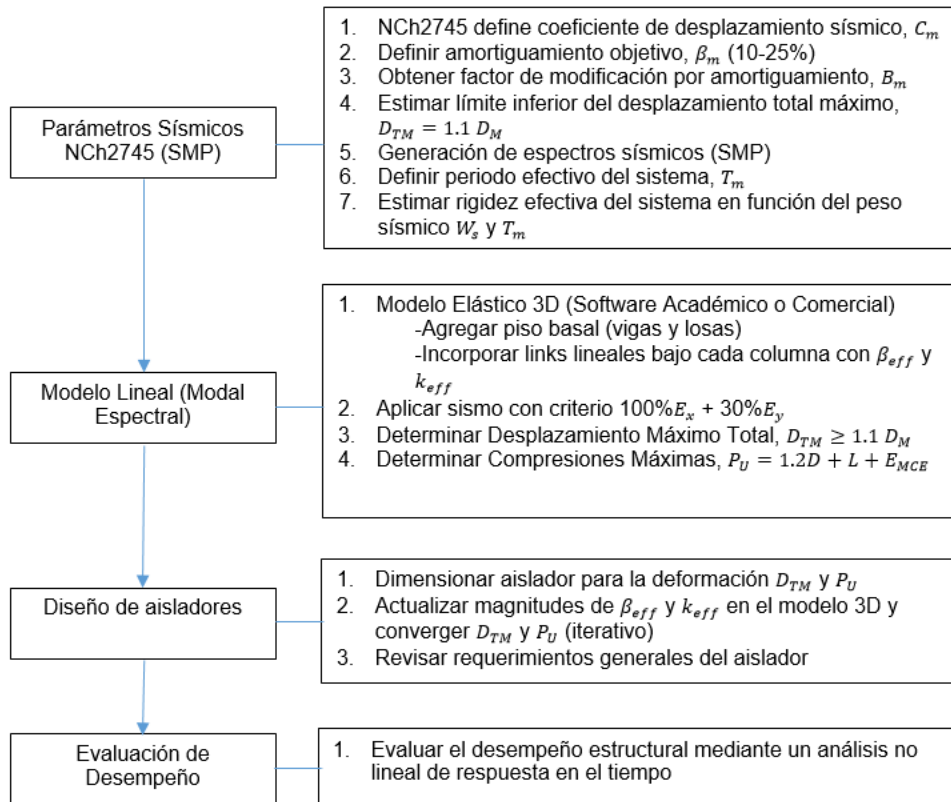


Figura 2.3 Proceso para el diseño de un sistema de aislación sísmica mediante un análisis modal espectral.

El objetivo fundamental del diseño de sistemas de aislación sísmica es obtener una estructura aislada cuyo periodo fundamental de vibración sea significativamente mayor (idealmente del orden de 3 veces o más) al periodo de la estructura con base fija. Esto resulta en fuerzas menores en los elementos estructurales del edificio aislado, comparadas con las que se obtienen en la estructura de base fija. Adicionalmente, se obtiene una disminución de la demanda espectral debido a alto amortiguamiento proporcionado por el sistema de aislación.

2.4. Objetivos de desempeño normativo

Uno de los objetivos de la ingeniería estructural es el control de la respuesta dinámica de las estructuras. Para esto, la Sociedad de Ingenieros Estructurales de California SEAOC estableció el comité Vision 2000 (1995). Este comité describe el concepto de diseño por desempeño como la selección de los objetivos de desempeño, sistemas estructurales y configuración apropiada (etapa conceptual), el dimensionamiento y detallamiento de la estructura (etapa numérica), el programa de control de calidad durante la construcción y los requisitos de mantenimiento a largo plazo.

Los análisis basados en desempeño tienen como objetivo acotar el daño esperado en márgenes preestablecidos para diferentes escenarios de sismos con un aceptable nivel de confiabilidad. Para alcanzar este objetivo se cuenta con las variables de rigidez, resistencia y capacidad del sistema para incursionar en el rango inelástico. Los avances logrados han permitido definir requerimientos de diseño sísmico basados en esta filosofía y sugieren que en un futuro las normas y códigos de diseño estén basados en ella.

En el marco estructural de la ingeniería sísmica basada en el desempeño estructural, existen tres conceptos importantes que se deben considerar: niveles de desempeño, niveles de demanda sísmica y objetivos de desempeño.

1) Niveles de desempeño:

Consideran principalmente los siguientes aspectos: daños físicos en los elementos estructurales y no estructurales, salvaguardar vidas y la funcionalidad operacional (si los servicios básicos siguen o no operativos). A partir de esto, Vision 2000 establece cuatro niveles de desempeño:

- Totalmente operacional: Sin daño estructural y no estructural o que este sea despreciable. La operación se preserva durante el sismo.
- Operacional: Daños leves, se toleran agrietamientos en elementos estructurales. La operación se recupera inmediatamente después de ocurrido el sismo.
- Seguridad de vida: Se produce pérdida de rigidez y resistencia en el sistema estructural, con daños moderados en algunos elementos. La operación no se recupera inmediatamente después de ocurrido el sismo.
- Prevención del colapso: Daños graves en elementos estructurales. Puede ser necesario demoler la estructura.

2) Demanda Sísmica:

De acuerdo a Vision 2000 (SEAOC, 1995), los niveles de demanda sísmica se definen según su periodo de retorno y/o probabilidad de excedencia. Los niveles de demanda sísmica considerados por Vision 2000 incluyen sismo frecuente, ocasional, raro y muy raro. Lagos et al. (2012) define que cada nivel de demanda sísmica debe ser representado por espectros de aceleraciones, S_a , los cuales se definen en función de los parámetros espectrales de la norma NCh433.Of96 y el Decreto Supremo DS61 de 2011. La Tabla 2.1 muestra los distintos tipos de movimientos

sísmicos, con sus respectivos valores de periodo de retorno y probabilidad de excedencia, así como la caracterización del nivel de demanda sísmica.

Tabla 2.1 Niveles de demanda sísmica. Fuente: Medina y Music (2018)

Movimiento sísmico	Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia (%)	Nivel de demanda sísmica
Frecuente	43	50 en 30 años	$S_a = \frac{f_{min} S A_0 \alpha}{(R^*/I)}$
Ocasional	72	50 en 50 años	$S_a = 1.4 \frac{f_{min} S A_0 \alpha}{(R^*/I)}$
Raro	475	10 en 50 años	$S_a = S A_0 \alpha I$
Muy raro	970	10 en 100 años	$S_a = 1.2 S A_0 \alpha I$

donde S es un parámetro que depende del tipo de suelo, A_0 es la aceleración efectiva máxima del suelo, α es el factor de amplificación de la aceleración efectiva máxima, R^* es el factor de modificación de la aceleración espectral, I es el coeficiente relativo a la importancia del edificio y $f_{min} = Q_{min}/Q_{basal}$ si $Q_{basal} < Q_{min}$.

3) Objetivos de Desempeño:

Indican un nivel cualitativo del grado de daño permitido (nivel de desempeño) para cada intensidad de sismo (nivel de demanda sísmica). En la Tabla 2.2 se observa la matriz de objetivos de desempeño propuesta por Vision 2000, para diferentes tipos de estructuras.

Tabla 2.2 Matriz de objetivos de diseño, Vision 2000 (SEAOC, 1995)

Nivel de demanda sísmica	Nivel de desempeño sísmico			
	Totalmente operacional	Operacional	Seguridad de vida	Prevención de colapso
Frecuente	OB	X	X	X
Ocasional	OEP	OB	X	X
Raro	OSC	OEP	OB	X
Muy raro	-	OSC	OEP	OB

OB : Objetivo Básico, para edificios habitacionales y de oficinas.

X : Objetivo Inaceptable.

OEP : Objetivo Esencial y Peligroso, para edificios esenciales (hospital, militar) e instalaciones peligrosas.

OSC : Objetivo de Seguridad Crítica, para edificios con elementos tóxicos, explosivos, radioactivos, etc.

Adicional a la matriz de objetivos de desempeño, Vision 2000 propone los desplazamientos límites para cada uno de los niveles de desempeño, los cuales representan la relación D_t/H ,

donde D_t es el desplazamiento lateral máximo del nivel superior del edificio con respecto a la base (desplazamiento de techo) y H es la altura total del edificio. Para alcanzar los objetivos de desempeño indicados anteriormente, los desplazamientos de la estructura deben ser inferiores a los valores señalados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Valores de desplazamiento máximo para distintos niveles de desempeño objetivo.

Nivel de Desempeño	Desplazamiento limite $D_t/H, \%$
Totalmente Operacional	≤ 0.2
Operacional	≤ 0.5
Seguridad de vida	≤ 1.5
Prevención de colapso	≤ 2.5
Colapso	>2.5

2.4.1. Estructuras convencionales

El diseño sismorresistente reduce las fuerzas dinámicas producidas por sismos para que los elementos estructurales incurrieren inelásticamente para disipar energía por histéresis. Por lo tanto, un adecuado diseño sismorresistente debe permitir que para un determinado nivel de demanda de ductilidad global, la capacidad de ductilidad de los elementos y materiales no sea superada en forma local. A partir de este concepto, las normativas de diseño sísmico permiten daños controlados en la estructura para alcanzar los objetivos deseados. La norma NCh433.Of96 establece que la estructura debe resistir sin daños movimientos de moderada intensidad, limitar los daños a los elementos no estructurales en sismos de mediana intensidad y ante los sismos severos permitir daños en los elementos estructurales evitando el colapso de la estructura.

2.4.2. Estructuras con aislación sísmica

La normativa NCh2745:2013 contiene requisitos de diseño adicionales para estructuras con aislación sísmica, donde el objetivo de desempeño es el de la protección a la vida y la reducción de daños a los elementos estructurales y no estructurales. La norma NCh2745:2013 especifica lo siguiente:

- 1) Resistir sismos pequeños y moderados sin daño en elementos estructurales, componentes no estructurales, y contenidos del edificio.
- 2) Resistir sismos severos sin que exista: (a) falla del sistema de aislación, (b) daño significativo a los elementos estructurales; y (c) daño masivo a elementos no estructurales.

Adicional a los objetivos de desempeño, la norma NCh2745:2013 define dos niveles de demanda sísmica:

- 1) Sismo de diseño (SDI): El espectro de diseño propuesto por la norma NCh2745:2013 para el diseño de todas las estructuras con aislación sísmica es un espectro de Newmark y Hall (1982). El espectro de diseño de estructuras con aislación sísmica no debe ser considerado menor que el espectro entregado por la norma NCh2745:2013.
- 2) Sismo Máximo Posible (SMP): Se debe construir un espectro para el sismo máximo posible. Este espectro no se debe considerar menor que el espectro de diseño definido en la norma NCh2745:2013 amplificado por un factor $M_M=1.2$. Este espectro se debe usar para determinar el desplazamiento total máximo y las fuerzas provenientes de los momentos volcantes para dimensionar y ensayar el sistema de aislación.

Los objetivos de desempeño se pueden alcanzar debido a que una estructura sísmicamente aislada se mantiene esencialmente en el rango elástico durante el sismo de diseño, debido a la reducción de aceleraciones, derivas de entrepiso y esfuerzos de corte en la estructura.

2.5. Comportamiento de estructuras con sistemas de aislación sísmica de base observado durante eventos sísmicos severos

De acuerdo con observaciones registradas en los últimos grandes terremotos, en especial durante el terremoto ocurrido en Tohoku, Japón en 2011, con magnitud M_w 9.0, donde se obtuvo registros de 27 estructuras con sistemas pasivos y/o de aislación sísmica, se puede concluir que las estructuras con sistemas de protección sísmica exhibieron un rendimiento sobresaliente. Sin embargo, en muchos casos, las respuestas de estos sistemas de aislación divergen mucho de las esperadas. La Tabla 2.4 muestra las aceleraciones máximas registradas en distintas ubicaciones a lo alto de las estructuras y el máximo desplazamiento para el sistema de aislación para distintos tipos de estructuras con diferentes tipos de sistemas de aislación sísmica. Se observa que el 80% de las estructuras no superan los 15 cm de desplazamiento del sistema de aislación. Las prefecturas correspondientes a Aomori, Iwate y Miyagi son las que se encuentran más cerca del epicentro, como se muestra en la Tabla 2.4, y varias de sus estructuras se encuentran dentro del 80% mencionado anteriormente. Para esta magnitud de terremoto los desplazamientos esperados para el sistema de aislación fluctúan entre los 25 a 40 cm, siendo esto mayor a los observados durante el terremoto. Las aceleraciones por otro lado, también son de gran interés, ya que se observan aceleraciones en la base entre 0,1 - 0,75g y aceleraciones máximas de techo entre 0,1 – 0,2g. La Figura 2.4 muestra la relación entre el desplazamiento del sistema de aislación con respecto a la distancia epicentral para cada una de las estructuras. Los

edificios que mayor desplazamiento presentan son los más cercanos al epicentro.

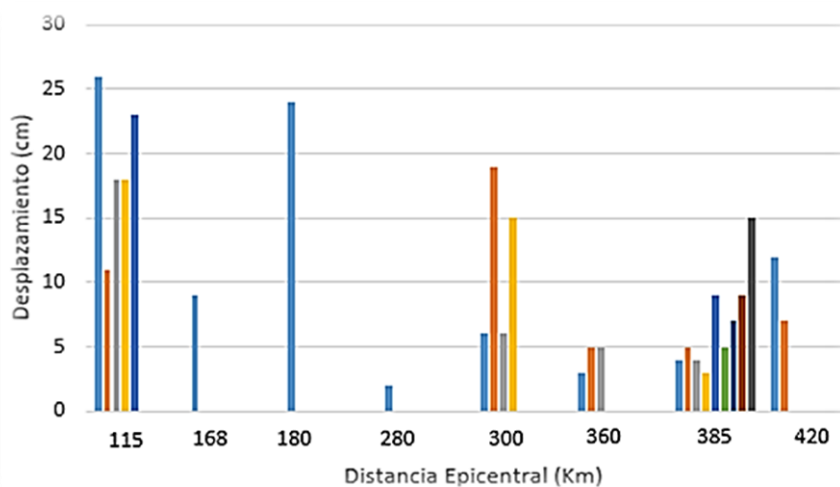


Figura 2.4 Relación entre desplazamientos del sistema de aislación con respecto a la distancia epicentral de las estructuras para el terremoto de Tohoku M_w 9.0 de 2011.

Tabla 2.4 Registros sísmicos observados de edificios con sistemas de aislación sísmica durante el terremoto de Tohoku, Japón 2011. Fuente: Takayama & Morita 15WCEE-403

Prefectura	Uso	Pisos	Sistema de Aislación	Max. Aceleración (g)			Desplazamiento del sistema de aislación (cm)	Distancia Epicentral (Km)
				Base	1 ^{er} Piso	Techo		
Aomori	Oficina	10	LRB	0,104	0,122	0,123	2	280
Iwate	Hospital	6	NRB+LRB+SLB+SD	0,305	0,083	0,183	9	168
Miyagi	Casa	2	SLB	0,508	0,185	-	26	115
	Oficina	5	HDR	0,345	0,177	0,224	11	
	Oficina	6	HDR	0,381	0,200	0,209	18	
	Oficina	9	HDR+OIL	0,289	0,121	0,142	18	
	Oficina	18	NRB+SLB	0,311	0,173	0,194	23	
Fukushima	Oficina	2	NRB+LRB+SLB+OIL	0,756	0,213	0,155	24	180
	Oficina	3	LRB+SLB+OIL	0,411	0,184	0,154	NA	
Ibaragi	Laboratorio	3	NRB+SD+LD	0,296	-	0,121	6	300
	Laboratorio	5	NRB+LD	0,305	0,238	0,203	19	
	Oficina	7	NRB+LRB+SD	0,327	0,092	0,126	6	
	Departamentos	21	NRB+SD+LD	0,402	0,185	0,181	15	
Chiba	Departamentos	4	LRB	0,170	0,101	0,107	3	360
	Departamentos	4	HDR	0,169	0,149	0,139	5	
	Oficina	8	NRB+HDR	0,219	0,097	0,137	5	
Tokyo	Laboratorio	2	NRB+SD	0,143	0,113	0,120	4	385
	Departamentos	3	NRB+OIL	0,090	0,054	0,090	5	
	Museo	4	HDR	0,100	0,076	0,100	4	
	Oficina	4	NRB+SLB	0,095	0,075	0,075	3	
	Laboratorio	6	LRB	0,132	0,069	0,072	9	
	Oficina	11	NRB+LRB+OIL	0,104	0,055	0,094	5	
	Departamentos	12	NRB+LRB	0,100	0,053	0,061	7	
	Escuela	26	NRB+OIL	0,098	0,029	0,046	9	
Departamentos	36	NRB+LRB	0,129	0,100	0,116	15		
Kanagawa	Escuela	7	NRB+OIL	0,071	0,054	0,057	12	420
	Escuela	7	HDR	0,147	0,051	0,099	7	

3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA EN ESTUDIO SISMICAMENTE AISLADA.

3.1. Diseño de estructura de base fija

La presente sección contempla los criterios de análisis y diseño de una estructura que tiene como fin de uso hospitalario, dispuesta con un sistema aporticado de hormigón armado. Se presentan los criterios de modelación, análisis y diseño sísmico empleados, así como los resultados obtenidos del análisis sísmico, como lo son: peso sísmico, corte basal, períodos, masas participantes y formas modales, entre otros. A su vez, se presentará un esquema con los detalles de dimensionado y armadura de las secciones de vigas y columnas empleadas. El diseño de la estructura se basa en la norma chilena NCh433.Of96 y el Código ACI 318-08 (ACI, 2018).

3.1.1. Descripción de la estructura

La estructura hospitalaria presenta un área total de planta igual a 1152 m², con 48 m de longitud, 24 m de ancho y 5 pisos de altura. Presenta seis vanos en el eje longitudinal y 3 vanos en el eje transversal, separados entre sí cada 8 m. La altura del primer piso es de 5.5 m, y la de los entrepisos restantes igual a 4 m. La estructura prototipo se proyecta con columnas de hormigón armado de dimensiones 110x110 cm, vigas de secciones 45x90 cm y losas macizas de piso y techo con 20 cm de espesor. Las cargas gravitacionales corresponden al peso propio (P_p) de la estructura y sus respectivas cargas permanentes, la carga muerta (W_D) que incluye todas las cargas debidas al peso de elementos y que se encuentran permanentemente en la estructura, y la carga viva (W_L) que actúan sobre la edificación con una magnitud variable en el tiempo y que se deben a su ocupación y uso habitual. La Tabla 3.1 muestra un resumen de las cargas muertas y cargas vivas distribuidas en los 5 pisos de la estructura.

Tabla 3.1 Cargas muertas y vivas distribuidas en la estructura.

Piso	W_D (Tonf/m ²)	W_L (Tonf/m ²)
1	0.6	0.5
2	0.6	0.5
3	0.6	0.5
4	0.6	0.5
5	0.5	0.0

Los materiales utilizados en el presente diseño deben cumplir con los requisitos mínimos especificados en las normativas mencionadas al inicio de la sección. Para las columnas y vigas se utilizó hormigón calidad G35 (H-40) con una resistencia cilíndrica a la compresión $f'_c = 35$ (MPa) y un módulo de elasticidad (E_c) definido por la ecuación 3.1:

$$E_c = 15100 \sqrt{f'_c}$$

3.1

Para el refuerzo a flexión y corte de los elementos de hormigón se utiliza acero calidad A630-420H, con $F_y = 420$ (MPa). La resistencia de diseño de los elementos estructurales se determina como la resistencia nominal multiplicada por un factor de reducción de la resistencia ϕ . La Tabla 3.2 muestra los factores de reducción para cada tipo de sollicitación que se utiliza en el desarrollo del modelo.

Tabla 3.2 Factores de Reducción para cada tipo de Sollicitación

Tipo de Sollicitación	ϕ
Flexión sin carga axial	0.90
Tracción axial y flexotracción	0.90
Compresión axial y flexocompresión	0.75
Elementos zunchados y otros	0.70
Corte	0.75

La estructura será diseñada para un sitio cercano a Huentelauquén, IV Región, zona sísmica 3 y clasificación sísmica de suelo tipo B, tendrá una categoría de ocupación tipo IV (Según NCh433.Of96) debido a que es una edificación hospitalaria. A partir de esta información se desarrolla el espectro elástico de aceleraciones (S_a) de acuerdo a la normativa NCh433.Of96. Se determinan los valores de las ordenadas del espectro sin tomar en cuenta el factor de modificación de respuesta (R^*), en función de los valores de periodo (T). La Figura 3.1 muestra el espectro de aceleraciones elástico para la estructura de estudio.

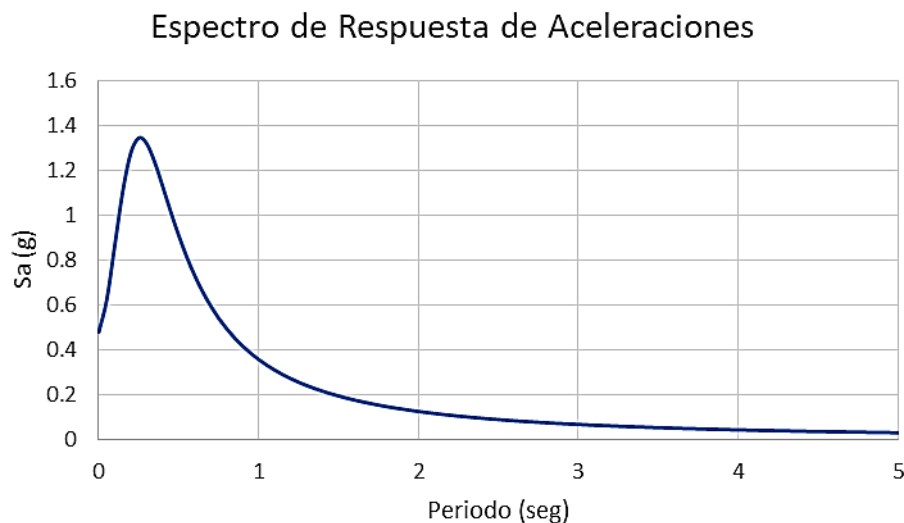


Figura 3.1 Espectro elástico de aceleraciones de NCh433.Of96

Para la estimación del peso sísmico de la estructura se utiliza la siguiente ecuación:

$$D + 0.5L = W_s \quad 3.2$$

donde D es la carga permanente de la estructura, incluyendo el peso propio de la misma, y L es la carga viva. En la Tabla 3.3 se muestra el peso sísmico de la estructura por piso.

Tabla 3.3 Peso sísmico de la estructura por pisos.

Piso	Peso Sísmico (W_s) (Tonf)
1	979.2
2	979.2
3	979.2
4	963.2
5	576.0

3.1.2. Análisis Sismorresistente

El modelo elástico del edificio hospitalario fue desarrollado mediante un programa comercial de análisis estructural, a fin de determinar las sollicitaciones internas (momentos, cortes y fuerzas axiales) de los elementos, así como los desplazamientos de piso cuando son sometidos al sismo de diseño (espectro de respuesta inelástico). Para el presente análisis se utiliza el método modal espectral para el diseño de la estructura y se evalúa el criterio columna fuerte-viga débil.

El modelo incluye la flexibilidad de las vigas y columnas. Para la unión viga-columna se consideraron nudos rígidos, de forma que el sistema posee la rigidez necesaria de las columnas, para distribuir las fuerzas sísmicas entre los diversos elementos resistentes verticales, definiendo diafragmas rígidos para que los desplazamientos en los nodos de un mismo piso sean compatibles. El análisis estructural se realiza tomando en cuenta las cargas verticales actuantes, así como los efectos de torsión accidental estipulados en la norma NCh433of96.

Del análisis estructural, se obtiene como primer modo de vibración la traslación en X, con período igual a 0.492 (seg), y el segundo modo de vibrar de la estructura para el eje traslacional Y, con periodo de 0.473 (seg). La Figura 3.2 muestra un esquema del modelo de análisis de la estructura y la orientación de los ejes X e Y.

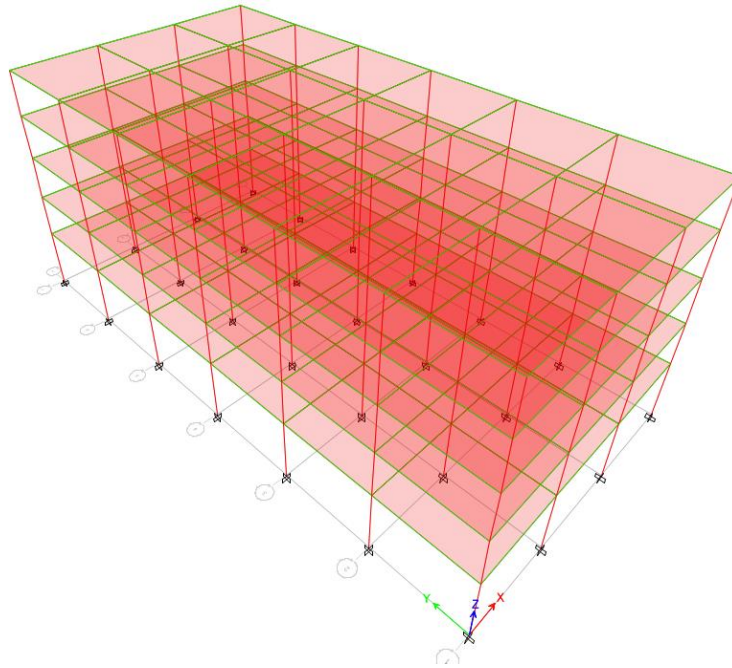


Figura 3.2 Diagrama de la estructura hospitalaria de estudio.

Con los valores obtenidos de períodos para los modos de mayor masa participante en cada dirección de análisis, se determinan los parámetros para el espectro inelástico en ambas direcciones, con sus respectivas correcciones. La Tabla 3.4 muestra los valores de cortes basales obtenidos para las direcciones en los ejes X e Y, así como sus respectivos factores de amplificación para la corrección del corte basal.

Tabla 3.4 Factores de reducción de respuesta en ambas direcciones de análisis.

Dirección X		Dirección Y	
Periodo Fundamental (seg)	0.49	Periodo Fundamental (seg)	0.47
Peso Sísmico	4492	Peso Sísmico	4492
V_{basal} (Tonf)	1342	V_{basal} (Tonf)	1369
$V_{basal\ min}$ (Tonf)	359	$V_{basal\ min}$ (Tonf)	359
$V_{basal\ max}$ (Tonf)	755	$V_{basal\ max}$ (Tonf)	755
R	7	R	7
Ro	11	Ro	11
R*	7.58	R*	7.48
R**	9.08	R**	9.06
$V_{basal\ diseño}$ (Tonf)	755	$V_{basal\ diseño}$ (Tonf)	755

Si el corte basal obtenido del análisis (V_{basal}) resulta menor al corte basal mínimo ($V_{basal\ min}$), los desplazamientos (así como las derivas de entrepiso) y las solicitaciones de los elementos estructurales se deben multiplicar por un factor de amplificación de tal manera que dicho corte basal alcance el valor establecido como mínimo. En caso que el corte basal supere al máximo

($V_{basal\ max}$), únicamente las solicitaciones de los elementos estructurales se pueden multiplicar por un factor de reducción de modo que dicho corte no supere al corte máximo.

La norma NCh433.Of96.Mod2009 establece que para realizar un análisis modal espectral se deben cumplir los siguientes puntos:

1. Las estructuras deben presentar amortiguamientos modales del orden del 5% del amortiguamiento crítico. Dicho valor fue asignado al programa de análisis estructural.
2. Se debe incluir en el análisis todos los modos normales ordenados según valores crecientes de las frecuencias propias, que sean necesarios para que la suma de las masas equivalentes para cada una de las dos acciones sísmicas sea mayor o igual a un 90% de la masa total. Este requisito fue revisado en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Relación de masa participativa por cada modo de la estructura.

Modo	Periodo (seg)	Ux	Uy	Sum Ux	Sum Uy
1	0.492	0.862	0.000	0.862	0.000
2	0.473	0.000	0.867	0.862	0.867
3	0.411	0.000	0.000	0.862	0.867
4	0.145	0.099	0.000	0.961	0.867
5	0.140	0.000	0.096	0.961	0.963
6	0.121	0.000	0.000	0.961	0.963
7	0.073	0.029	0.000	0.990	0.963
8	0.071	0.000	0.027	0.990	0.990
9	0.061	0.000	0.000	0.990	0.990
10	0.044	0.009	0.000	0.998	0.990
11	0.043	0.000	0.008	0.998	0.998
12	0.037	0.000	0.000	0.998	0.998
13	0.031	0.002	0.000	1.000	0.998
14	0.031	0.000	0.002	1.000	1.000
15	0.026	0.000	0.000	1.000	1.000

Como se observa en la Tabla 3.5, el análisis fue realizado tomando en cuenta 15 modos de vibrar de la estructura, los cuales cumplen con la cantidad mínima requerida por la norma con respecto a la relación de masa participante, obteniendo un 100% en ambas direcciones. Una vez revisados los aspectos descritos en los puntos 1 y 2, se procede a revisar el cálculo de las deformaciones sísmicas según la normativa NCh433. Se debe verificar que el desplazamiento relativo máximo entre dos pisos consecutivos, medido en el centro de masas en cada una de las direcciones de análisis, no debe ser mayor que la altura de entrepiso multiplicada por 0.002. Este requisito es

verificado haciendo uso del programa de análisis estructural, obteniendo la siguiente gráfica de derivas de la estructura para cada sismo en ambas direcciones (sismo en los ejes X e Y).

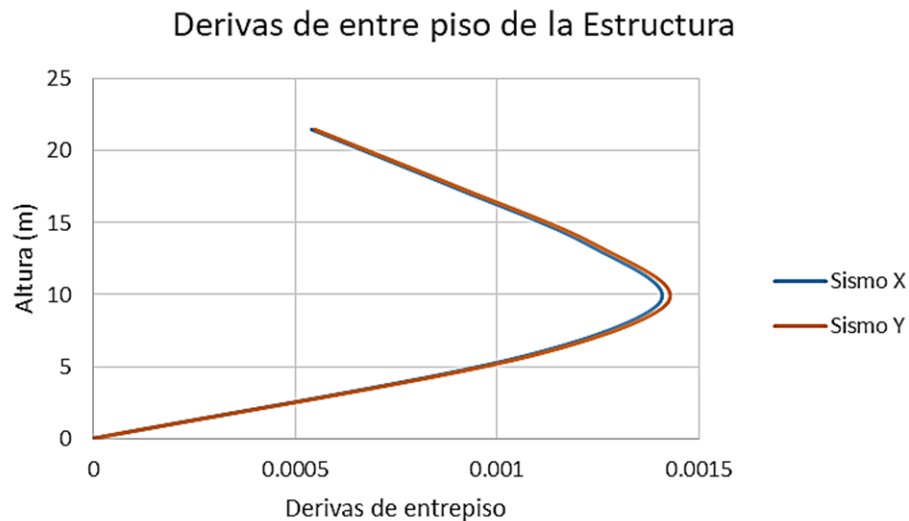


Figura 3.3 Curvas de los Drifts entre piso con respecto a la altura de la estructura para los sismos en X e Y.

Como se observa en la Figura 3.3 la deriva máxima para la estructura corresponde al obtenido en el centro de masa del segundo piso con un valor aproximado de 0.00142 para el sismo en el eje Y, el cual es menor al valor máximo establecido por la norma de 0.002.

El dimensionamiento de las columnas y vigas se realiza considerando las disposiciones del estándar ACI 318-08. Se proporcionó a las columnas una mayor capacidad a momento comparada con la capacidad de momento de las vigas satisfaciendo de esta manera el criterio de columna fuerte-viga débil. Los diseños quedan controlados por la restrictiva deriva de entre piso que establece la norma NCh433, siendo esta de 0.002, lo que resulta en una capacidad muy superior de los elementos comparada con las solicitaciones.

3.2. Diseño del sistema de aislación sísmica

En la modelación de la estructura sísmicamente aislada se consideran en general las mismas características de la estructura convencional, agregando todos los elementos propios del sistema de aislación (el piso basal con vigas y losas y se incorporan links lineales que simulan el aislador). Una de las ventajas principales de utilizar sistemas de aislación sísmica es la reducción de la respuesta de la superestructura, la cual permanecerá esencialmente en el rango elástico. El sistema de aislación sísmica se define considerando la distribución espacial de los aisladores, las traslaciones y torsiones, las fuerzas volcantes y otros efectos como la carga vertical, la capacidad

de restitución mínima, etc. Para la modelación computacional se utilizó un programa de análisis estructural comercial convencional, que permite analizar estructuras con elementos en ubicaciones específicas que presentan constitutivas no lineales. Para esto se utilizó el comando Nllink del tipo “Rubber isolator”, con el cual se representa el aislador con su comportamiento no lineal mediante una histéresis bi-lineal, donde la propiedad para generar este modelo histerético es la rigidez efectiva (K_{eff}). Para modelar el aislador sísmico se utiliza el comportamiento bilineal histerético para los grados de libertad asociados a los desplazamientos en el plano horizontal correspondientes a los ejes X e Y.

En el modelo de análisis se añadieron los elementos tipo Nllinks en la base de cada columna, empotrados al suelo, simulando los aisladores sísmicos. En la Figura 3.4 se muestra la estructura con los aisladores sísmicos en la base de cada columna.

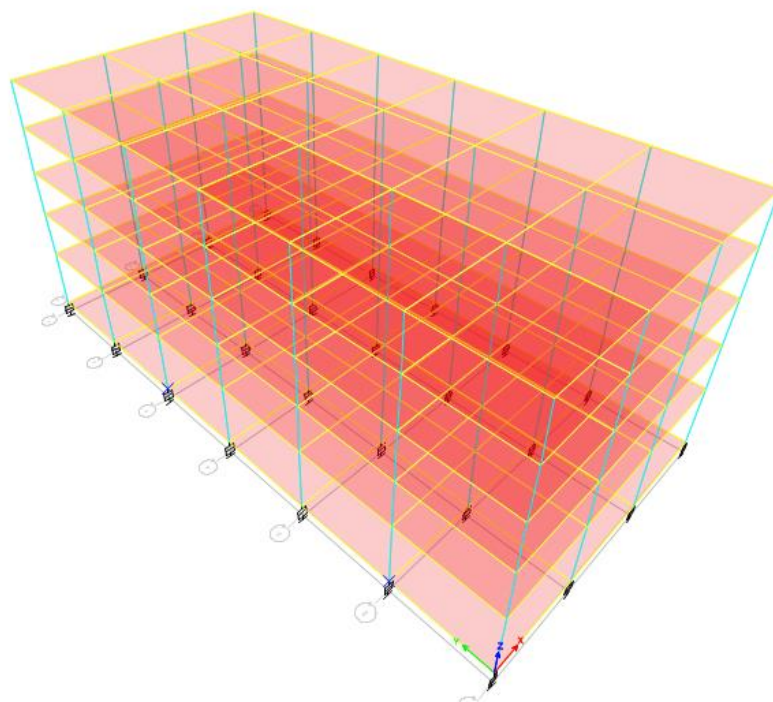


Figura 3.4 Estructura hospitalaria prototipo con aisladores sísmicos en su base.

3.2.1. Aplicaciones generales de la norma NCh2745:2013 a la estructura

Para el diseño del sistema de aislación sísmica se utiliza la norma NCh2745 en la cual se establece el uso de análisis estático y dinámico para el diseño de la estructura dependiendo de consideraciones establecidas en la norma. El análisis lineal dinámico modal espectral es el método más amplio utilizado en el diseño de sistemas de aislación sísmica. La norma establece un espectro diferente al utilizado en la norma NCh433, que se determina a partir de la selección de parámetros que dependen del tipo de suelo y zona sísmica definidos en la norma NCh433. La

norma NCh2745 establece dos espectros, los cuales se mencionaron en la sección 2.3: un espectro correspondiente al Sismo de Diseño (SDI), el cual es utilizado para el diseño de la superestructura y subestructura; y el espectro correspondiente al Sismo Máximo Posible (SMP), utilizado para el diseño del sistema de aislación sísmica. Como se mencionó en la sección anterior, la superestructura se mantendrá con el mismo diseño especificado en la sección 3.1 por lo que en esta sección solo se realiza el diseño del sistema de aislación. A continuación se definen los coeficientes y factores necesarios para el análisis de la estructura prototipo según NCh2745.

Con respecto a la categoría de destino el factor de importancia se considera igual a 1 indiferentemente de la categoría de uso de la estructura. Para calcular los desplazamientos y el espectro SMP es necesario definir ciertos factores. En la Tabla 3.6 se presentan los valores correspondientes al caso de estudio de la presente investigación:

Tabla 3.6 Parámetros para estructuras aisladas definidos en la norma NCh2745

Factor que depende de la zonificación sísmica definida en NCh433	
Zona Sísmica	Z
1	0.75
2	1.00
3	1.25

Factor de amplificación para el Sismo Máximo Posible	
Zona Sísmica	M_M
1	1.2
2	1.2
3	1.2

Coeficiente sísmico de desplazamiento C_D y C_M		
Tipo de suelo	C_D (mm)	C_M (mm)
A	200 Z	200 M_M Z
B	300 Z	300 M_M Z
C y D	330 Z	330 M_M Z

Posteriormente, se inicia el proceso de análisis, partiendo de un amortiguamiento y periodo objetivo para la estructura, con su respectivo valor de B_M o B_D (modificador del espectro). Para este estudio, se considera un amortiguamiento objetivo del 15% para el Sismo Máximo Posible, para el cual, según la normativa, corresponde un factor de reducción de demanda $B_M = 1.67$, obteniendo el siguiente espectro SMP:

Sismo Máximo Posible

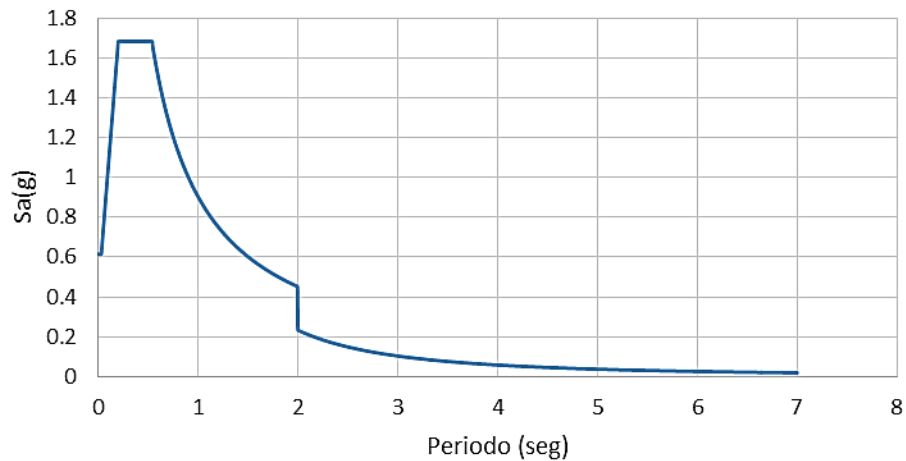


Figura 3.5 Espectro Sismo Máximo Posible de la norma NCh2745

A partir de los factores anteriores se puede calcular el desplazamiento de diseño y el desplazamiento máximo a partir de las siguientes expresiones:

$$D_D = \frac{C_D}{B_D} \qquad D_M = \frac{C_M}{B_M} \qquad 3.3$$

También se debe calcular el desplazamiento de diseño total y el desplazamiento máximo total en el cual se incluyen los efectos de la torsión tanto natural como accidental. Para efectos del presente análisis se utilizan las siguientes expresiones:

$$D_{TD} = 1.1 D_D \qquad D_{TM} = 1.1 D_M \qquad 3.4$$

Estos valores de desplazamientos serán calculados en la siguiente sección para el diseño del sistema de aislación sísmica.

3.2.2. Procedimiento de diseño

Para el diseño de los aisladores se realiza el análisis modal espectral de la estructura con los aisladores sísmicos incorporados mediante el uso de programas comerciales de análisis estructural. En la sección 2.3 se realizó un resumen del procedimiento de diseño de sistemas de aislación sísmica, en el cual se explica que es un método iterativo y para la primera iteración se asume un valor de amortiguamiento efectivo objetivo (β_M) de 15%, a partir de este valor de amortiguamiento, los datos de la Tabla 3.6 y las ecuaciones 3.3 y 3.4 se calculan los valores de desplazamiento máximo $D_M = 26.9$ cm y desplazamiento total máximo $D_{TM} = 29.6$ cm. A partir de estos valores se calculan las propiedades y geometría del aislador y así obtener los parámetros

de resistencia característica y rigidez post-fluencia que definirán el sistema de aislación. La Tabla 3.7 muestra el resumen de lo mencionado anteriormente.

A partir de los parámetros del aislador, se calculan las propiedades efectivas que serán evaluadas en el análisis lineal al modelo desarrollado en el programa de análisis estructural. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.8, donde la rigidez efectiva (K_{effM}) por aislador es de 956 Kgf/cm, el periodo efectivo para el sismo máximo es de 2.60 seg y el amortiguamiento calculado es de 15%, siendo este igual al amortiguamiento asumido al inicio del cálculo por lo que no es necesaria realizar algún cambio en la propiedades o geometría del aislador.

Tabla 3.7 Propiedades, geometría y parámetros del aislador

Propiedades y Geometría del aislador			
Tensión de fluencia del plomo	F_l	80	kgf/cm ²
Tensión de compresión máxima admisible en el aislador	$\sigma_{c,max}$	150	kgf/cm ²
Módulo de compresibilidad	K	20000	kgf/cm ²
Elongación de ruptura de la goma	ϵ_u	6	cm/cm
Módulo de corte de la goma	G_r	4	kgf/cm ²
Diámetro externo del aislador	d_e	75	cm
Diámetro interno	d_i	10	cm
Numero de láminas de goma	#lam goma	30	unid
Espesor de láminas de goma	t_r	0.8	cm
Espesor de placas de acero	t_s	0.3	cm
Altura de goma en el aislador	H_r	24	cm
Altura total del aislador	H_t	32.7	cm
Parámetros del aislador			
Sección del Núcleo de plomo	A_l	78.5	cm ²
Resistencia característica	Q_d	6283	Kgf
Área de goma	A_r	4339	cm ²
Rigidez post-fluencia	K_p	723	Kgf/cm
Rigidez inicial y restitutiva del dispositivo	K_u	7232	Kgf/cm
Deformación de fluencia	Δy	0.97	cm
Fuerza de fluencia	F_y	6981	Kgf
Deformación máxima	Δ_{max}	36.0	cm

Tabla 3.8 Propiedades efectivas obtenidas a partir de los parámetros del aislador

Propiedades efectivas para el Análisis Lineal			
Rigidez efectiva	K_{effM}	956	Kgf/cm
Energía disipada en un ciclo	EDC_M	6.53	Tonf.m
Amortiguamiento calculado	β_M	15.0	%
Periodo efectivo	T_{effM}	2.60	seg

Para el análisis se utiliza el valor de rigidez efectiva calculado anteriormente y se aplica el criterio de incluir la acción simultánea sobre el modelo del 100% de la excitación según la dirección crítica del movimiento más el 30% de la excitación según un eje ortogonal a la dirección anterior. El desplazamiento máximo del sistema de aislación se debe calcular como una suma vectorial de los dos desplazamientos ortogonales con el fin de calcular el desplazamiento total de diseño y el desplazamiento total máximo del modelo. La Tabla 3.9 muestra en manera de resumen los datos obtenidos de esta primera iteración.

Tabla 3.9 Datos de desplazamientos a partir del modelo en el software de análisis estructural.

Primera Aproximación			
Amortiguamiento efectivo objetivo	β_M	15	%
Desplazamiento X, sismo en X		27.4	cm
Desplazamiento en Y, sismo en X		8.2	cm
Desplazamiento X, sismo en Y		8.2	cm
Desplazamiento en Y, sismo en Y		27.3	cm
Desplazamiento total máximo (Modelo Lineal)	D_{TM}	28.6	cm
Carga axial a largo plazo sobre un aislador ($P_{u,lp}=D+L$)	$P_{u,lp}$	383	Tonf
Carga axial a corto plazo sobre un aislador ($P_{u,cp}=1,2D+L+E$)	$P_{u,cp}$	416	Tonf

Para la primera iteración del análisis modal espectral se obtuvo un desplazamiento máximo (D_{TM}) igual a 28.6 cm, una carga axial máxima a largo plazo de 383 (Tonf) y carga axial máxima a corto plazo de 416 (Tonf), para un amortiguamiento efectivo objetivo de 15%. Como el desplazamiento total máximo del modelo es menor al determinado a partir de la ecuación 3.4, no será necesario realizar una segunda iteración. Finalmente se verifica la estabilidad y propiedades del aislador cumpliendo con todos los requisitos normativos respectivos. La Tabla 3.10 muestra un resumen de esta verificación para las propiedades del aislador seleccionadas.

Tabla 3.10 Verificación del aislador

Tensión de compresión en el aislador	$\sigma_c = P_{U,LP}/A_r \leq 150$	σ_c	96	Kgf/cm ²
Factor de forma del aislador anular	$S = (d_e - d_i)/2t_r \geq 10$	S	41	cm/cm
Módulo de compresión	$1/E_c = 1/(4GS2) + 4/(3K)$	E_c	9566	Kgf/cm ²
Rigidez vertical del aislador	$K_v = E_c A_r / H_r$	K_v	1729589	Kgf/cm
Frecuencia vertical	$f_v = 1/2\pi \cdot (K_v g / W_s)^{1/2} \geq 10$ Hz	f_v	16	Hz
Tensión de fluencia en placas de acero		σ_y	2530	Kgf/cm ²
Tensión Admisible en Placas de Acero	$\sigma_{adm} = 0.75 \cdot \sigma_y$	σ_{adm}	1898	Kgf/cm ²
Tensión en el acero	$\sigma_s = 1.5 \cdot t_r / t_s \cdot \sigma_c \leq \sigma_{adm}$	σ_s	383	Kgf/cm ²
Capacidad de Restitución Mínima	$\Delta_{DTM} \geq W_s / 40 + F0.5DT \equiv k_d \geq W_s / (20 \cdot \Delta_{DTM})$	K_d	723	Kgf/cm
	$k_d \geq W_s / (20 \cdot \Delta_{DTM})$	$W_s / (20 \cdot \Delta_{DTM})$	271	Kgf/cm
Área efectiva de compresión (sombra proyectada)		A_{eff}	2175	cm ²
(Interacción Corte - Compresión)	$\gamma_{so} = D/H_r$	γ_{so}	1.2	cm/cm
	$\epsilon_c = P_{U,CP} / A_{eff} / (6GS2)$	ϵ_c	0.01	cm/cm
	$\gamma_{co} = 6 \cdot S \cdot \epsilon_c$	γ_{co}	0.7	cm/cm
	$\gamma_0 = \gamma_{so} + \gamma_{co}$	γ_0	1.9	cm/cm
	$F.S. = 0.85 \cdot \epsilon_u / \gamma_0 \geq 1.5$	F.S.	2.7	

Una vez alcanzada la convergencia en el Desplazamiento Máximo Total y realizadas todas las verificaciones correspondientes al aislador, se puede dar por finalizado su análisis obteniendo las características finales del aislador:

- Diámetro exterior igual a 75 cm y diámetro interior de plomo de 10 cm.
- Altura total igual a 32.7 cm, de los cuales 24 cm corresponden a goma (30 capas de 8 mm) y 8.7 cm de acero (29 láminas de 3 mm).
- Módulo de corte de 4 Kg/cm².
- Resistencia característica, Q_d , de 6283 Kgf.
- Fuerza de fluencia de 6981 Kgf.
- Rigidez post-fluencia igual a 723 Kgf/cm y una rigidez inicial igual a 7232 Kgf/cm.

La Figura 3.6 presenta un esquema del aislador a partir de las características definidas en el diseño:

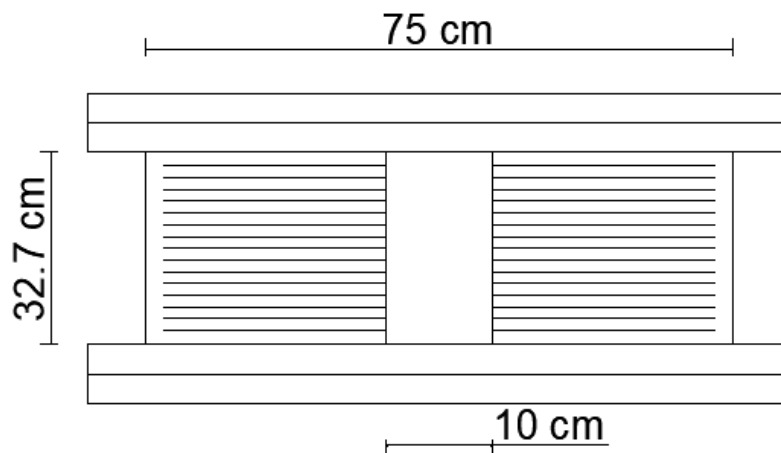


Figura 3.6 Esquema de la configuración del aislador.

3.2.3. Desempeño sísmico de la estructura aislada

La realización de análisis no lineal de respuesta en el tiempo permite verificar el comportamiento sísmico de la estructura. En la presente sección se utiliza este procedimiento de análisis para evaluar el desempeño sísmico de la estructura y se realiza una comparación con el desempeño de la estructura de base fija. El análisis tendrá como objetivos los siguientes puntos:

- Verificar los diseños de las estructuras de base fija y aislada.
- Comparar el desempeño de la estructura convencional con respecto a la estructura aislada para analizar la efectividad de utilizar un sistema de aislación sísmica.
- Identificar los registros sísmicos más desfavorables para la evaluación de las estructuras de base fija y aislada.

El análisis no lineal de respuesta en el tiempo se realiza en el software académico Opensees, en el cual se optimizó la estructura en estudio de un sistema de tres dimensiones a uno de dos dimensiones, con el fin de optimizar la carga computacional y verificar el desempeño de la estructura.

Para el análisis en el software Opensees la estructura se la modela igualmente de hormigón armado con 4 pórticos longitudinales y siete transversales separados cada 8 m. Las dimensiones de las columnas son de 110x110 cm y las vigas de 45x90 cm. Los parámetros de modelación se determinaron en base a las disposiciones del documento FEMA 356 (FEMA, 2000), “*Prestandard*

and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings”, específicamente en el capítulo 6, referido a hormigón armado. El estándar FEMA 356 define tres parámetros de modelamiento, a, b y c que dependen del ángulo de rotación plástica y la fuerza residual de las vigas y columnas. También se especifican los criterios de aceptación para cada nivel de desempeño (operación inmediata (IO), protección de vida (LS) y prevención de colapso (CP)). Estos parámetros son distintos para vigas y para columnas, al igual que la información necesaria para el análisis. La Tabla 3.11 muestra los parámetros de aceptación y modelación para la viga y columna.

Tabla 3.11 Parámetros para las secciones críticas

Elemento	Parámetros de Modelación			Parámetros de aceptación		
				Angulo de Rotación plástica		
	a	b	c	Nivel de desempeño		
				IO	LS	CP
Viga - Momento Negativo	0.0238	0.0466	0.2000	0.0089	0.0177	0.0238
Viga - Momento Positivo	0.0243	0.0487	0.2000	0.0093	0.0187	0.0243
Columnas	0.0173	0.0273	0.2000	0.0039	0.0134	0.0173

Para el presente análisis se utiliza tres registros sísmicos de componentes horizontales de aceleración, los cuales se obtuvieron durante el terremoto del 8 de septiembre de 2017 en Chiapas, México de $M_w = 8.2$, el terremoto del 16 de abril de 2016 en Pedernales Ecuador de $M_w = 7.8$ y el terremoto del 27 de febrero de 2010 en Concepción, Chile de $M_w = 8.8$. Esta selección de registros se efectúa principalmente por ser representativos en términos de magnitud, ubicación geográfica y tipo de falla. La Tabla 3.12 muestra un resumen de las características de los registros utilizados en el análisis no lineal de respuesta en el tiempo. La Figura 3.7 presenta los registros de aceleraciones y la Figura 3.8 los espectros de respuesta para los registros sísmicos mencionados anteriormente.

Tabla 3.12 Características de los registros empleados en el análisis.

Localización	Fecha de Sismo	Componente	Ac. Max (g)	Tipo de mecanismo focal	Estación de registro
México	08-09-2017	NS	0.22	Interplaca	OXTO
Ecuador	16-04-2016	EW	0.15	Interplaca	AES2
Chile	27-02-2010	EW	0.69	Interplaca	SMA-1

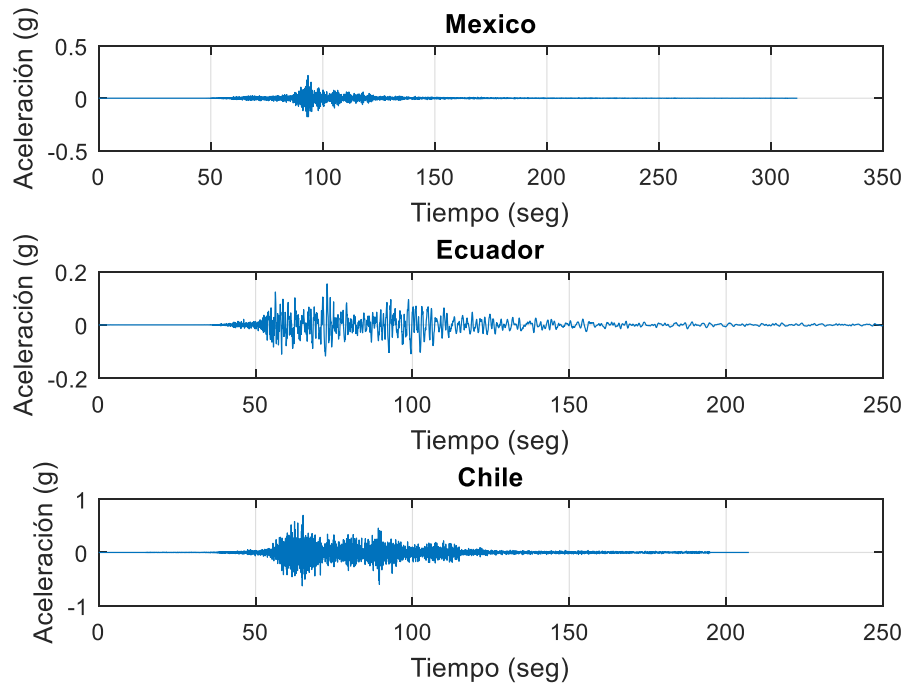


Figura 3.7 Registro de aceleraciones empleados en el análisis

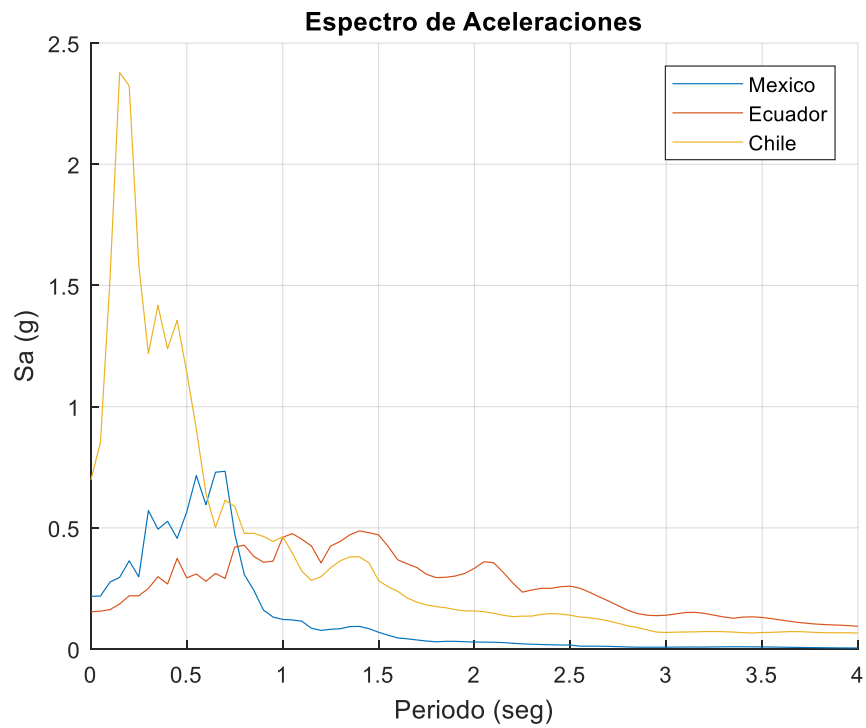


Figura 3.8 Espectro de aceleraciones de los registros empleados en el análisis.

Las Figuras 3.9, 3.10 y 3.11 muestran una comparación del desempeño sísmico de la estructura de base fija con respecto a la estructura aislada, a partir de gráficos que describen las aceleraciones máximas, desplazamientos máximos y derivas de entre piso para cada uno de los tres registros sísmicos descritos con anterioridad.

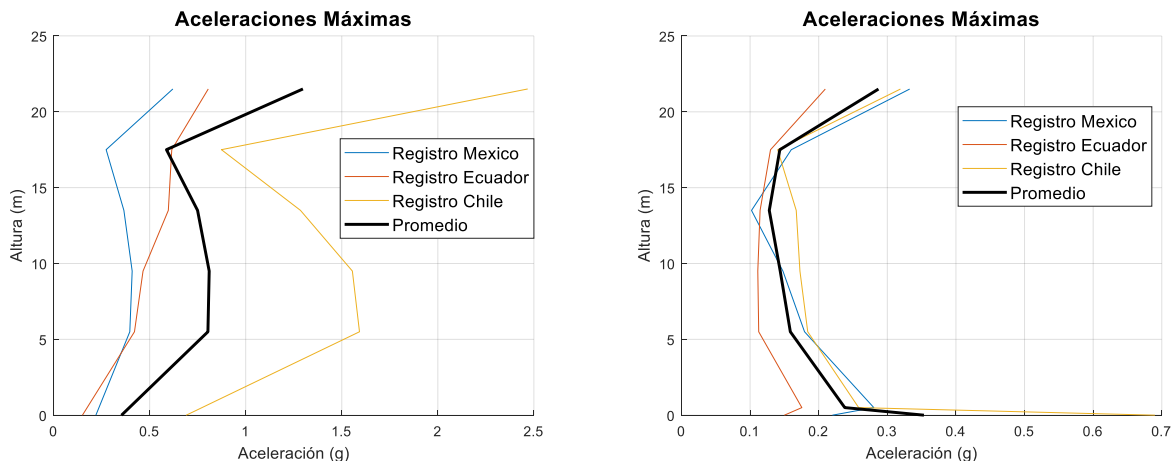


Figura 3.9 Izquierda: Aceleraciones máximas para la estructura de base fija. Derecha: Aceleraciones máximas para la estructura aislada.

Como se observa en la Figura 3.9, las aceleraciones para la estructura de base fija se encuentran en rango máximo de 0.6-2.5 (g) siendo estas 87% mayores que las de la estructura aislada, las cuales se encuentran en un rango de 0.2-0.33 (g). El registro que muestra la mayor aceleración para la estructura de base fija es el de Chile, mientras que en la estructura aislada es el registro de México.

La Figura 3.10 muestra los desplazamientos máximos para los dos tipos de estructuras, donde el registro de aceleraciones de Ecuador es el que presenta los mayores desplazamientos para ambos casos. Para el registro de Chile, el sistema aislado presenta un desplazamiento de base de 14 cm y un desplazamiento de techo relativo al suelo de 5 cm. En la estructura de base fija el desplazamiento de techo es de 26 cm, por lo que al incorporar el sistema de aislación la reducción del desplazamiento de techo alcanza un 81%.

Otro de los parámetros que se analizó se presenta en la Figura 3.11, donde se comparan las derivas de entre piso para las dos estructuras. El registro de Chile alcanza una deriva máxima de entre piso del orden del 15‰ para la estructura de base fija y el registro de México una deriva máxima del 3.5‰ para la estructura aislada. Como se ha observado hasta el momento el sistema aislado presenta una reducción en todos los parámetros de respuesta analizados.

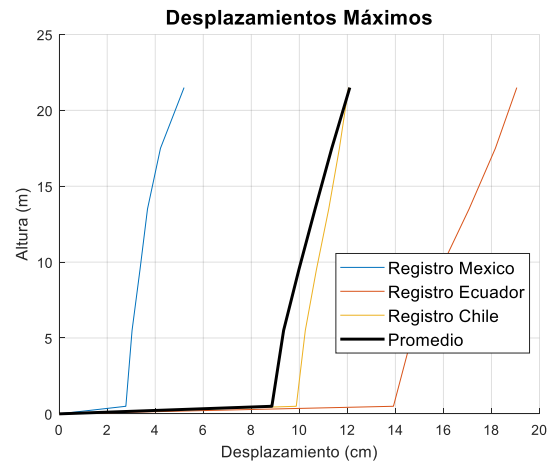
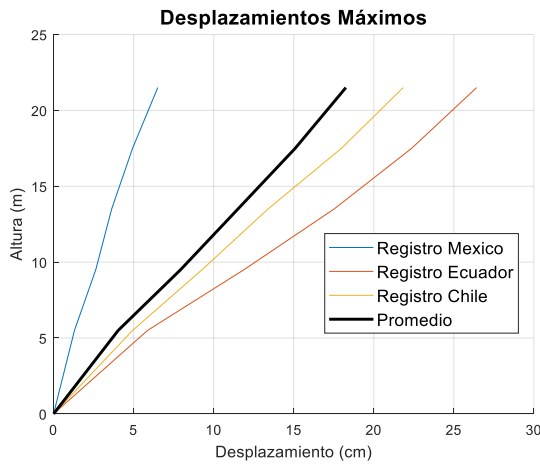


Figura 3.10 Izquierda: Desplazamientos máximos para la estructura de base fija. Derecha: Desplazamientos máximos para la estructura aislada.

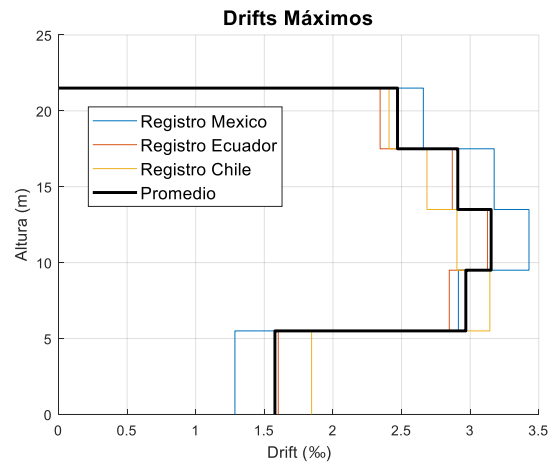
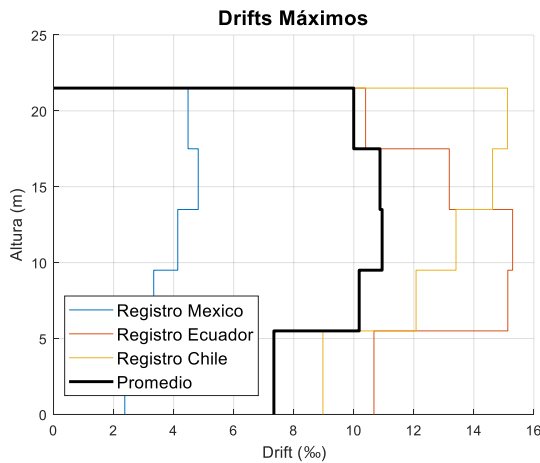


Figura 3.11 Izquierda: Derivas de entrepiso para la estructura de base fija. Derecha: Derivas de entrepiso para la estructura aislada.

Finalmente se evalúa el desempeño de las vigas y las columnas para las estructuras de base fija y aislada para el registro de aceleraciones de Chile, el cual presenta los máximos valores de aceleración y drifts para la estructura de base fija. La Figura 3.12 muestra las incursiones inelásticas tanto de vigas como columnas, y se observa que para la estructura de base fija, tanto las vigas como las columnas incursionan inelásticamente y la estructura alcanza el nivel de desempeño de Seguridad a la Vida. La estructura aislada no presenta incursiones inelásticas ni en vigas ni en columnas y alcanza un desempeño de Ocupación Inmediata. Estos niveles de desempeño fueron descritos anteriormente y como se ha presentado hasta ahora, la estructura con aislación sísmica es la que presenta una menor demanda de incursión inelástica sobre los elementos resistentes de la estructura.

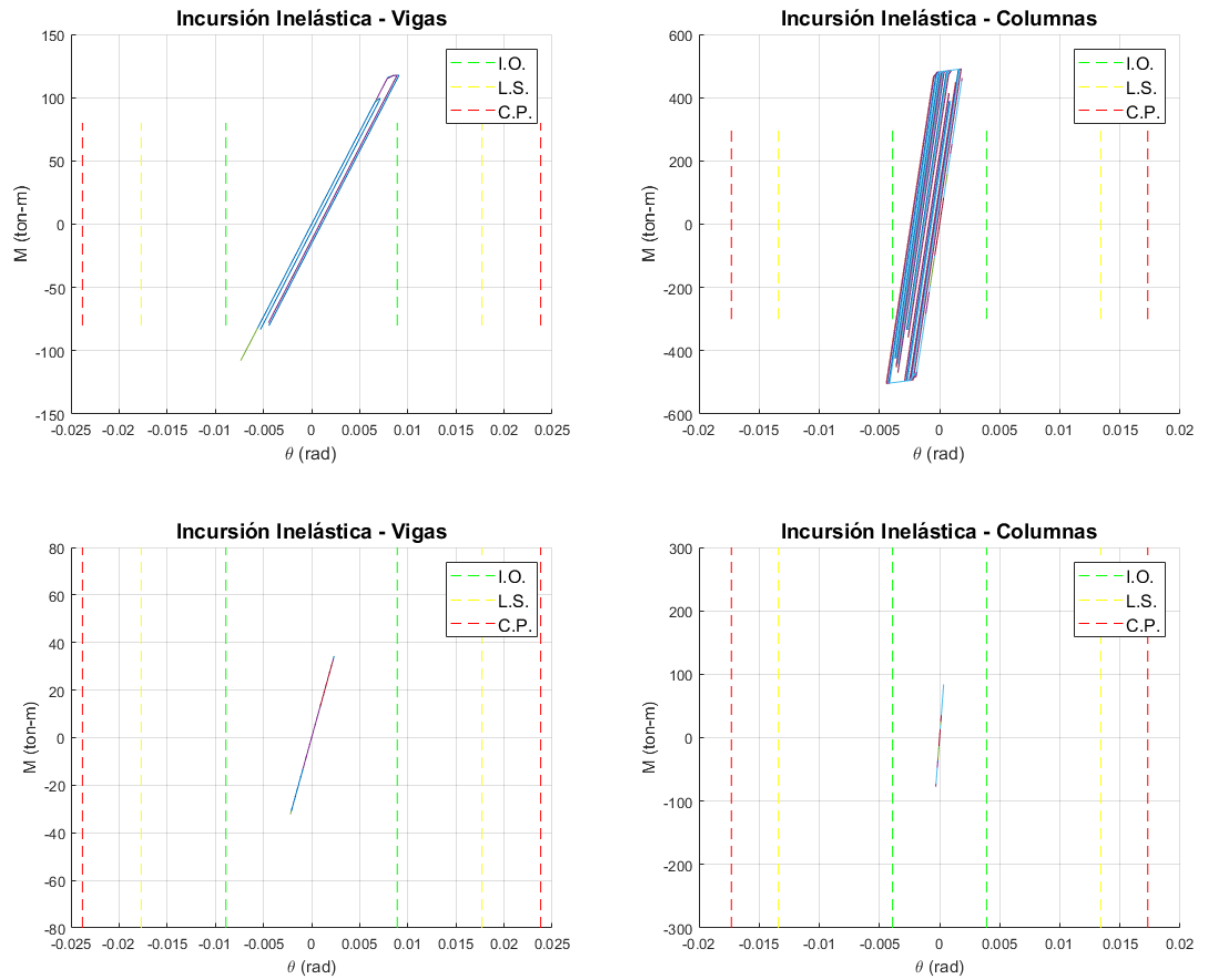


Figura 3.12 Superior: Incursiones inelásticas en vigas y columnas para la estructura de base fija. Inferior: Incursiones inelásticas en vigas y columnas para la estructura aislada.

A manera de resumen se presentan la Tabla 3.13 y Tabla 3.14 para los valores de aceleración, desplazamiento y deriva de entrepiso para cada piso de las estructuras aislada y con base fija. Se observa que la respuesta sísmica de la estructura aislada es superior a la de la estructura de base fija.

Tabla 3.13 Respuesta de Aceleraciones, Desplazamientos y Derivas de Entrepiso de la estructura aislada.

	Estructura Aislada								
	Aceleraciones (g)			Desplazamientos (cm)			Drifts (‰)		
	México	Ecuador	Chile	México	Ecuador	Chile	México	Ecuador	Chile
Base	0.28	0.18	0.26	2.8	13.9	9.9	1.29	1.60	1.84
1	0.18	0.11	0.18	3.0	14.8	10.2	2.91	2.85	3.14
2	0.15	0.11	0.17	3.4	15.9	10.7	3.43	3.13	2.90
3	0.10	0.11	0.17	3.7	17.1	11.2	3.17	2.87	2.68
4	0.16	0.13	0.14	4.2	18.2	11.7	2.66	2.34	2.41
5	0.33	0.21	0.32	5.2	19.1	12.0	NA	NA	NA

Tabla 3.14 Respuesta de Aceleraciones, Desplazamientos y Derivas de Entrepiso de la estructura de base fija.

	Estructura de Base Fija								
	Aceleraciones (g)			Desplazamientos (cm)			Drifts (‰)		
	México	Ecuador	Chile	México	Ecuador	Chile	México	Ecuador	Chile
Base	0.22	0.15	0.69	0.0	0.0	0.0	2.37	10.67	8.97
1	0.40	0.42	1.59	1.3	5.9	4.9	3.34	15.13	12.07
2	0.41	0.47	1.56	2.6	11.9	9.3	4.14	15.29	13.41
3	0.37	0.60	1.29	3.6	17.5	13.4	4.82	13.18	14.62
4	0.27	0.62	0.87	4.9	22.4	18.0	4.48	10.39	15.12
5	0.62	0.81	2.47	6.5	26.4	21.8	NA	NA	NA

Finalmente, la Tabla 3.15 muestra la reducción porcentual de aceleraciones, desplazamientos y derivas de entrepiso de cada piso al comparar la estructura de base fija y la estructura aislada. Se observa que las reducciones en aceleraciones fluctúan entre 41 y 89%, los desplazamientos se reducen entre 71 y 92% y las derivas de entrepiso se reducen entre 13 y 85%, dependiendo del registro sísmico considerado. El valor de -27% y -17% en la reducción de aceleraciones de la base del edificio para el registro de México y Ecuador dio negativo porque para estos casos las aceleraciones en la base aumentaron al incorporar el sistema de aislación sísmica.

Tabla 3.15 Porcentajes de reducción en Aceleraciones, Desplazamientos y Drifts para cada piso al comparar la estructura de base fija y la estructura aislada.

	Porcentaje de reducción (%)								
	Aceleraciones			Desplazamientos			Drifts		
	México	Ecuador	Chile	México	Ecuador	Chile	México	Ecuador	Chile
Base	-27	-17	63	0	0	0	46	85	79
1	55	73	88	80	86	92	13	81	74
2	64	76	89	77	84	91	17	80	78
3	72	81	87	75	82	90	34	78	82
4	41	79	84	71	81	90	41	77	84
5	46	74	87	63	81	90	NA	NA	NA

4. METODOLOGÍA ADRS

4.1. Descripción de la metodología ADRS

El concepto de Espectros de Respuesta No Lineales de Aceleración y Desplazamiento (ADRS por sus siglas en inglés) se utiliza como una metodología de diseño para sistemas de aislación sísmica. Los resultados de su aplicación se comparan, en términos de desempeño sísmico, con los resultados obtenidos para sistemas de aislación sísmica definidos de acuerdo a la normativa chilena NCh2745:2013. Las demandas de diseño son estimadas a partir de un análisis no lineal de respuesta en el tiempo utilizando un set de registros sísmicos escalados a un determinado espectro objetivo. Los parámetros que definen los sistemas de aislación sísmica considerados corresponden a un rango práctico de los sistemas de aislación sísmica utilizados a nivel mundial. Los parámetros que definen el sistema de aislación sísmica son la resistencia característica (Q_d) y la rigidez post-fluencia (K_p), la cual está expresada en el presente estudio como el periodo post-fluencia (T_2). Como se mencionó en capítulos anteriores estos parámetros no son dependientes del desplazamiento, por lo tanto, son preferibles a las propiedades lineales equivalentes comúnmente utilizadas en diseño, como lo son la rigidez efectiva (K_{eff}) y el amortiguamiento viscoso efectivo (β_{eff}).

Las respuestas sísmicas son calculadas para pares de valores de resistencia característica y periodos post-fluencia del sistema de aislación. Cada registro sísmico del set de registros considerado es escalado al espectro objetivo. El gráfico resultante permite al diseñador evaluar el impacto de variar cualquiera de las dos propiedades del sistema de aislación sísmica para obtener el diseño óptimo del sistema.

Las demandas de corte basal y desplazamientos son determinadas a partir de un análisis no lineal de respuesta en el tiempo de un modelo histerético del tipo Bouc-Wen de un oscilador de un grado de libertad (1GDL), considerado para representar el comportamiento no lineal del sistema de aislación. La ecuación de movimiento no lineal para el sistema de 1GDL fue resuelta directamente usando Matlab y el software académico Opensees.

El equilibrio dinámico de un oscilador viscoso elasto-plástico está dado por:

$$\ddot{u}(t) + \frac{F(t)}{m} = -\ddot{u}_g(t) \quad 4.1$$

donde $u(t)$ es la historia de desplazamientos relativos al suelo; $\ddot{u}_g(t)$ es la aceleración del suelo, y $F(t)$ es la fuerza interna resultante del mecanismo restaurador y el amortiguamiento (viscoso o

histerético). La fuerza interna, asumiendo que no hay contribución del amortiguamiento viscoso, matemáticamente se puede expresar como:

$$\frac{F(t)}{m} = \left(\frac{2\pi}{T_2}\right)^2 u(t) + \frac{Q_d}{W_s} g z(t) \quad 4.2$$

donde Q_d/W_s es la resistencia característica normalizada por el peso sísmico del sistema, g es la aceleración de gravedad; T_2 es el periodo post-fluencia del sistema de aislación; y $z(t)$ es una cantidad histerética adimensional tal que $|z(t)| \leq 1$, y que queda determinada por:

$$u_y \dot{z} + \gamma |\dot{u}(t)| z |z|^{n-1} + \beta \dot{u}(t) |z|^n - u(t) = 0 \quad 4.3$$

donde β , γ y n son cantidades adimensionales que controlan la forma de la curva histerética. El modelo definido por las ecuaciones 4.2 y 4.3 es una versión del modelo de Bouc-Wen.

$$\ddot{u}(t) + \left(\frac{2\pi}{T_2}\right)^2 u(t) + \frac{Q_d}{W_s} g z(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad 4.4$$

donde $z(t)$ está gobernada por la ecuación 4.3. Para el análisis desarrollado en esta sección, se asume que la rigidez elástica (inicial) es 10 veces mayor que la rigidez post-fluencia (K_p) y por tanto el problema resulta completamente caracterizado por el periodo post-fluencia del sistema de aislación T_2 , y resistencia característica normalizada por el peso del sistema Q_d/W_s . Para cada combinación de resistencia característica y periodo post-fluencia del sistema de aislación, las ecuaciones diferenciales definidas por las ecuaciones 4.3 y 4.4 se resuelven simultáneamente para obtener el máximo desplazamiento y su correspondiente aceleración (en términos de corte basal) para cada registro considerado. Finalmente se obtiene un promedio de todos los valores máximos para cada par de fuerzas características y periodos post-fluencia, dando como resultado un gráfico de fácil interpretación que puede ser utilizado para evaluar el desempeño del sistema de aislación sísmica. La metodología ADRS proporciona de esta manera un medio simple de evaluar la implicancia en términos de corte basal y desplazamiento del sistema de aislación de variar los parámetros de resistencia característica y periodo post-fluencia.

La Figura 4.1 muestra un espectro ADRS en donde las abscisas corresponden al desplazamiento que tendrá el sistema de aislación sísmica y las ordenadas al corte basal de la estructura normalizado con respecto al peso sísmico (W_s). Los registros han sido escalados al espectro objetivo de la norma NCh2745 (Sismo Máximo Posible) y al Espectro Medio Condicional (EMC) mediante escalamientos espectrales y con factor de escala. A partir del gráfico el diseñador puede seleccionar los parámetros más adecuados para el sistema de aislación sísmica, ya que en la mayoría de casos, al aumentar el periodo post-fluencia el corte basal disminuye y al aumentar la

resistencia característica los desplazamientos del sistema de aislación también disminuyen.

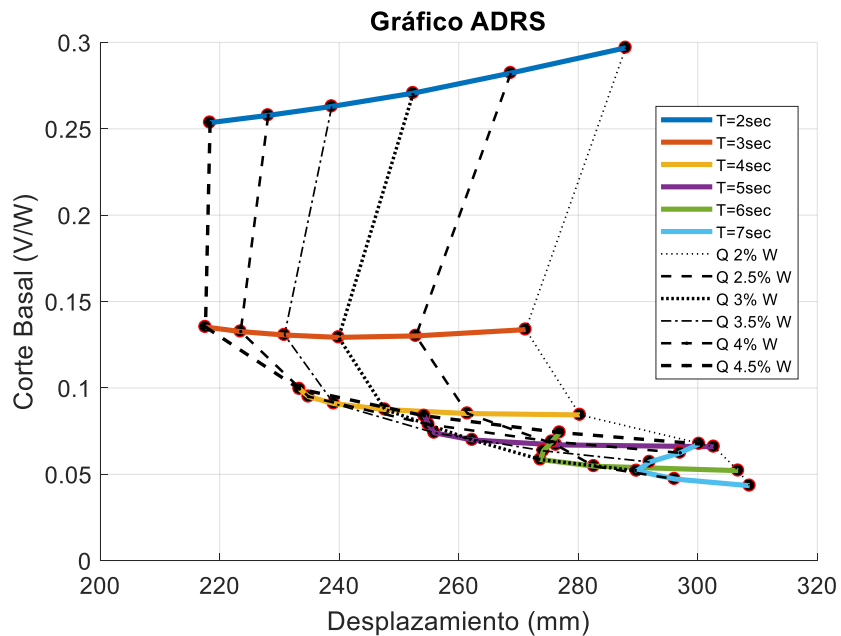


Figura 4.1 Ejemplo de Espectro ADRS

Un ejemplo para diseño a partir de la metodología ADRS utilizando los resultados presentados en la Figura 4.1 sería el siguiente:

- Identificar el periodo post-fluencia del sistema de aislación sísmica. Este puede ser, por ejemplo, $T_2 = 3 \text{ seg}$. Para este valor de T_2 la Figura 4.1 muestra cortes basales entre 0.13 y 0.14 W_s .
- Seleccionar un valor de resistencia característica normalizado por el peso sísmico de la estructura (Q_d/W_s) para obtener un valor aproximado del desplazamiento del sistema de aislación deseado. Este valor de resistencia característica puede ser, por ejemplo, del 3%, valor para el cual la Figura 4.1 muestra valores de desplazamiento de aproximadamente 24 cm.
- Finalmente, a partir de los parámetros seleccionados se puede obtener la geometría del aislador conociendo el desempeño que este presentará, facilitando el diseño preliminar del sistema de aislación sísmica.

4.2. Parámetros óptimos del sistema de aislación sísmica que utiliza la metodología ADRS

El presente estudio analiza los parámetros óptimos para desarrollar la metodología ADRS considerando parámetros característicos de sistemas de aislación sísmica de base diseñados en conformidad con la norma chilena NCh2745:2013. Los gráficos ADRS muestran las respuestas estructurales en términos del corte basal (V_S) de la estructura con aislación sísmica, la resistencia característica (Q_d), la cual es un parámetro intrínseco de las propiedades del aislador, y finalmente la rigidez post-fluencia en términos del periodo (T_2) del sistema de aislación.

4.2.1. Parámetros óptimos de corte basal

Como se menciona en las secciones anteriores, los parámetros del sistema de aislación que utiliza la metodología ADRS son la rigidez post-fluencia (T_2) y la resistencia característica (Q_d), ambos parámetros se relacionan con el amortiguamiento objetivo que tendrá el sistema de aislación y se pueden expresar en función del corte basal (V_S) de la estructura, por lo que se puede encontrar una relación para determinar los parámetros óptimos que minimicen los desplazamientos, aceleraciones y cortes de la estructura mejorando su desempeño sísmico. A continuación se explica paso a paso el desarrollo matemático del parámetro óptimo de amortiguamiento que entrega los menores valores de corte basal según NCh2745:2013, a partir de la siguiente ecuación:

$$V_S = K_{eff} D_D \quad 4.5$$

$$V_S = \left(\frac{Q_d}{D_D} + K_P \right) D_D; \quad \text{Reemplazar } K_{eff} = \frac{Q_d}{D_D} + K_P$$

$$V_S = Q_d + K_P D_D; \quad \text{Romper paréntesis } \left(\frac{Q_d}{D_D} + K_P \right) D_D = Q_d + K_P D_D$$

$$V_S = Q_d + K_P \left(\frac{C_D}{B_D} \right); \quad \text{Reemplazar } D_D = \frac{C_D}{B_D}$$

$$V_S = Q_d + K_P \left(\frac{C_D}{B_D} \right) \quad 4.6$$

Ahora se calcula Q_d a partir de la fórmula del amortiguamiento (β):

$$\beta = \frac{EDC}{2\pi K_{eff} D_D^2} \quad 4.7$$

$$\beta = \frac{4Q_d D_D}{2\pi K_{eff} D_D^2};$$

Reemplazar $EDC = 4Q_d(D_D - D_y)$, donde $D_y \approx 0$

$$\beta = \frac{2Q_d}{\pi K_{eff} D_D};$$

Simplificar términos

$$\beta = \frac{2Q_d}{\pi V_S};$$

Reemplazar la ecuación 4.5 en el denominador

$$Q_d = \frac{\beta \pi V_S}{2};$$

Despejar Q_d

$$Q_d = \frac{\beta \pi V_S}{2} \quad 4.8$$

Se reemplaza la ecuación 4.8 en la ecuación 4.6

$$V_S = \frac{\beta \pi V_S}{2} + K_P \left(\frac{C_D}{B_D} \right);$$

$$V_S - \frac{\beta \pi V_S}{2} = K_P \left(\frac{C_D}{B_D} \right);$$

Restar $\frac{\beta \pi V_S}{2}$ en ambos lados de la ecuación

$$V_S \left(1 - \frac{\beta \pi}{2} \right) = K_P \left(\frac{C_D}{B_D} \right);$$

Simplificar la variable V_S

$$V_S = \frac{K_P \left(\frac{C_D}{B_D} \right)}{\left(1 - \frac{\beta \pi}{2} \right)};$$

Dividir ambos lados de la ecuación para $\left(1 - \frac{\beta \pi}{2} \right)$

$$V_S = \frac{2K_P C_D}{B_D(2 - \beta \pi)};$$

Simplificar $\frac{K_P \left(\frac{C_D}{B_D} \right)}{\left(1 - \frac{\beta \pi}{2} \right)}$ en una fracción $\frac{2K_P C_D}{B_D(2 - \beta \pi)}$

$$V_S = \frac{2K_P C_D}{4.3632 * \beta^{0.5} (2 - \beta \pi)};$$

Reemplazar $B_D = 4.3632 * \beta^{0.5}$

$$V_S = \frac{2 \left(\frac{(2\pi)^2}{T_2^2} * \frac{W_S}{g} \right) C_D}{4.3632 * \beta^{0.5} (2 - \beta \pi)};$$

Reemplazar $K_P = \frac{(2\pi)^2}{T_2^2} * \frac{W_S}{g}$

$$V_S = \frac{2 \left(\frac{(2\pi)^2}{T_2^2} * \frac{W_S}{g} \right) C_D}{4.3632 * \beta^{0.5} (2 - \beta \pi)};$$

Simplificar el término derecho de la ecuación

$$V_S = \frac{8\pi^2 C_D W_S}{T_2^2 g * 4.3632 \beta^{0.5} (2 - \beta \pi)} \quad 4.9$$

La ecuación 4.9 representa el corte basal en función del periodo post-fluencia y el amortiguamiento, siendo C_D una constante que depende del tipo de suelo y zona sísmica. En la Figura 4.2 se muestra la variación del corte basal V_S para diferentes valores de periodo post-fluencia T_2 y amortiguamiento β para un tipo de suelo B y zona sísmica 3.

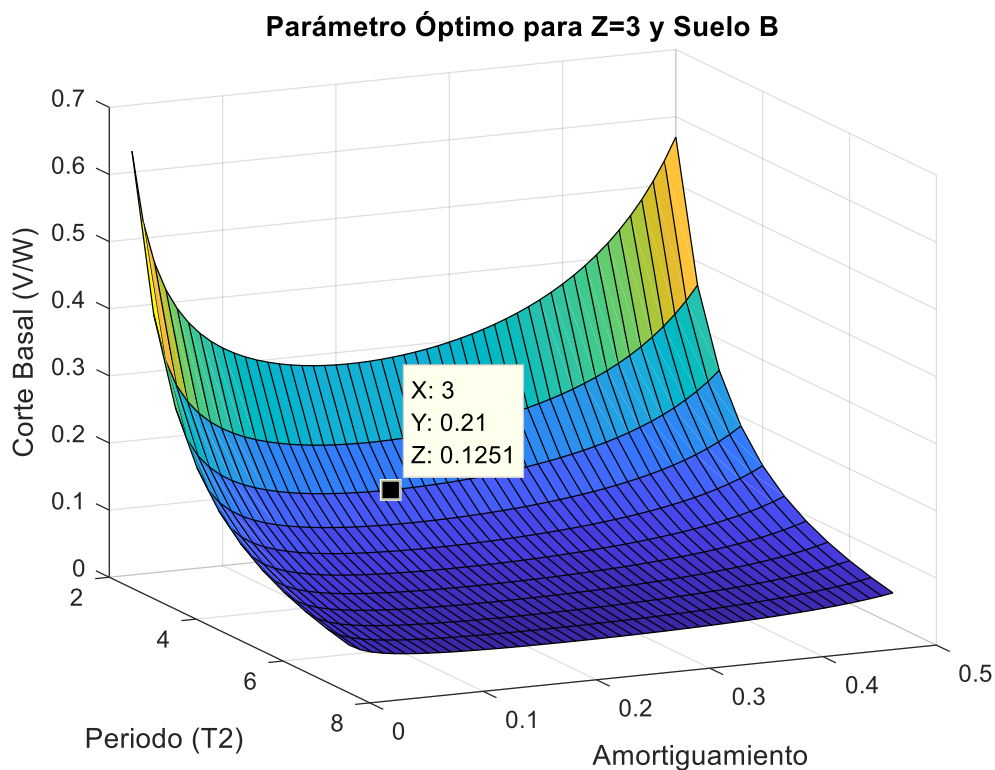


Figura 4.2 Relación entre el Corte Basal, Amortiguamiento y Periodo Post-Fluencia para un suelo tipo B y zona sísmica 3.

En la Figura 4.2 se observa que a medida que aumenta el periodo post-fluencia el corte basal de la estructura disminuye, y en el eje del amortiguamiento se aprecia que a medida que este aumenta, el corte basal disminuye sin embargo al alcanzar su valor mínimo, el corte basal aumenta a medida que aumenta el amortiguamiento. El valor mínimo de corte basal para los periodos post-fluencia se alcanza a un amortiguamiento del 21% como se muestra en la Figura 4.2. Este resultado se puede verificar teóricamente a partir de la ecuación 4.9, derivando el corte basal en función del amortiguamiento e igualándolo a cero. A continuación se presenta el desarrollo para encontrar el valor del amortiguamiento óptimo teórico:

$$\frac{dV(C_D, g, \beta, T_2)}{d\beta} = \frac{8\pi^2 C_D W_S}{T_2 g * 4.3632 \beta^{0.5} (2 - \beta\pi)}; \quad \text{Derivar la ecuación 4.9 con respecto a } \beta$$

$$\frac{8\pi^3 C_D}{T_2 g * 4.3632 \beta^{0.5} (\beta\pi - 2)^2} + \frac{8 * 0.5 * \pi^2 C_D}{T_2 g * 4.3632 \beta^{1.5} (\beta\pi - 2)} = 0; \quad \text{Igualar la ecuación a cero}$$

$$\frac{8\pi^3 C_D}{T_2 g * 4.3632 \beta^{0.5} (\beta\pi - 2)^2} = - \frac{8 * 0.4849 * \pi^2 C_D}{T_2 g * 4.3632 \beta^{1.5} (\beta\pi - 2)}; \quad \text{Restar ambos lados } \frac{8 * 0.5 * \pi^2 C_D}{T_2 g * 4.3632 \beta^{1.5} (\beta\pi - 2)}$$

$$\frac{\pi}{(\pi\beta - 2)} = - \frac{0.5}{\beta}; \quad \text{Simplificar ambos lados de la ecuación}$$

$$\beta\pi = -0.5(\pi\beta - 2); \quad \text{Eliminar los términos del denominador}$$

$$\beta\pi + 0.5(\pi\beta - 2) = 0; \quad \text{Sumar } 0.5(\pi\beta - 2) \text{ en ambos términos}$$

$$\beta\pi + 0.5\pi\beta - 2 * 0.5 = 0; \quad \text{Romper paréntesis}$$

$$\beta(\pi + 0.5\pi) - 2 * 0.5 = 0; \quad \text{Agrupar los términos de } \beta$$

$$\beta = \frac{2 * 0.5}{(\pi + 0.5\pi)}; \quad \text{Despejar el término de } \beta$$

$$\beta = \frac{2 * 0.5}{(\pi + 0.5\pi)} = 0.212 \quad 4.10$$

La ecuación 4.10 muestra que el valor de amortiguamiento para obtener el mínimo valor de corte basal es de $\beta = 0.212$, similar al valor que se muestra en la Figura 4.2, donde el amortiguamiento es de $\beta = 0.21$. El valor óptimo de amortiguamiento es independiente del tipo de suelo y zona sísmica, depende únicamente de la relación entre el factor B_D y β tal como se muestra en la ecuación 4.11:

$$B_D = 4.3632 * \beta^{0.5} \quad 4.11$$

Como se muestra en las ecuaciones anteriores, existe un valor de amortiguamiento óptimo que minimiza el corte basal. De igual manera se pueden determinar los valores óptimos de rigidez post-fluencia (T_2) y resistencia característica (Q_d), que minimizan el corte basal, ambos parámetros pueden quedar en función del corte basal ($V_S(T_2, Q_d)$). A continuación se explica paso a paso el desarrollo matemático de $V_S(T_2, Q_d)$, al combinar las ecuaciones 4.6 y 4.8 para obtener la siguiente ecuación:

$$V = \frac{K_p C_D}{4.3632 \left(\frac{2Q_d}{\pi V} \right)^{0.5}} + Q_d; \quad \text{Combinar la ecuación 4.6 y 4.8}$$

$$V = \frac{\left(\frac{2\pi}{T_2} \right)^2 \frac{W_S C_D}{g}}{4.3632 \left(\frac{2Q_d}{\pi V} \right)^{0.5}} + Q_d; \quad \text{Reemplazar } K_p = \left(\frac{2\pi}{T_2} \right)^2 \frac{W_S}{g}$$

$$V = \frac{\left(\frac{2\pi}{T_2} \right)^2 \frac{W_S C_D}{g}}{4.3632} \left(\frac{\pi V}{2Q_d} \right)^{0.5} + Q_d; \quad \text{Despejar del denominador } \left(\frac{2Q_d}{\pi V} \right)^{0.5}$$

$$V = \frac{4\pi^{2.5} C_D W_S V^{0.5}}{4.3632 T_2^2 (2Q_d)^{0.5} g} + Q_d; \quad \text{Romper paréntesis en la ecuación}$$

$$\bar{V} = V^{0.5} = \sqrt{V}; \quad \text{Definir } \bar{V} = V^{0.5}$$

$$\bar{V}^2 = V; \quad \text{Definir } \bar{V}^2$$

$$\bar{V}^2 = \frac{4\pi^{2.5} C_D W_S \bar{V}}{4.3632 T_2^2 (2Q_d)^{0.5} g} + Q_d; \quad \text{Reemplazar } V \text{ por } \bar{V}^2 \text{ y } V^{0.5} \text{ por } \bar{V}$$

$$\frac{\bar{V}^2}{\bar{V}} = \frac{4\pi^{2.5} C_D W_S}{4.3632 T_2^2 (2Q_d)^{0.5} g} + \frac{Q_d}{\bar{V}}; \quad \text{Dividir la ecuación para } \bar{V}$$

$$\bar{V} = \frac{4\pi^{2.5} C_D W_S}{4.3632 T_2^2 (2Q_d)^{0.5} g} + \sqrt{\frac{8\pi^5 (C_D W_S)^2}{4 T_2^4 4.3632^2 Q_d g^2} + \frac{4Q_d}{4}}; \quad \text{Reemplazar las variables } \frac{Q_d}{\bar{V}}$$

$$\bar{V} = \left[\frac{4\pi^{2.5} C_D W_S}{4.3632 T_2^2 (2Q_d)^{0.5} g} + \sqrt{\frac{2\pi^5 (C_D W_S)^2}{T_2^4 4.3632^2 Q_d g^2} + Q_d} \right]^2; \quad \text{Reemplazar } \bar{V} \text{ por } \sqrt{\bar{V}}$$

$$V = \left[\frac{4\pi^{2.5} C_D W_S}{4.3632 T_2^2 (2Q_d)^{0.5} g} + \sqrt{\frac{2\pi^5 (C_D W_S)^2}{T_2^4 4.3632^2 Q_d g^2} + Q_d} \right]^2 \quad 4.12$$

En la ecuación 4.12 el corte basal se expresa en función de la resistencia característica y el periodo post-fluencia $V_S(T_2, Q_d)$. En la Figura 4.3 se muestra la variación del corte basal V_S para diferentes valores de periodo post-fluencia T_2 y resistencia característica Q_d para un suelo tipo B y zona sísmica 3.

Parámetro Óptimo para Z=3 y Suelo B

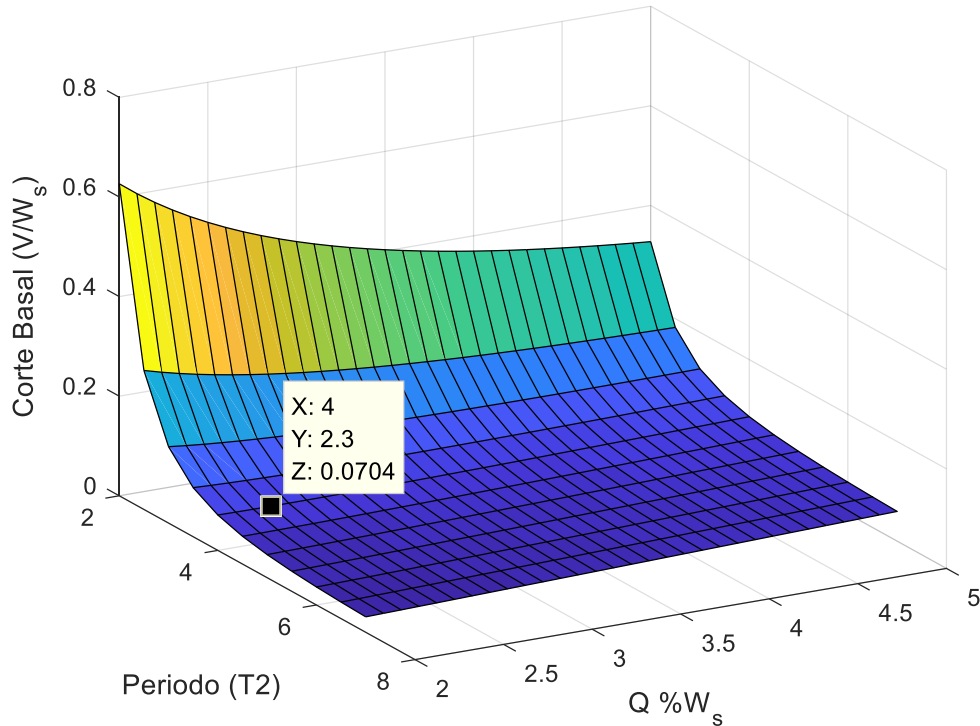


Figura 4.3 Relación entre el Corte Basal, Resistencia Característica y Periodo Post-Fluencia para un suelo tipo B y zona sísmica 3.

En la Figura 4.3 se observa que a medida que aumenta el periodo post-fluencia el corte basal de la estructura disminuye, y al aumentar la resistencia característica el corte basal disminuye hasta un valor mínimo y vuelve a incrementar al superar la resistencia característica óptima para ese periodo post-fluencia. Sin embargo, la tendencia de los valores de corte basal con respecto a la resistencia característica varía en cada periodo post-fluencia que se está analizando. Se observa del gráfico que para un periodo post-fluencia $T_2 = 4 \text{ seg}$ y una resistencia característica $Q_d = 2.3\% W_s$ el corte basal normalizado por peso sísmico es $\frac{V_s}{W_s} = 0.07$, siendo este valor el mínimo para el valor de periodo mencionado.

4.2.2. Límites para la resistencia característica (Q_d)

La norma chilena para diseño y análisis de estructuras con sistemas de aislación sísmica NCh2745:2013 indica que el sistema de aislación sísmica, la fundación y todos los elementos estructurales ubicados bajo el sistema de aislación se deben diseñar para resistir una fuerza sísmica lateral no menor a V_b , usando todos los requisitos de capacidad, deformación y resistencia apropiados para estructuras no aisladas. El valor de V_b , considerado a nivel de la interfaz de aislación, no debe ser menor que V_s , siendo esta, la fuerza sísmica lateral mínima que

debe resistir la estructura sobre el sistema de aislación. La norma NCh2745 establece que el valor de V_s no debe ser menor que lo siguiente:

1. La fuerza lateral sísmica requerida por NCh433, para una estructura de base fija del mismo peso (W_s), y un periodo igual al de la estructura aislada (T_D). El corte basal mínimo requerido por la norma NCh433.Of96 se debe calcular considerando $I = 1,0$ y $S = 1,0$ para todo tipo de suelo. De esta manera la estructura aislada no se puede diseñar con un corte menor al de la estructura de base fija con el mismo periodo. Se debe considerar $S = 1,0$ en el cálculo de corte basal dado que las fuerzas transmitidas a la superestructura se encuentran controladas por el corte alcanzado por el sistema de aislación. Para el caso de estructuras fundadas en suelo tipo E esta medida se fundamenta en el estudio específico de sitio desarrollado.

El esfuerzo de corte basal está dado por:

$$V_s = C * I * W_s \quad 4.13$$

donde,

C = Coeficiente sísmico el cual se definirá a continuación.

I = Coeficiente relativo al edificio.

W_s = Peso sísmico total del edificio sobre el nivel basal.

El coeficiente sísmico C , en ningún caso puede ser menor a:

$$C > A_o S / 6g \quad 4.14$$

donde,

A_o = Valor de la aceleración efectiva del suelo descrito en la Tabla 4.1.

S = Parámetro relativo al tipo de suelo de fundación.

Tabla 4.1 Valores de A_o

Zona Sísmica	A_o
1	0.2g
2	0.3g
3	0.4g

Para analizar y comparar los resultados se considera el caso más desfavorable, por lo que la zona sísmica que se analiza es la zona sísmica 3 y el tipo de suelo será D. Por lo tanto, el

esfuerzo de corte basal queda definido como:

$$V_S = C * I * W_S; \quad \text{Reemplazo } C > A_o S / 6g.$$

$$V_S > \frac{A_o S}{6g} * I * W_S; \quad \text{Reemplazo } A_o = 0.4g, I = 1,0$$

$$V_S > \frac{0.4g}{6g} * 1.0 * W_S; \quad \text{Simplificar } \frac{0.4g}{6g}.$$

$$V_S > 0.0667 * W_S. \quad 4.15$$

2. El esfuerzo de corte basal correspondiente a la carga de diseño de viento.
3. La fuerza sísmica lateral requerida para activar completamente el sistema de aislación mayorada por 1,5. En el caso de sistemas de aislación con corazón de plomo, el corte mínimo no debe ser menor a 1,5 veces la suma de las resistencias características de los corazones de plomo.

$$V_S > 1.5 \sum Q_d \quad 4.16$$

En este estudio se analiza el comportamiento de un oscilador de 1GDL que equivale al sistema de aislación, por lo que la ecuación anterior queda simplificada a:

$$V_S > 1.5 Q_d \quad 4.17$$

A continuación se presenta la relación entre los puntos 1 y 3 para el cálculo del valor mínimo de V_S , con el fin de determinar la máxima resistencia característica (Q_d), obteniendo la siguiente ecuación:

$$1.5Q_d < 0.0667 W_S; \quad \text{Despejar } Q_d.$$

$$Q_d < \frac{0.0667}{1.5} W_S; \quad \text{Resolver la fracción.}$$

$$Q_d < 0.044 W_S. \quad 4.18$$

Finalmente se obtiene a partir de la ecuación 4.18 que los valores de Q_d no deben ser mayores a 0.044 veces el peso sísmico de la estructura (W_S), para zona sísmica 3. Por lo que los valores de Q_d utilizados para el desarrollo de la metodología ADRS serán:

$$Q_d = [2.0 , 2.5 , 3.0 , 3.5 , 4.0 , 4.5] \% * W_S$$

Adicional a los valores de resistencia característica para la metodología ADRS, se calculan los valores óptimos de Q_d para obtener los mínimos cortes basales a partir del amortiguamiento óptimo de las ecuaciones 4.9 y 4.10 para un valor determinado de periodo post-fluencia. El desarrollo se presenta a continuación:

$$V_S = \frac{8\pi^2 C_D W_S}{T_2^2 g * 4.3632 \left(\frac{2*0.5}{(\pi+0.5\pi)} \right)^{0.5} \left(2 - \left(\frac{2*0.5}{(\pi+0.5\pi)} \right) \pi \right)}; \quad \text{Reemplazar la ecuación 4.10 en 4.9}$$

$$V_S = \frac{8\pi^2 C_D W_S (\pi+0.5\pi)^{0.5}}{T_2^2 g * 4.3632 (2*0.5)^{0.5} \left(2 - \left(\frac{2*0.5}{(1+0.5)} \right) \right)}; \quad \text{Simplificar la ecuación}$$

$$V_S = \frac{4\pi^2 C_D W_S \pi^{0.5} (1+0.5)^{1.5}}{T_2^2 g * 4.3632 (2*0.5)^{0.5}}; \quad \text{Simplificar la ecuación}$$

$$Q_d + K_P \left(\frac{C_D}{4.3632 * \beta^{0.5}} \right) = \frac{4\pi^2 C_D W_S \pi^{0.5} (1+0.5)^{1.5}}{T_2^2 g * 4.3632 (2*0.5)^{0.5}}; \quad \text{Reemplazar } V_S = Q_d + K_P \left(\frac{C_D}{4.3632 * \beta^{0.5}} \right)$$

$$Q_d + \frac{(2\pi)^2}{T_2^2} * \frac{W_S}{g} \left(\frac{C_D}{4.3632 * \beta^{0.5}} \right) = \frac{4\pi^2 C_D W_S \pi^{0.5} (1+0.5)^{1.5}}{T_2^2 g * 4.3632 (2*0.5)^{0.5}}; \quad \text{Reemplazar } K_P = \frac{(2\pi)^2}{T_2^2} * \frac{W_S}{g}$$

$$Q_d = \frac{4\pi^2 C_D W_S \pi^{0.5} (1+0.5)^{1.5}}{T_2^2 g * 4.3632 (2*0.5)^{0.5}} - \frac{(2\pi)^2}{T_2^2} * \frac{W_S}{g} \left(\frac{C_D}{4.3632 * \beta^{0.5}} \right); \quad \text{Despejar la ecuación en función de } Q_d$$

$$Q_d = \frac{4\pi^{2+0.5} C_D W_S (1.5)^{0.5}}{T_2^2 g * 4.3632 * 2^{0.5} * 0.5^{0.5-1}}; \quad \text{Simplificar la ecuación}$$

$$Q_d = \frac{4\pi^{2+0.5} C_D W_S (1.5)^{0.5}}{T_2^2 g * 4.3632 * 2^{0.5} * 0.5^{0.5-1}} \quad 4.19$$

La ecuación 4.19 muestra la relación entre la resistencia característica con respecto al periodo post-fluencia y al parámetro C_D que depende del tipo de suelo y zona sísmica según NCh2745. La Tabla 4.2 muestra los valores teóricos de Q_d para cada combinación de tipo de suelo y zona sísmica para periodos post-fluencia $T_2 = 3$ y 4 seg.

Tabla 4.2 Valores de resistencia característica óptima (% W_s) mediante amortiguamiento óptimo para $T_2 = 3$ y 4 seg para distintas zonas sísmicas y tipos de suelo.

Zona Sísmica	Tipo de Suelo	Periodo Post-Fluencia (seg)	
		3	4
Z=1	A	1.6	0.9
	B	2.5	1.4
	C y D	2.7	1.5
Z=2	A	2.2	1.2
	B	3.3	1.9
	C y D	3.6	2.0
Z=3	A	2.7	1.5
	B	4.1	2.3
	C y D	4.5	2.5

El valor de Q_d para un tipo de suelo B y zona sísmica 3 es igual a 2.3% de W_s para un periodo post fluencia de 4 seg según la Tabla 4.2. Este valor es coincidente con el obtenido en la Figura 4.3 donde el valor de $Q_d = 2.3\%$ de W_s para el mismo periodo post-fluencia, tipo de suelo y zona sísmica.

4.2.3. Periodo límite para metodología ADRS

La normativa NCh2745:2013 indica que el sistema de aislación sísmica se debe configurar para producir una fuerza de restitución tal que la fuerza lateral para el desplazamiento total de diseño sea por lo menos $0,025W_s$ mayor que la fuerza lateral para el 50% del desplazamiento total de diseño. Desarrollando este requisito de la normativa se tiene:

$$F_{TD} \geq 0.025W_s + F_{0,5TD} \quad 4.20$$

donde F_{TD} es la fuerza lateral para el desplazamiento total de diseño, W_s es el peso sísmico de la estructura y $F_{0,5TD}$ es la fuerza lateral para el 50% del desplazamiento total de diseño. Ahora se puede expresar la ecuación anterior de la siguiente manera:

$$F_{TD} = Q_d + K_P D_{TD} \quad 4.21$$

donde D_{TD} es el desplazamiento total de diseño del sistema de aislación. Resolviendo ambas ecuaciones se tiene que:

$$F_{TD} \geq 0.025W_s + F_{0,5TD}; \quad \text{Reemplazar } F_{TD} = Q_d + K_P D_{TD}$$

$$Q_d + K_P D_{TD} \geq 0.025W_s + (Q_d + K_P(0.5D_{TD})); \quad \text{Restar } (Q_d + K_P(0.5D_{TD})) \text{ a ambos lados}$$

$$Q_d + K_P D_{TD} - (Q_d + K_P(0.5D_{TD})) \geq 0.025W_s + (Q_d + K_P(0.5D_{TD})) - (Q_d + K_P(0.5D_{TD})); \text{ Simplificar}$$

$$K_P D_{TD} - K_P(0.5D_{TD}) \geq 0.025W_s; \quad \text{Agrupar el lado izquierdo de la ecuación}$$

$$K_P(D_{TD} - 0.5D_{TD}) \geq 0.025W_s; \quad \text{Resolver } D_{TD} - 0.5D_{TD}$$

$$K_P(0.5D_{TD}) \geq 0.025W_s; \quad \text{Dividir para } 0.5D_{TD}$$

$$K_P \geq \frac{0.025W_s}{0.5D_{TD}}; \quad \text{Resolver } \frac{0.025}{0.5}$$

$$K_P \geq \frac{0.05W_s}{D_{TD}}; \quad \text{Reemplazar } K_P = \left(\frac{2\pi}{T_2}\right)^2 \frac{W_s}{g} \text{ donde } T_2 \text{ es el periodo post-fluencia}$$

$$\left(\frac{2\pi}{T_2}\right)^2 \frac{W_s}{g} \geq \frac{0.05W_s}{D_{TD}}; \quad \text{Simplificar } W_s \text{ y despejar la ecuación con respecto a } T_2$$

$$T_2 \leq 2\pi \sqrt{\frac{D_{TD}}{0.05g}}; \quad \text{Reemplazar } D_{TD} = 1.1 \frac{C_D}{B_D}$$

$$T_2 \leq 2\pi \sqrt{\frac{1.1C_D}{0.05gB_D}} \quad 4.22$$

donde

$$C_D = \begin{cases} 200 Z \text{ (mm), para Suelo A} \\ 300 Z \text{ (mm), para Suelo B} \\ 330 Z \text{ (mm), para Suelos C y D} \end{cases}$$

B_D es el factor de modificación de respuesta por amortiguamiento y Z es el factor que depende de la zonificación sísmica, ambos factores están definidos en la norma NCh2745. Para calcular el máximo periodo post-fluencia, se realizan los cálculos para el peor escenario posible, que en este caso sería un valor de C_D para suelo tipo D y $Z = 1.25$ (zona sísmica 3) y $B_D = 0.65$ (si bien este valor no es un caso práctico, es el mínimo propuesto por la norma NCh2745), dando como resultado:

$$T_2 \leq 2\pi \sqrt{\frac{1.1*330*1.25}{0.05*9800*0.65}}; \quad \text{Reemplazar las variables}$$

$$T_2 \leq 7.45 \text{ seg}$$

La Figura 4.4 muestra la relación que existe entre el periodo post fluencia con respecto al tipo de suelo y el amortiguamiento efectivo para una zona sísmica 3 según NCh2745:2013. Se observa que a medida que el amortiguamiento efectivo decrece el periodo post-fluencia máximo aumenta, alcanzando valores máximos de $T_2 \approx 7.5 \text{ seg}$. Se observa del gráfico que para un suelo tipo C y D los valores de periodo post fluencia aumentan alcanzando valores de $T_2 \approx 7.5 \text{ seg}$., y valores de $T_2 \approx 6 \text{ seg}$, para un suelo tipo A. El gráfico permite seleccionar el periodo post-fluencia límite en función del amortiguamiento efectivo del sistema, por tipo de suelo en el sitio de emplazamiento de la estructura.

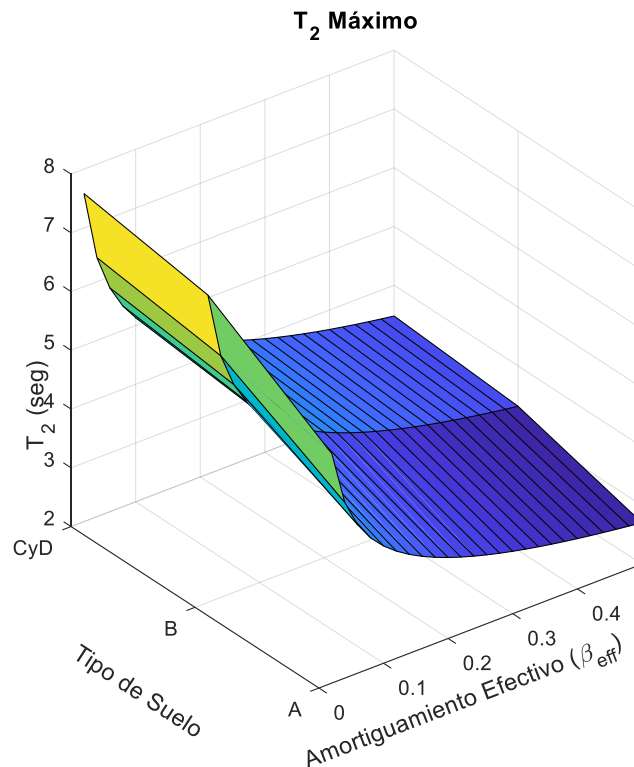


Figura 4.4 Valores de periodo post-fluencia máximos para valores de amortiguamiento efectivo y para un tipo de suelo específico.

El objetivo principal de incorporar sistemas de aislación sísmica en la estructura es concentrar la disipación de energía en dispositivos específicamente diseñados para este propósito, reduciendo sustancialmente los esfuerzos transmitidos a la estructura. Para alcanzar este objetivo, los sistemas de aislación sísmica son diseñados considerando amortiguamientos efectivos típicamente mayores a un 15%.

Para el presente estudio se consideraron valores de T_2 fluctuando entre 2 y 7 seg. Si bien los valores cercanos a los 7 seg corresponden a valores de amortiguamiento efectivo cercanos a 0, son considerados porque normativamente se pueden considerar valores menores o iguales a 2%.

No obstante, estos valores se alejan de la realidad en el diseño de sistemas de aislación sísmica. La Figura 4.5 muestra un resumen más detallado de los valores máximos de T_2 para valores de β_{eff} mayores a 5%, alcanzando valores de T_2 que fluctúan entre los 3 y 6 seg, aproximadamente, para distintas combinaciones de zona sísmica y tipo de suelo, según norma NCh2745.

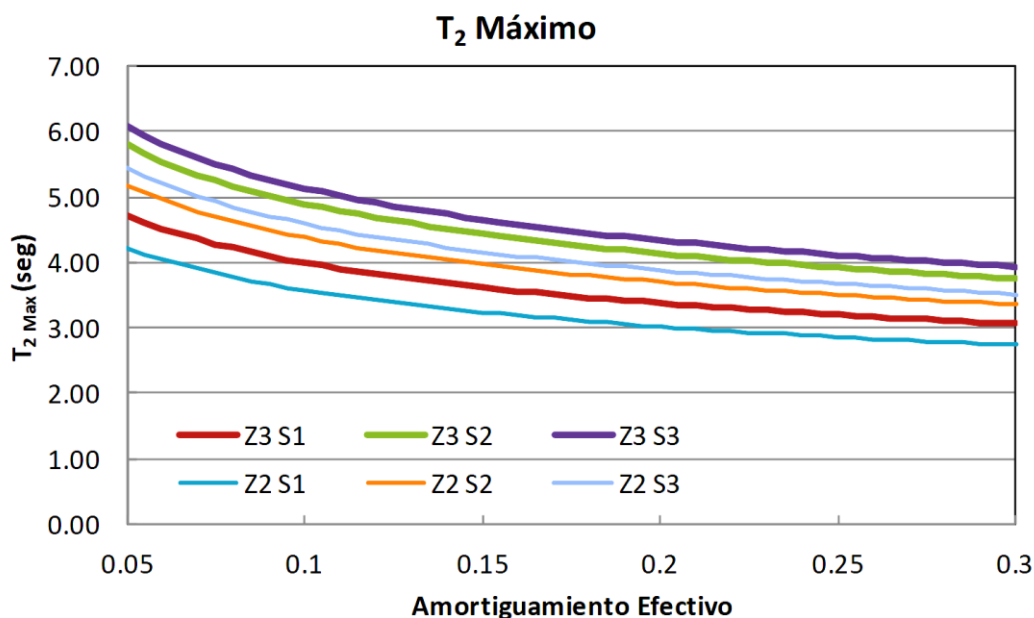


Figura 4.5 Relación entre el amortiguamiento efectivo y el periodo post-fluencia para distintas combinaciones de zona sísmica y tipo de suelo.

En la sección 4.2.1 se determina el valor óptimo de amortiguamiento descrito en la ecuación 4.10 para los periodos post-fluencia. Este valor de amortiguamiento se puede reemplazar en la ecuación 4.22 para encontrar los valores máximos de periodo post-fluencia para una zona sísmica y tipo de suelo específico. La Tabla 4.3 muestra los valores máximos de T_2 a partir del amortiguamiento óptimo.

Tabla 4.3 Valores máximos de periodo post-fluencia para zona sísmica y tipo de suelo específico

Zona Sísmica	Tipo de Suelo	T_{2max} (seg)
Z=1	A	2.58
	B	3.15
	C y D	3.31
Z=2	A	2.97
	B	3.64
	C y D	3.82
Z=3	A	3.32
	B	4.07
	C y D	4.27

De los valores máximos de periodo post-fluencia para cada zona sísmica y tipo de suelo se puede ajustar la Tabla 4.2 para mostrar los valores óptimos de resistencias características que cumplan con el límite de periodo máximo. La Tabla 4.4 muestra los valores óptimos de Q_d y sombrea los valores que superen el periodo post fluencia máximo establecido para la zona sísmica y tipo de suelo específico.

Tabla 4.4 Valores de resistencia característica óptima (% W_s) para T_2 entre 2 y 5 seg para distintas zonas sísmicas y tipos de suelo señalando los límites de periodo máximo.

Zona Sísmica	Tipo de Suelo	Periodo post fluencia (seg)												
		2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00
Z=1	A	3.7	2.9	2.3	1.9	1.6	1.4	1.2	1.0	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6
	B	5.5	4.3	3.5	2.9	2.4	2.1	1.8	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	0.9
	C y D	6.1	4.8	3.9	3.2	2.7	2.3	2.0	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1	1.0
Z=2	A	4.9	3.9	3.1	2.6	2.2	1.9	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	0.9	0.8
	B	7.3	5.8	4.7	3.9	3.3	2.8	2.4	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3	1.2
	C y D	8.1	6.4	5.2	4.3	3.6	3.1	2.6	2.3	2.0	1.8	1.6	1.4	1.3
Z=3	A	6.1	4.8	3.9	3.2	2.7	2.3	2.0	1.7	1.5	1.4	1.2	1.1	1.0
	B	9.2	7.2	5.9	4.9	4.1	3.5	3.0	2.6	2.3	2.0	1.8	1.6	1.5
	C y D	10.1	8.0	6.5	5.3	4.5	3.8	3.3	2.9	2.5	2.2	2.0	1.8	1.6

5. DEMANDAS SÍSMICAS PARA EVALUACIÓN DEL DISEÑO

5.1. Selección de registros sísmicos

En los actuales códigos y normativas incluyen métodos para el diseño de estructuras con sistemas de aislación sísmica utilizando procedimientos de análisis no lineal de respuesta en el tiempo. Desafortunadamente, en la actualidad, no existe un consenso respecto a la metodología para seleccionar apropiadamente los registros sísmicos para el diseño normativo o el análisis del desempeño sísmico de las estructuras.

A continuación, se presenta una guía para la selección de los registros sísmicos requeridos para efectuar un análisis no lineal de respuesta en el tiempo. Adicionalmente se presentan recomendaciones específicas del ASCE/SEI 7-16 (ASCE, 2016) y del PEER NGA (PEER, 2011), junto a especificaciones emanadas del procesamiento de datos de los registros obtenidos durante el terremoto del Maule de 2010 (Boroschek et al., 2012).

Los registros sísmicos deben ser seleccionados a partir de eventos sísmicos reales o a partir de registros artificiales físicamente basados en condiciones específicas. Los registros artificiales constituyen una herramienta conveniente, pero sus deficiencias, que surgen de su disimilitud con los registros sísmicos reales en términos de número de ciclos, contenido de frecuencia y duración, son ampliamente reconocidos, por lo que su uso en análisis no lineales de respuesta en el tiempo no es recomendado (Hancock y Abrahamson, 2006). En la actualidad se posee una base de datos de eventos sísmicos reales a nivel mundial, disponibles por medio de instituciones e iniciativas tales como la Red de Cobertura Nacional de Acelerogramas (RENADIC) y el Centro Sismológico del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (GUC) para registros sísmicos en Chile, o la base de datos del PEER NGA que consta con una gran variedad de registros sísmicos a nivel mundial, principalmente de Norte América y Europa. Para este estudio se utilizaron registros sísmicos registrados por los instrumentos del RENADIC y del GUC, los cuales han estado en operación desde la década del 70. La mayoría de los instrumentos son acelerómetros análogos (SMA-1 o similar) localizados en edificios de baja altura. Varios de estos instrumentos cuentan con información geológica del sitio donde se ubican.

El procesamiento de los registros sísmicos tiene principalmente dos objetivos enfocados en el uso de análisis ingenieril: (1) corrección por la respuesta del instrumento ante un movimiento fuerte; y (2) reducción del ruido aleatorio en las series de tiempo registradas (PEER NGA, 2008). El procedimiento para procesar los registros sísmicos que se presenta a continuación se basa en los procedimientos propuestos por PEER NGA y Boroschek et al. (2012), que buscan preservar las señales de altas y bajas frecuencias. Las características del procedimiento para el

procesamiento de registros son las siguientes:

1. Revisión visual de cada registro sísmico en búsqueda de posibles errores instrumentales.
2. Corrección por línea base. Proceso en el cual se elimina la tendencia lineal de la serie de entrada, que representa la posición de la línea de aceleraciones nulas, mediante una regresión lineal por mínimos cuadrados o el valor promedio de la serie de tiempo.
3. Se evalúa el Espectro de Amplitud de Fourier (FAS) para evaluar el contenido de frecuencias e identificar el máximo valor utilizable (f_{max}) y estimar preliminarmente el corte de filtro bajo (f_{min}). La Figura 5.1 muestra un ejemplo del Espectro de Amplitud de Fourier para la componente este-oeste del registro de la estación de Arica del terremoto de Tarapacá $M_w = 7.9$ de 2005. Típicamente, f_{max} se considera igual a 90 Hz para una frecuencia Nyquist de 100 Hz y 40 Hz para una frecuencia Nyquist de 50 Hz (Boroschek et al., 2012).

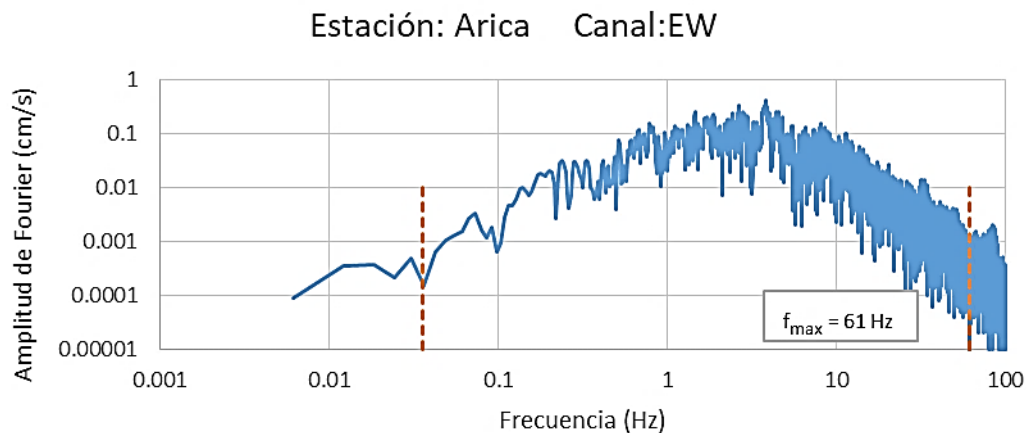


Figura 5.1 FAS para la componente este-oeste de la estación de Arica para determinar valor de f_{max} y valor preliminar de f_{min} .

4. Se aplica el ventaneo (tapering) al inicio y al final del registro para buscar el primer y último cruce por cero. La señal se reduce a ceros fuera de la región de ventaneo, tal como lo describe Converse and Brady (1992).
5. Se añaden los ceros al inicio y al final del registro con una longitud que dependerá de f_{min} y del orden del filtro de Butterworth considerado, donde la cantidad de ceros está dada por (Converse and Brady 1992):

$$1.5 * \frac{\left(\frac{n_{roll}}{2}\right)}{f_{min}} \quad 5.1$$

donde n_{roll} es el orden del filtro Butterworth. Por ejemplo, 80 seg de ceros se agregaron a Arica ($f_{min} = 0.036$ Hz; filtro de cuarto orden).

6. Se procede a realizar un proceso iterativo para seleccionar el valor final de f_{min} , en donde el valor de f_{min} aumenta y disminuye como lo describe Boroschek et al. (2012), y la serie de tiempo del desplazamiento integrada y el espectro de respuesta del desplazamiento son revisados. Este proceso se muestra en la Figura 5.1 para el registro de Arica (componente este-oeste) donde se busca el valor mínimo de f_{min} que preserve la apariencia del registro en el dominio del tiempo. En este caso se seleccionó f_{min} igual a 0,03 Hz.
7. Se aplica un filtro de Butterworth de cuarto orden.
8. Finalmente se calculan los espectros de aceleración para un 5% de amortiguamiento.

En la Figura 5.2 se presenta un registro de aceleraciones obtenido del terremoto del Maule M_w 8.8 del 27 de febrero de 2010. En el lado izquierdo de la figura se muestran los registros de aceleraciones, velocidad y desplazamiento sin corrección, mientras que en el lado derecho de la figura se muestran los registros sometidos a las correcciones presentadas anteriormente.

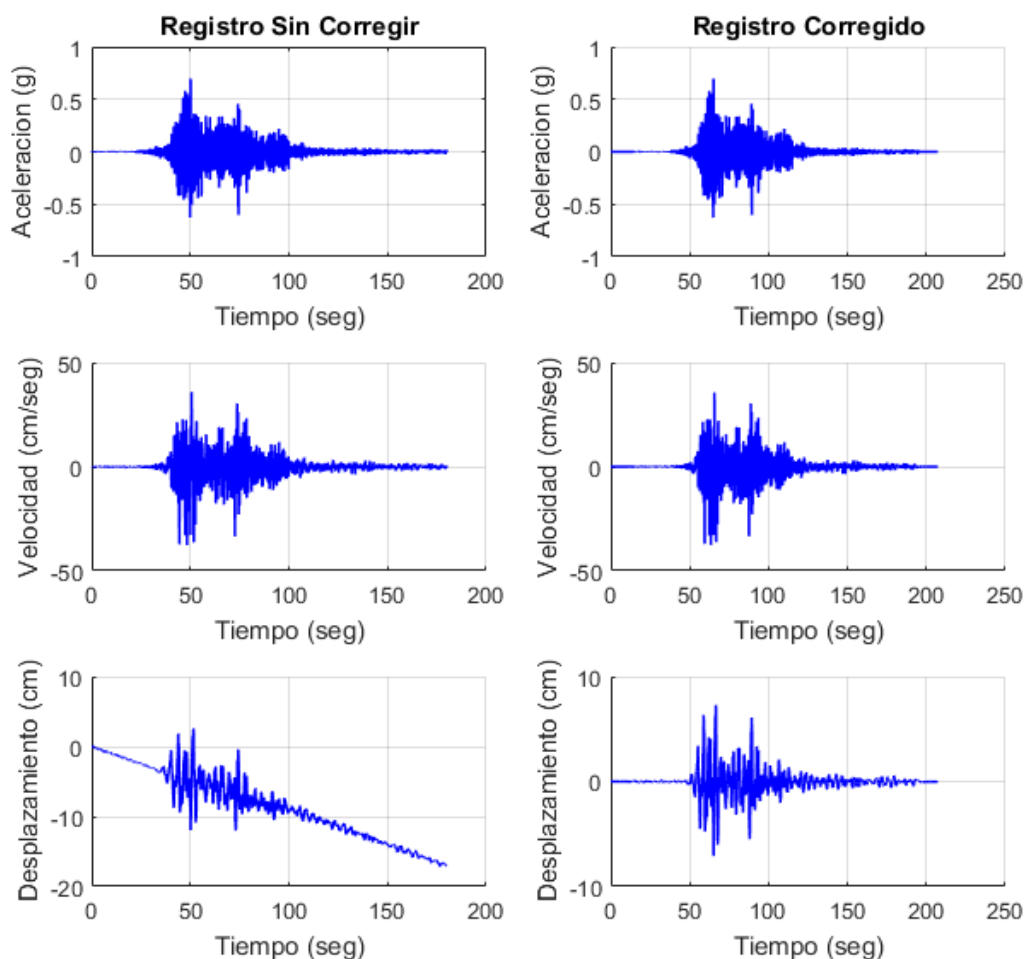


Figura 5.2 Lado Izquierdo: Registro de aceleración, velocidad y desplazamiento respectivamente sin corregir. Lado Derecho: Registro de aceleración, velocidad y desplazamiento respectivamente corregidos.

Como se observa en la Figura 5.2, el registro de desplazamientos sin corregir no se encuentra centrado y los resultados de desplazamiento muestran derivas del instrumento cercanas a los 20 cm. Para el registro de desplazamientos corregido, la gráfica se observa centrada y los valores máximos son aproximadamente la mitad de los estimados para el registro sin corregir. Por tanto, resulta de suma importancia efectuar la corrección de los registros de aceleraciones, si se requiere evaluar desplazamientos, como es el caso del presente trabajo de investigación.

5.1.1. Base de datos RENADIC

Un total de 149 pares de registros sísmicos reales se utilizan en la presente investigación, con magnitudes de momento mayores o iguales a 6.3, los cuales fueron seleccionados en distintas zonas de Chile para abarcar la mayor parte del territorio y conseguir una mejor estimación de los resultados para distintos tipos de suelo y zona sísmica. Para cada registro se cuenta con dos componentes de aceleración horizontales y una componente de aceleración vertical. Estos

registros pertenecen a la Red Nacional de Acelerógrafos (RENADIC). En la Tabla 5.1 se presentan los eventos seleccionados y la cantidad de registros sísmicos asociados a cada uno.

Tabla 5.1 Registros sísmicos procesados.

Fecha de evento	Ubicación Epicentro	Tipo de Mecanismo o Focal	M _w	Registros
24/07/2001	Chusmiza	Cortical	6.3	3
28/08/2004	Curicó	Cortical	6.6	1
23/06/2001	Sur de Perú	Interplaca	8.4	7
25/12/2016	Chiloé	Interplaca	7.6	23
16/09/2015	Illapel	Interplaca	8.4	52
01/04/2014	Iquique	Interplaca	8.2	25
27/02/2010	Maule	Interplaca	8.8	21
14/10/1997	Punitaqui	Intraplaca	7.1	3
13/06/2005	Tarapacá	Intraplaca	7.9	14
Total eventos				9
Total registros				149

La Figura 5.3 muestra los epicentros de los terremotos estudiados y la ubicación de las estaciones donde se registraron las señales consideradas, las que intentan cubrir la mayor porción del territorio nacional.

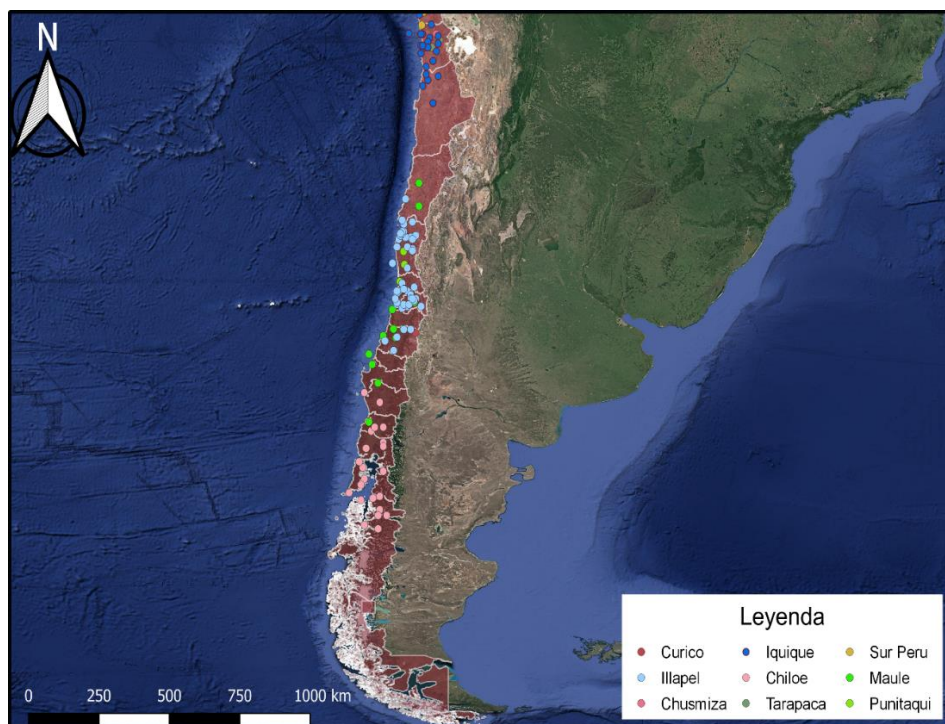


Figura 5.3 Ubicación de epicentros de terremotos y estaciones de registro de sismos

5.1.2. Variables consideradas en selección de registros sísmicos

A partir de los registros sísmicos se obtuvieron parámetros que son agrupados en dos categorías: datos geotécnicos, tales como clasificación sísmica del suelo y velocidad de onda de corte promedio; y magnitud de momento reportada, mecanismo y profundidad focal. Los datos recopilados son los siguientes:

Clasificación del suelo:

Se determinan a partir de las referencias en donde se han utilizado las mismas estaciones (Boroschek et al., 2012) y se pudo establecer la clasificación del suelo según la normativa NCh433.Of96.Mod2009. En casos donde el tipo de suelo no está descrito en la referencia investigada, se utiliza la metodología basada en la razón de espectros de componentes horizontales sobre la componente vertical (H/V) para determinar la calidad del suelo.

Magnitud de Momento y ubicación:

Se obtienen directamente de los reportes generados por el Centro Sismológico Nacional (CSN) o la Red de Nacional de Acelerógrafos (RENADIC). En caso de discrepancia entre los datos reportados por estas instituciones, se opta por considerar la información proporcionada por el CSN. La ubicación de estaciones se obtiene a partir de la información de los registros sísmicos o de los datos entregados por RENADIC.

Mecanismo Focal:

La información sobre el mecanismo focal de cada evento es determinada en función de la profundidad focal. El mecanismo de sismo Intraplaca de profundidad intermedia corresponde a los eventos con una profundidad hipocentral mayor a 60 km. En el caso profundidades focales menores a este valor, se considera que el evento corresponde a un mecanismo Interplaca si ocurre en la zona de subducción; y a un mecanismo cortical o superficial si ocurre dentro de la placa continental.

5.1.3. Medidas de intensidad del movimiento del suelo

Existen muchas medidas de intensidad del movimiento del suelo. En esta sección se identifican las que es estiman más importantes al momento de desarrollar análisis no lineales de respuesta en el tiempo. La medida de intensidad más utilizada es la aceleración espectral con 5% de amortiguamiento S_a . Existen 3 tipos principales de aceleraciones espectrales horizontales: componente arbitraria ($S_{a_{arb}}$); media geométrica ($S_{a_{mg}}$); y dirección máxima ($S_{a_{maxDir}}$). Estas

tres definiciones se discuten en el reporte del NIST (NIST, 2011a). Cualquiera de estas tres definiciones se puede utilizar, y la estimación del desempeño sísmico, en general, no depende de la elección.

Otra medida de intensidad que se utiliza en esta investigación es la Intensidad de Arias (IA), parámetro que se correlaciona con el potencial destructivo de un terremoto, y calculado como la integral del cuadrado de la historia de aceleraciones. Este parámetro se correlaciona de buena manera con varias medidas de demanda comúnmente utilizadas en el desempeño estructural, licuefacción y estabilidad sísmica de taludes (Travasarou et al., 2003).

La Intensidad de Arias se relaciona con la energía acumulada por unidad de peso absorbida por un set infinito de osciladores de un grado de libertad (1GDL) teniendo frecuencias fundamentales uniformemente distribuidas en el rango $(0, \infty)$. En el caso que los osciladores tengan amortiguamiento cero, la Intensidad de Arias se define de la siguiente manera:

$$I_{xx} = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} a_x(t)^2 dt \quad 5.2$$

donde I_{xx} es la Intensidad de Arias, $a_x(t)$ es la aceleración registrada en unidades de g , y g es la aceleración de gravedad. Por su definición, la intensidad de Arias es un tensor de segundo orden, cuya traza ($I_{xx} + I_{yy} + I_{zz}$) es una invariante y en consecuencia todos los pares de ejes mutuamente perpendiculares a través de un punto de origen predefinido tienen la misma intensidad de Arias (ej. $I_{xx} + I_{yy} = \text{constante}$). En la Figura 5.4 se muestra el registro de aceleraciones de la estación C180 en sentido Este-Oeste obtenido durante el terremoto de Illapel M_w 8.4 del 16 de septiembre de 2015. En la figura también se muestran su espectro de aceleraciones y su Intensidad de Arias.

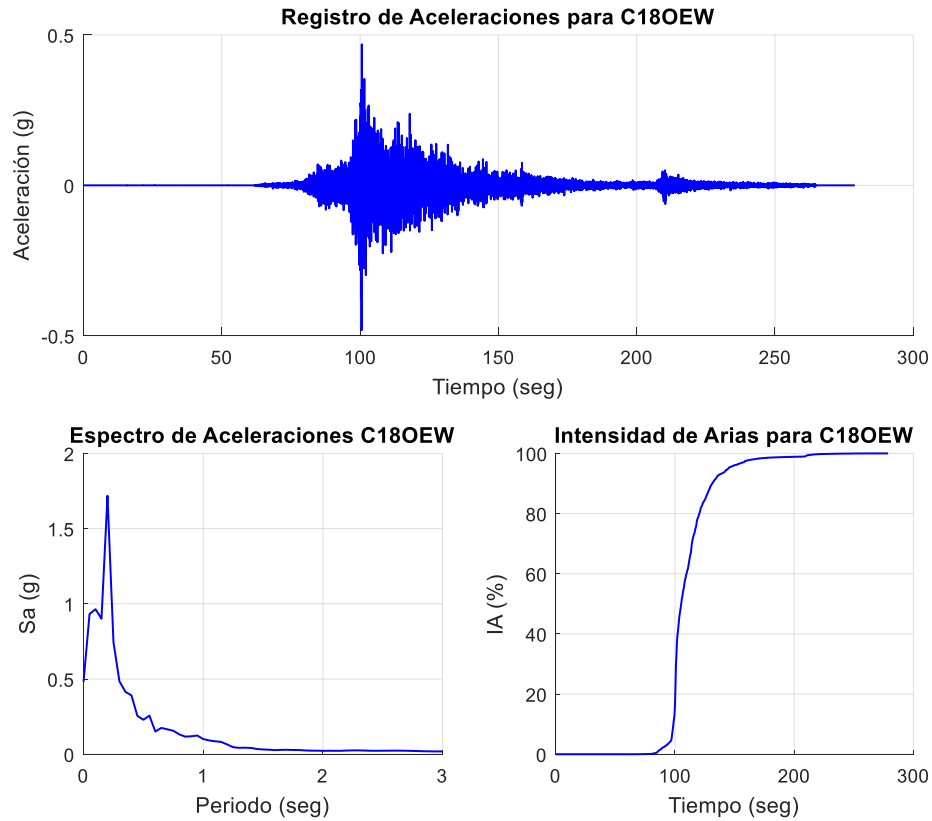


Figura 5.4 Superior: Registro de aceleraciones de la estación C18O en la dirección Este-Oeste. Inferior Izquierda: Espectro de aceleraciones del registro C18O. Inferior Derecha: Intensidad de Arias normalizada del registro C18O

Para la presente investigación se seleccionan los registros de aceleraciones de dos maneras diferentes: (1) de manera aleatoria con todos los registros sísmicos especificados en las secciones anteriores; y (2) registros que presenten la mayor Intensidad de Arias (IA). Si bien esta última opción no se encuentra desarrollada e investigada como parámetro de selección de registros sísmicos, se plantea como hipótesis para la aplicación de la metodología ADRS.

5.2. Número de registros sísmicos a utilizar

El número de registros que se utilizan cumple un rol fundamental en los análisis no lineales de respuesta en el tiempo. Típicamente en la práctica de diseño estructural se utilizan 7 registros sísmicos, pero el número apropiado de registros todavía es un tópico bajo investigación (Haselton et al., 2011). El número apropiado de registros sísmicos es dependiente de la aplicación en la cual se los vaya a utilizar, como la respuesta estructural que se requiere evaluar, si se desean valores medios o distribuciones en la respuesta, la precisión requerida de los valores estimados de la media y la varianza, la posible estimación de las respuestas máximas o la probabilidad de colapso, y el grado esperado de respuesta inelástica en el sistema, entre otros.

Para sitios distantes a una falla, el factor más importante en la selección de registros sísmicos para el escalamiento a un espectro objetivo es su forma espectral sobre el rango de periodos de interés. Consideraciones secundarias son la magnitud del sismo, distancia a la falla, condiciones locales de sitio, y la diferencia espectral ϵ entre el espectro objetivo y el espectro de aceleraciones del registro sísmico en el periodo de interés. Seleccionar pares de registros cuyas formas espectrales sean similares a las del espectro objetivo minimiza la cantidad de registros a utilizar, así como la necesidad de escalarlos y modificarlos.

La Tabla 5.2 presenta especificaciones para la selección de registros sísmicos para análisis no lineal de respuesta en el tiempo a partir de las siguientes normativas y documentos: *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE Standard 7-05 (ASCE/SEI, 2006), *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE Standard 7-10 (ASCE/SEI, 2010), *An Alternative Procedure for Seismic Analysis and Design of Tall Buildings Located in the Los Angeles Region* (LATBSDC, 2008), *Seismic Design Guidelines for Tall Buildings*, desarrollado por el Pacific Earthquake Engineering Reserch Center (PEER, 2009), y la norma Chilena de Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica NCh2745.

Tabla 5.2 Especificaciones para la selección de registros sísmicos para diferentes normativas.

Selección de Registros	ASCE 7-05	ASCE 7-10	LATBSDC (2008)	PEER TBI (2009)	NCh2745 (2013)
Número de Registros	≥ 7 (o 3) pares		≥ 7 pares	≥ 7 pares	≥ 3 pares
Tipo de Registros	Reales y Artificiales				
Otros	Ninguno		Número apropiado de registros con efectos de directividad	Directividad es necesaria	Ninguno

Existen diversas opciones en el número de registros a utilizar en los análisis no lineales de respuesta en el tiempo, sin embargo, la mayoría de las normativas vigentes requiere que como mínimo se usen 3 pares de registros sísmicos. Para desarrollar la metodología ADRS se analiza como una de sus variables el número de registros sísmicos a utilizar, por lo que se obtienen gráficos ADRS para 3, 7 y 21 pares de registros, a fin de identificar la similitud o diferencia de utilizar distintos números de registros sísmicos en el análisis.

5.3. Métodos de escalamiento de registros sísmicos

El diseño sísmico de estructuras se basa generalmente en un espectro de respuesta obtenido de normas de diseño o a partir de un análisis de peligro sísmico probabilístico para un periodo de retorno específico. Este análisis probabilístico es utilizado para determinar la demanda sísmica requerida para el diseño, considerando las incertezas de magnitud y distancia a la falla. Para el diseño de sistemas de aislación sísmica de base, realizar un análisis por desempeño mediante un análisis no lineal dinámico de respuesta en el tiempo permite al diseñador evaluar de una mejor manera el efecto de implementar el sistema de aislación. El análisis de respuesta en el tiempo requiere de un input en la forma de un registro sísmico apropiadamente escalado a un espectro objetivo, o al menos escalado en un rango cercano al periodo fundamental de la estructura. La inherente variabilidad que existe entre los registros sísmicos requiere que se realice una gran cantidad de análisis no lineales de respuesta en el tiempo con el fin de obtener un estimativo representativo de la respuesta sísmica de la estructura. El número de análisis no lineales de respuesta en el tiempo puede ser reducido significativamente si los registros sísmicos a utilizar son escalados a un espectro objetivo, obteniendo de esta manera, una reducción entre las diferencias del espectro objetivo y los espectros de respuesta de los registros sísmicos considerados. Si bien estos registros se convierten en “artificiales” como resultado del proceso de escalamiento, pueden conservar la mayoría de (si no todas) las características de los registros de los terremotos reales (Hancock y Abrahamson, 2006).

Los registros de series en el tiempo para el diseño se desarrollan mediante la modificación de las series de tiempo originales, registradas durante terremotos pasados, o registros simulados numéricamente, con las mismas características de magnitud y distancia a la fuente que la del evento controlador del diseño. Los registros sísmicos deben contar con un espectro de respuesta consistente con un espectro de diseño objetivo, que para este estudio corresponden al Sismo Máximo Posible (SMP) de la norma de análisis y diseño de estructuras con sistemas de aislación sísmica NCh2745 y el Espectro Medio Condicional (EMC).

Existen varios métodos que modifican estas series de tiempo y las aproximan a los espectros de respuesta objetivo, entre ellos el del factor de escala y el del escalamiento espectral. En el factor de escala, se multiplica la serie de tiempo inicial por un valor constante para que el espectro de respuesta de la serie de tiempo escalada sea igual o exceda al espectro objetivo en un rango de periodos preestablecido. Por otro lado, el escalamiento espectral modifica la serie de tiempo inicial en el espacio del tiempo o la frecuencia, para que su espectro de respuesta sea igual al espectro objetivo en todos sus periodos.

5.3.1. Escalamiento espectral

El escalamiento espectral es el método más utilizado para escalar registros sísmicos a un espectro objetivo. Sin embargo, el concepto de utilizar series de tiempo compatibles con el espectro objetivo en el diseño sísmico de estructuras resulta controversial por dos razones (Al Atik y Abrahamson, 2010). Primero, el espectro objetivo es una envolvente de varios registros sísmicos, por lo que al escalar la serie de tiempo esta representa más de un registro sísmico. Generalmente dicha serie de tiempo conlleva una sobrestimación de la respuesta sísmica. Segundo, las series de tiempo escaladas al espectro objetivo poseen espectros de respuesta suavizados, que son considerados no realistas en comparación con los espectros de respuesta de registros sísmicos reales, que tienden a presentar peaks y valles.

Una serie de tiempo escalada espectralmente equivale a tres series de tiempo escaladas mediante factor de escala en términos de variabilidad de la media de la respuesta no lineal de una estructura (Bazzurro y Luco 2006). Por ejemplo, en un análisis no lineal dinámico, si se necesitan 12 registros sísmicos escalados por medio de un factor de escala constante para alcanzar un 15% de exactitud en la media de un parámetro de respuesta estructural, entonces solo se necesitan 4 series de tiempo escaladas espectralmente para alcanzar la misma exactitud en el mismo análisis. Esto es una ventaja al analizar la demanda computacional necesaria en los análisis requeridos para alcanzar similares resultados.

Existen tres aproximaciones para realizar el escalamiento espectral: método del dominio de la frecuencia, método del dominio de la frecuencia con teoría de vibración aleatoria (RVT), y el método del dominio en el tiempo. El escalamiento espectral en el dominio de la frecuencia ajusta el espectro de amplitudes de Fourier basado en la relación del espectro de respuesta objetivo y el espectro de respuesta de la serie de tiempo manteniendo ajustada la fase de Fourier de la serie de tiempo. Si bien este proceso es sencillo, posee varias desventajas, entre las cuales se encuentran: alterar la característica no estacionaria de la serie de tiempo, lo que dificulta la convergencia de la respuesta estructural (Al Atik and Abrahamson, 2010). El método del dominio de la frecuencia con teoría de vibración aleatoria (RVT), como su nombre lo indica, utiliza vibraciones aleatorias para ajustar el espectro de amplitudes de Fourier inicial, seguido del método del dominio de la frecuencia explicado anteriormente para ajustes de menor escala. Como último método espectral se encuentra el escalamiento en el dominio del tiempo, en el cual se ajusta la serie de tiempo en el dominio del tiempo adicionándole wavelets (sección 5.3.1.2) a la serie de tiempo inicial. Este método cuenta con mejores propiedades de convergencia y en muchos casos preserva la característica no estacionaria de la serie de tiempo referencial (Al Atik

and Abrahamson, 2010). Para el desarrollo de esta tesis solo se estudian los escalamientos espectrales en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

5.3.1.1. Escalamiento en el dominio de la frecuencia

El diseño sísmico de estructuras se basa principalmente en una representación de los terremotos mediante espectros de respuesta. En muchas ocasiones, el análisis no lineal dinámico de estructuras es requerido y los registros sísmicos a utilizar deben ser definidos en la forma de series de tiempo, los cuales generalmente requieren ser compatibles con el espectro de demanda elástico representativo de las condiciones del sitio y escalado para satisfacer los requisitos de las normativas vigentes. Existen varias opciones para realizar escalamiento de registros sísmicos. En esta sección se detalla el procedimiento de escalamiento en el dominio de la frecuencia.

Uno de los escalamientos espectrales comúnmente utilizado es el escalamiento en el dominio de la frecuencia, el cual se basa principalmente en un ajuste del espectro de amplitudes de Fourier generando acelerogramas basados en registros sísmicos. Sin embargo, al ajustar el espectro de Fourier, las series de tiempo de velocidad y desplazamiento pueden presentar un irreal contenido de energía (Naeim y Lew, 1995).

En este método un registro sísmico es filtrado en el dominio de la frecuencia mediante su relación espectral con el espectro objetivo. El espectro de amplitud de Fourier de un registro ingresado como input es modificado mientras que las fases del espectro de Fourier se mantienen sin cambio durante todo el proceso. La preservación de las características de las fases del espectro de Fourier es importante para los análisis no lineales de respuesta en el tiempo, porque la respuesta no lineal puede ser sensible al ajuste de fase del registro de tiempo individual. Para mantener esta fase con la mínima alteración posible, se debe aplicar a la señal una “función de transferencia” para reescalar las amplitudes de Fourier. Esta técnica se repite iterativamente hasta alcanzar el escalamiento deseado en un rango de periodos. Mientras más iteraciones se realicen, habrá una mejor compatibilidad con el espectro objetivo.

La Figura 5.5 muestra el espectro de respuesta de un registro de aceleraciones obtenido del terremoto de Illapel M_w 8.4 del 16 de septiembre de 2015, al cual se le realizó el escalamiento espectral en el dominio de la frecuencia al espectro objetivo especificado en la norma NCh2745 para un suelo tipo B y zona sísmica 3.

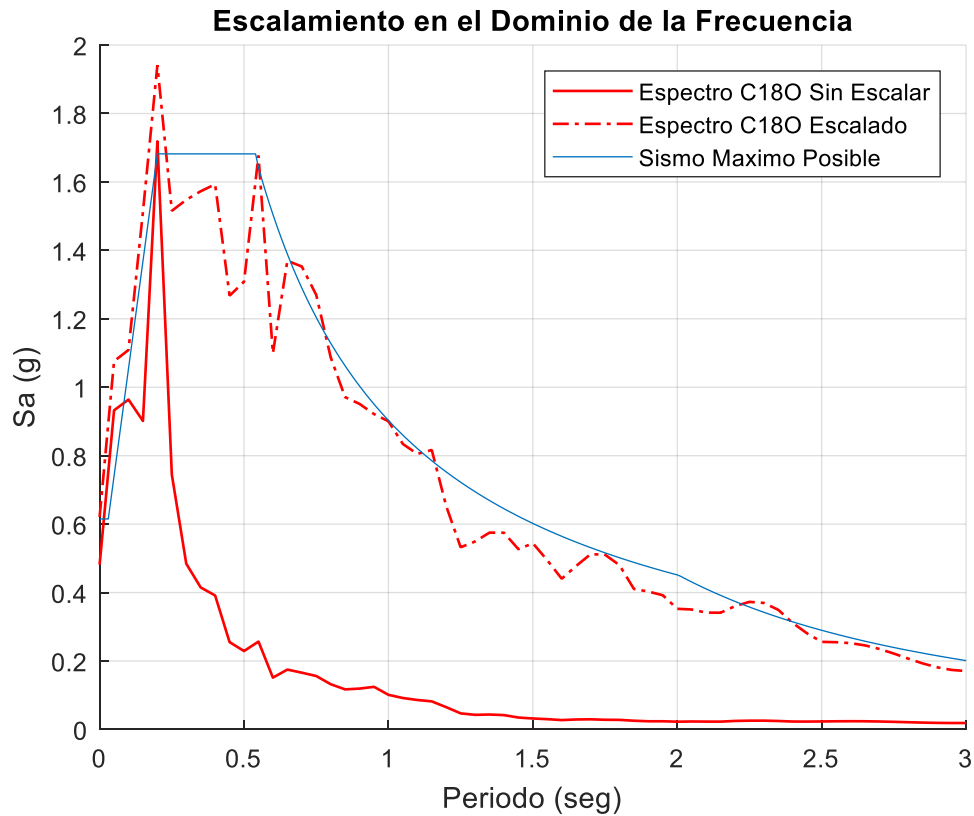


Figura 5.5 Escalamiento en el dominio de la frecuencia de un registro sísmico a un espectro objetivo.

El escalamiento en el dominio de la frecuencia del registro sísmico de la Figura 5.5 se realizó para un rango de periodos entre 0.05 y 3 seg. Sin embargo, para la metodología ADRS se considera un escalamiento hasta los 7 seg especificada en la sección 4.2.3.

5.3.1.2. Escalamiento en el dominio del tiempo

Cuando se realizan análisis no lineales de respuesta en el tiempo para una estructura con sistemas de aislación sísmica, disipadores de energía o incorporando sus propiedades no lineales, los registros sísmicos utilizados suelen ser escalados a un espectro objetivo, como el Sismo Máximo Posible (SMP) definido por la norma Chilena NCh2745. Para realizar este tipo de escalamiento de registros sísmicos existen varias metodologías como se explicó anteriormente. Sin embargo, en esta sección se explica el método de escalamiento espectral en el dominio del tiempo, propuesto por Kaul (1978), y luego extendido mediante el algoritmo propuesto por Lilhanand y Tseng (1987, 1988), desarrollado por Al Atik y Abrahamson (2010) y que ha sido implementado en varios programas especializados como RspMatch y SeismoMatch, los cuales utilizan funciones wavelets para modificar la serie de tiempo inicial de modo que su respuesta espectral sea compatible con el espectro objetivo.

La teoría de wavelets es una herramienta matemática desarrollada a fines del siglo XX que ha despertado gran atención en diversos campos de la ingeniería. Las wavelets son funciones que tienen una forma de onda característica que es oscilante y suave, la cual permite la descomposición de una señal en el tiempo y la frecuencia. El ajuste mediante wavelets a los registros de acelerogramas tiene las mismas ventajas que el método de ajuste por Fourier. Sin embargo, conduce a una corrección más enfocada en el dominio del tiempo introduciendo así menos energía en el registro sísmico y conservando las características no estacionarias del registro sísmico original.

El método propuesto por Lilhanand y Tseng (1987, 1988) emplea wavelets que utilizan la respuesta elástica de sistemas de un grado de libertad, permitiendo que los acelerogramas sean espectralmente compatibles minimizando los ajustes requeridos. Esta metodología es adoptada para el desarrollo de los escalamientos en el dominio del tiempo de los registros sísmicos a utilizar. A continuación, se presentan los pasos principales a seguir para aplicar este método de escalamiento:

1. Calcular el espectro de respuesta de un sistema elástico de 1GDL para una serie de tiempo de un registro de aceleraciones, el cual es escalado para cada periodo para un nivel de amortiguamiento específico.
2. Comparar los peaks de cada respuesta espectral del sistema de 1GDL con el espectro objetivo y determinar el desajuste entre ambos espectros de respuestas.
3. Adicionar wavelets a la serie de tiempo del registro de aceleraciones con las amplitudes apropiadas y un ajuste de fase para que cada peak de la respuesta espectral coincida con las amplitudes del espectro objetivo. Una wavelet se utiliza para escalar una respuesta del sistema de 1GDL.

Las wavelets se aplican en la serie de tiempo de aceleraciones. El tiempo de la respuesta espectral del sistema de 1GDL bajo la acción de la wavelet será el mismo que el tiempo de la respuesta que será ajustada de la serie de tiempo de aceleraciones ingresada como input. Si $a(t)$ es la serie de tiempo de aceleraciones inicial, el objetivo es modificar $a(t)$ de tal manera que su espectro de respuesta coincida con el espectro objetivo en todo el rango de periodos de interés, manteniendo las series de tiempo de velocidad y desplazamiento originales. No variar el tiempo de la respuesta espectral máxima en función del ajuste al adicionar la wavelet, es un supuesto fundamental para la metodología de escalamiento de registros. Este supuesto no siempre se cumple y la respuesta obtenida diverge de la solución esperada.

La diferencia entre el espectro objetivo y el espectro de respuesta de la serie de tiempo de aceleraciones, para una frecuencia (ω_i) y un amortiguamiento (β_i), también llamado desajuste espectral, está dado por:

$$\Delta R_i = (Q_i - R_i)P_i \quad 5.3$$

donde Q_i es el valor del espectro objetivo, R_i es el valor espectral de la serie de tiempo del registro de aceleraciones y P_i es la polaridad de la respuesta máxima del oscilador. P_i es una variable similar a la función signo (sgn), la cual es igual a 1 si la respuesta máxima del oscilador es positiva, e igual a -1 si la respuesta máxima del oscilador es negativa.

Considerando que el tiempo de la máxima respuesta del oscilador t_i , no se modifica al realizar el ajuste a $a(t)$, se debe determinar una serie de tiempo del ajuste a realizar $\delta a(t)$, de manera que la respuesta del oscilador de $\delta a(t)$ para el tiempo t_i sea igual a ΔR_i para todo i . $\delta a(t)$ puede escribirse como:

$$\delta a(t) = \sum_{j=1}^N b_j f_j(t) \quad 5.4$$

donde $f_j(t)$, es un set de funciones de ajustes, b_j es el vector de amplitudes de la función de ajuste y N es el número total de puntos espectrales a ser escalados. La respuesta de aceleraciones de $\delta a(t)$ para una frecuencia (ω_i) y un amortiguamiento (β_i), para el tiempo t_i , está dada por:

$$\delta R_i = \int_0^{\infty} \delta a(\tau) h_i(t_i - \tau) d\tau \quad 5.5$$

donde $h_i(t)$ es la función de respuesta al impulso de aceleración para un oscilador de 1GDL con frecuencia (ω_i) y amortiguamiento (β_i), y τ es el parámetro de integración en el tiempo. Sustituyendo la ecuación 5.3 en 5.4 se obtiene:

$$\delta R_i = \sum_{j=1}^N b_j \int_0^{\infty} f_j(\tau) h_i(t_i - \tau) d\tau \quad 5.6$$

La función de respuesta al impulso de aceleración está dada por:

$$h_i(t) = \frac{-\omega_i}{\sqrt{1 - \beta_i^2}} \exp(-\omega_i \beta_i t) \left[(2\beta_i^2 - 1) \sin(\omega_i t) - 2\beta_i \sqrt{1 - \beta_i^2} \cos(\omega_i t) \right] \quad 5.7$$

donde,

$$\omega_i = \omega_i \sqrt{1 - \beta_i^2} \quad 5.8$$

y $h_i(t) = 0$ para $t < 0$. Ahora c_{ij} será la respuesta en el tiempo t_i para la $i^{\text{ésima}}$ frecuencia y amortiguamiento resultante de la función de ajuste $f_j(t)$, luego:

$$c_{ij} = \int_0^{t_i} f_j(\tau) h_i(t_i - \tau) d\tau \quad 5.9$$

Sustituyendo la ecuación 5.8 en la ecuación 5.5 se tiene:

$$\delta R_i = \sum_{j=1}^N b_j c_{ij} \quad 5.10$$

Si la respuesta de la serie de tiempo ajustada δR_i , es igual al desajuste espectral ΔR_i , entonces:

$$\Delta R_i = \sum_{j=1}^N b_j c_{ij} \quad 5.11$$

La amplitud de cada wavelet utilizada en el ajuste es determinada por la solución de un set de ecuaciones simultáneas que da cuenta de la correlación cruzada de cada wavelet con cada respuesta a ser escalada. Esto puede ser expresado en forma matricial como:

$$C * b_j = \delta R \quad 5.12$$

donde C es una matriz cuadrada con elementos que describen la amplitud de la respuesta del oscilador de 1GDL para el tiempo que dicha respuesta necesite ser ajustada, bajo la acción de cada wavelet. Los factores de escala de las wavelets en el vector b_j se obtienen mediante la amplitud del ajuste requerido y de la inversa de la matriz de correlación C .

$$b_j = C^{-1} * \delta R \quad 5.13$$

Obtenido b_j , la serie de tiempo ajustada $\delta a(t)$, puede ser programada utilizando la ecuación 5.3

y la nueva serie de tiempo ajustada para la primera iteración está dada por:

$$a_1(t) = a(t) + \gamma \delta a(t) \quad 5.14$$

donde γ es un parámetro con valores entre 0 y 1 que se utiliza para suavizar los ajustes. En la segunda iteración, el algoritmo se repite utilizando la serie de tiempo ajustada $a_1(t)$, en lugar de $a(t)$. Las iteraciones continúan hasta que se alcance la precisión deseada en el ajuste espectral.

La Figura 5.6 muestra el espectro de respuesta de un registro de aceleraciones obtenido durante el terremoto de Illapel M_w 8.4 del 16 de septiembre de 2015, al cual se le realiza escalamiento espectral en el dominio del tiempo al espectro objetivo de la norma NCh2745 para un suelo tipo B y zona sísmica 3.

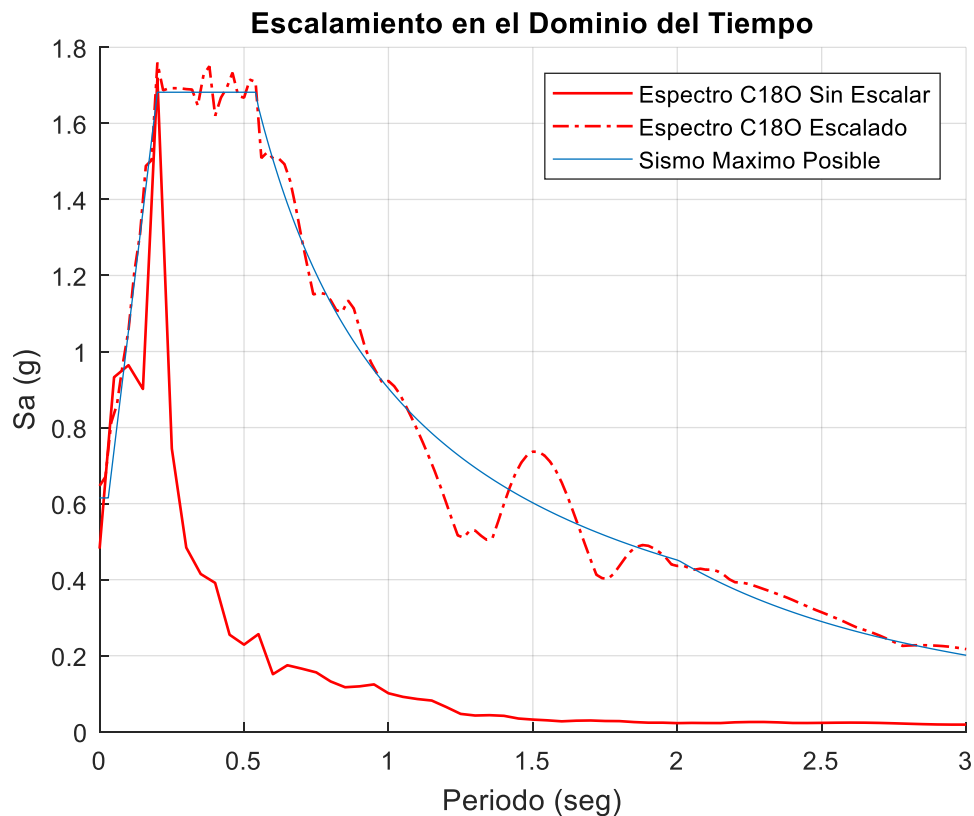


Figura 5.6 Escalamiento en el dominio del tiempo de un registro sísmico a un espectro objetivo.

Para el registro de la Figura 5.6 se realiza el escalamiento en el dominio del tiempo para un rango de periodos de 3 seg. Sin embargo, para la metodología ADRS se utiliza un escalamiento en el rango de periodos de 7 seg, con una tolerancia de desajuste de 0.3 y un máximo de 30 iteraciones. Se utiliza el programa SeismoMatch versión 2018, que permite ajustar registros de aceleraciones a un espectro objetivo mediante dos métodos. El primer método considera el algoritmo de wavelets propuesto por Abrahamson (1992) y Hancock et al. (2006), basada en el

método de Lilhanand y Tseng (1998), con modificaciones para conservar la no estacionariedad en largos periodos al utilizar diferentes formas funcionales para la historia de tiempo ajustada. El segundo método, empleado en esta investigación, es el algoritmo de wavelets desarrollado por Al Atik y Abrahamson (2010). En este algoritmo se implementa una función de ajuste por ventaneo que previene los drifts en las series de tiempo de velocidad y desplazamiento modificadas.

Se realiza un escalamiento en el dominio del tiempo de todos los registros sísmicos a un espectro elástico. Se calculan los espectros de ductilidad constante correspondientes. En un sistema altamente inelástico, como es el caso de estructuras con sistemas de aislación sísmica, no es esperable que las respuestas inelásticas sean coincidentes. La Figura 5.7 muestra un espectro de ductilidad constante para $\mu=30$, para cinco registros sísmicos escalados en el dominio del tiempo, donde se observa que los espectros de ductilidad constante son iguales.

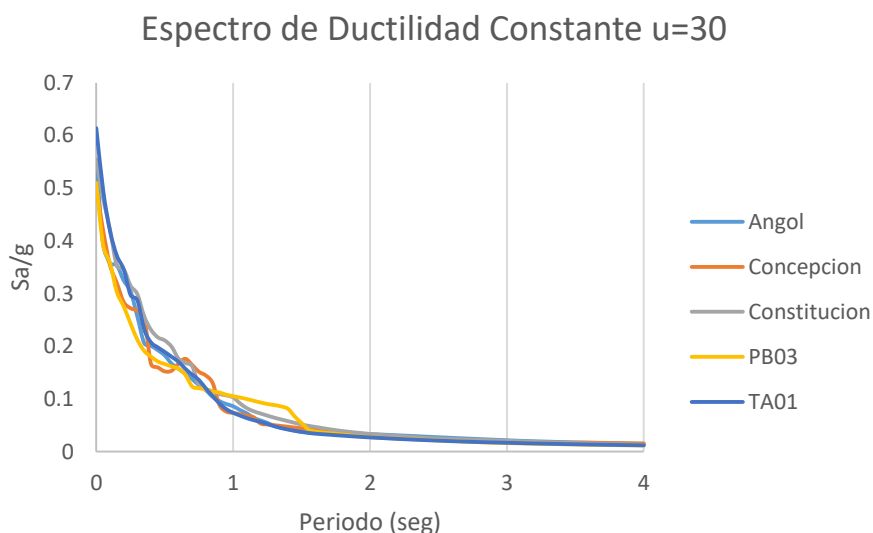


Figura 5.7 Espectro de ductilidad constante para $\mu=30$.

5.3.2. Escalamiento con factor de escala constante

El último método de escalamiento que se analiza en la presente investigación es el del factor de escala constante. En este método para cada par de componentes horizontales de cada registro de aceleraciones se debe obtener el espectro SRSS, que se determina como la raíz cuadrada de la suma del cuadrado de los espectros (para un 5% de amortiguamiento) de cada componente horizontal. Se calcula el promedio de todos los espectros SRSS para luego escalar el espectro promedio según el espectro objetivo considerado. Este escalamiento se efectúa en el rango de periodos entre $0.5T_D$ y $1.25T_M$ (periodo efectivo del modo fundamental de vibración de la estructura), rango establecido en la norma NCh2745. El promedio de los espectros SRSS, en el

rango de periodos establecido, no debe ser menor que 1,17 veces el espectro objetivo (según se indica en NCh2745). Si se emplea este método de escalamiento, se debe considerar el mismo factor de escala para las dos componentes horizontales del registro.

Para determinar el periodo fundamental al que los espectros SRSS de los pares de registros de aceleraciones requieren ser escalados se analiza la respuesta de un oscilador de 1GDL ante tres diferentes registros sísmicos obtenidos durante el terremoto del Maule del 27 de febrero de 2010. Se analizaron las Transformadas de Fourier (FFT) para los outputs de los registros sin escalar y escalados en el dominio del tiempo para valores de periodo post-fluencia de 3, 5 y 7 seg, valores de resistencia característica de 1.5%, 3.0% y 4.5% del peso sísmico W_s y valores de rigidez inicial $K_i = \alpha K_p$, donde $\alpha = 5, 10$ y 15 , respectivamente. Para cada registro de aceleraciones analizado se obtuvieron nueve gráficos de FFT en donde se observaron las frecuencias fundamentales del sistema a partir de la rigidez inicial, rigidez efectiva y rigidez post-fluencia. En la Figura 5.8 se observa que para el registro escalado de Angol con un periodo post-fluencia de 5 seg, una resistencia característica de 4,5% de W_s y con un $\alpha = 10$ en la relación de la rigidez inicial y post-fluencia el periodo fundamental del sistema es gobernado por la frecuencia debido a la rigidez inicial, con un valor de $f_i = 1.1 \text{ Hz}$, dando como resultado un periodo de $T = 0.9 \text{ seg}$.

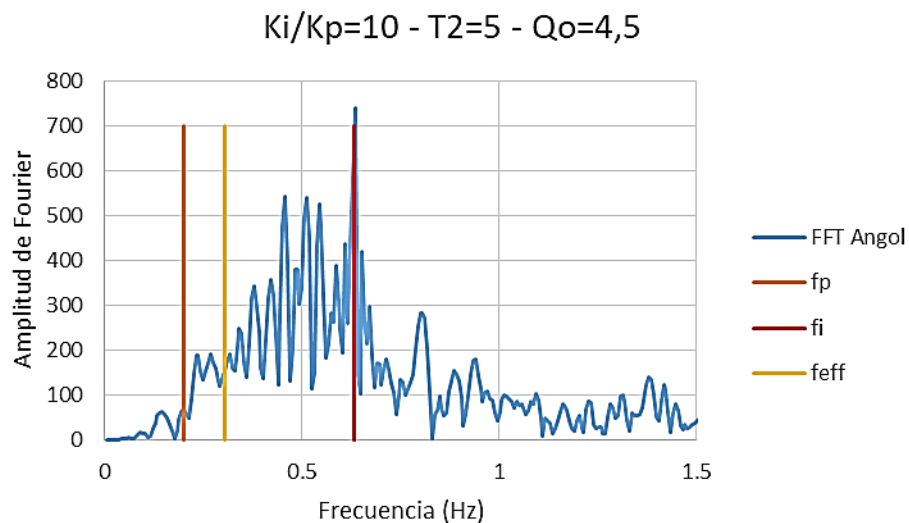


Figura 5.8 Valores de frecuencias f_i , f_p y f_{eff} obtenidas a partir de las rigideces inicial, post-fluencia y efectiva respectivamente para la Transformada de Fourier del registro de Angol escalado en el dominio del tiempo del terremoto del Maule del 27 de febrero de 2010.

Los demás gráficos se muestran en el Anexo A, en los cuales se observa que para valores bajos de periodo post-fluencia, resistencia característica y α , las frecuencias que predominan en la respuesta del sistema de 1GDL son las frecuencias asociadas a la rigidez efectiva y rigidez post-fluencia. En la medida que los valores de periodo post-fluencia, resistencia característica y α

aumentan, la respuesta del sistema es gobernada por la frecuencia asociada a la rigidez inicial. El análisis se realiza para registros escalados y sin escalar para evaluar las incursiones inelásticas de estructuras con periodos más altos. Seleccionar un periodo fundamental mayor a $T = 0.9 \text{ seg}$ implica una disminución en el factor de escala de los espectros SRSS debido a que, para periodos más altos la energía es menor y escalar en este rango de periodos resulta en espectros de respuestas subestimados.

Una vez obtenido el periodo fundamental del sistema analizado, se procede a calcular los espectros SRSS de los grupos de 21, 7 y 3 pares de registros sísmicos seleccionados aleatoriamente y por su Intensidad de Arias (IA), para obtener los gráficos ADRS. Se escalan los promedios de los espectros SRSS a dos espectros objetivos, que se detallan en las secciones subsiguientes. La Figura 5.9 muestra los escalamientos por factor de escala constante en el periodo objetivo $T = 0.9 \text{ seg}$ de los promedios de los espectros SRSS de los 21 registros sísmicos para los dos espectros objetivo considerados. El primero corresponde al Sismo Máximo Posible (SMP) de la norma NCh2745 para un tipo de suelo B y zona sísmica 3 y el segundo corresponde a un Espectro Medio Condicional (EMC) obtenido a partir de un Espectro de Amenaza Uniforme (UHS) para zona sísmica 3 y suelo tipo B (Según NCh433.Of96).

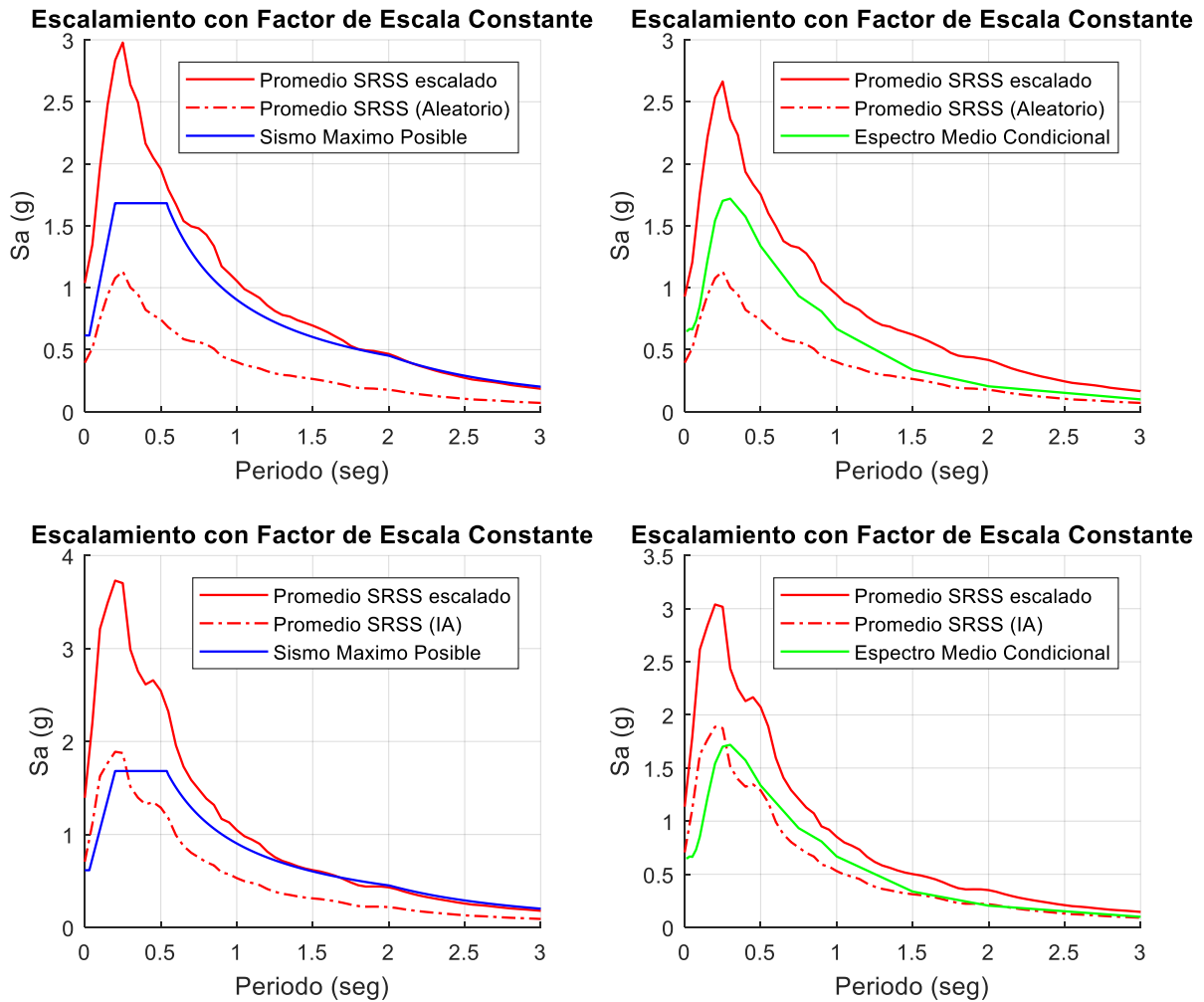


Figura 5.9 Superior Izquierda: Promedio de los espectros SRSS de los registros seleccionados aleatoriamente escalados al SMP. Superior Derecha: Promedio de los espectros SRSS de los registros seleccionados aleatoriamente escalados al EMC. Inferior Izquierda: Promedio de los espectros SRSS de los registros seleccionados por Intensidad de Arias escalados al SMP. Inferior Derecha: Promedio de los espectros SRSS de los registros seleccionados por Intensidad de Arias escalados al EMC.

La Tabla 5.3 resume los valores de los factores de escala constante que se utilizan para cada una de las componentes horizontales de los registros seleccionados para el desarrollo de la metodología ADRS. Se observa que para los registros que fueron seleccionados aleatoriamente el factor de escala que se necesita es mayor al de los registros que fueron seleccionados de acuerdo a su Intensidad de Arias. Asimismo, los factores para los registros que fueron escalados al Espectro Medio Condicional son menores a los factores que se utilizaron para escalar los registros al Sismo Máximo Posible.

Tabla 5.3 Factores de escala para los registros según su selección y el espectro objetivo al cual son escalados.

		Espectros Objetivos		Espectros Objetivos (Sin Concepción)	
		Espectro Medio Condicional	Sismo Máximo Posible	Espectro Medio Condicional	Sismo Máximo Posible
21 pares de registros	Aleatorio	2.35	2.63	2.39	2.71
	Intensidad de Arias	1.61	1.97	1.64	2.02
7 pares de registros	Aleatorio	1.84	2.11	1.43	1.75
	Intensidad de Arias	1.33	1.63	1.35	1.66
3 pares de registros	Aleatorio	4.08	4.37	3.86	4.74
	Intensidad de Arias	1.07	1.31	1.31	1.61

5.4. Espectros objetivo para escalamiento de registros

Uno de los objetivos del análisis dinámico es estimar la respuesta de la estructura cuando es sometida a registros sísmicos. La evaluación de la respuesta sísmica de la estructura normalmente es efectuada utilizando registros sísmicos compatibles con un espectro objetivo. Este espectro corresponde al nivel máximo del movimiento del suelo que puede ocurrir dentro del esquema geológico conocido, y se considera, en el caso de Chile, como el nivel de movimiento sísmico del suelo que tiene un 10% de probabilidad de excedencia en 100 años.

5.4.1. Espectro objetivo: Sismo Máximo Posible (SMP) de la norma NCh2745

El Sismo Máximo Posible (SMP) es un espectro normativo que corresponde a la envolvente en periodo largo de la mayoría de los registros sísmicos conocidos. El desarrollo de este espectro se basa en la normativa NCh2745 y depende de ciertos parámetros como el tipo de suelo y zonificación sísmica en la cual se emplaza el sistema estructural. La Figura 5.10 muestra un ejemplo del espectro objetivo SMP para suelo tipo B y zona sísmica 3.

Sismo Máximo Posible

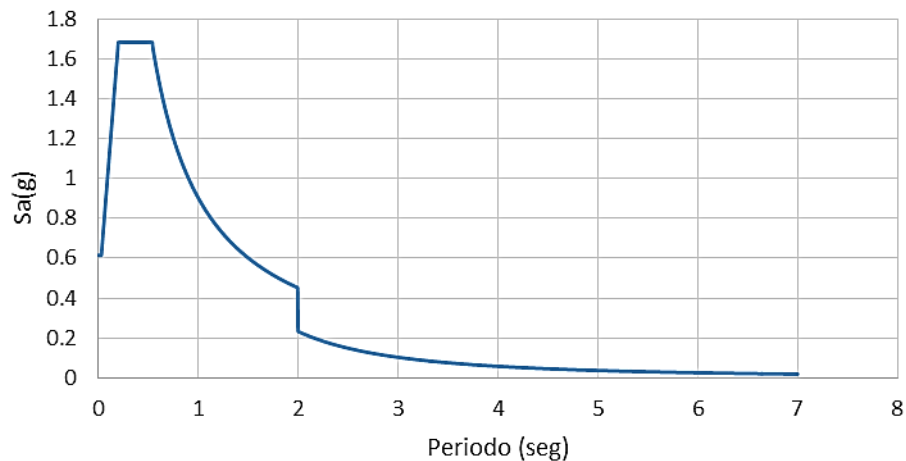


Figura 5.10 Espectro objetivo Sismo Máximo Posible de la norma NCh2745.

En general el SMP se utiliza para verificar el desempeño sísmico de estructuras aisladas de manera analítica y experimental. En particular, se debe verificar que el sistema de aislación acomode sin presentar daños tanto las deformaciones como las cargas correspondientes al SMP. Si el sistema de aislación sísmica se comporta de manera satisfactoria, la superestructura debiera permanecer prácticamente en el rango elástico.

5.4.2. Espectro objetivo: Espectro Medio Condicional (EMC)

5.4.2.1. Introducción

Al realizar un estudio de amenaza sísmica se pueden estimar las aceleraciones máximas del suelo en el sitio (PGA, Peak Ground Acceleration) y las aceleraciones espectrales a distintos periodos para un nivel de amortiguamiento típicamente igual al 5% del crítico. Para ello se consideran las fuentes que controlan el peligro sísmico en el sitio, la recurrencia temporal de los sismos ocurriendo en las fuentes, la geometría y distribución espacial de los sismos ocurriendo en las fuentes, modelos de atenuación consistentes con los mecanismos sismogénicos, y la caracterización geotécnica del sitio de emplazamiento de la estructura, entre otras variables. En los análisis de amenaza sísmica se distinguen dos enfoques: el determinístico, donde se caracteriza en términos de distancia y magnitud el escenario sísmico más desfavorable; y el enfoque probabilístico donde se consideran las incertezas en la magnitud del sismo, ubicación y probabilidad de excedencia dado un periodo de retorno (Kramer, 1996). En los estudios probabilísticos de amenaza sísmica (PSHA: Probabilistic Seismic Hazard Analysis) es posible obtener el Espectro de Amenaza Uniforme (UHS: Uniform Hazard Spectrum), el cual entrega aceleraciones espectrales con la misma probabilidad de excedencia para un periodo de retorno

considerado.

Para determinar los registros sísmicos requeridos para realizar el análisis, comúnmente se utiliza el Espectro de Amenaza Uniforme como espectro objetivo y se utilizan registros sísmicos cuya respuesta espectral sea compatible con el Espectro de Amenaza Uniforme. Sin embargo, el UHS no es un espectro objetivo apropiado para este particular problema de la evaluación de la respuesta del sistema (Baker 2011). El espectro objetivo resultante obtenido en las secciones siguientes (Espectro Medio Condicional, EMC) mantiene el rigor probabilístico del PSHA, por lo que se mantiene una consistencia entre el PSHA y la selección de registros sísmicos. Esto permite realizar declaraciones cuantitativas sobre la probabilidad de observar los niveles de respuesta estructural obtenidos del análisis dinámico que utiliza este espectro; en contraste, el UHS no permite esas declaraciones.

5.4.2.2. Espectro Medio Condicional (EMC)

Como alternativa al Espectro de Amenaza Uniforme se presenta el Espectro Medio Condicional (EMC), el cual está ajustado a una aceleración espectral para un periodo en particular, determinando los valores en los otros periodos a través de factores de correlación. El EMC se basa en que la aceleración espectral para un periodo en particular estará mucho más relacionada con las aceleraciones espectrales de periodos cercanos a ella, y que dicha relación o semejanza de valores decae a medida que se aleja el par de valores de periodo que se están comparando (Carlton y Abrahamson, 2014), entregando así una predicción más realista y menos conservadora de la respuesta sísmica del sistema.

El UHS representa las demandas espectrales con idéntica probabilidad de excedencia, no informando de la probabilidad para un periodo en particular. Por tanto, el UHS no sería representativo de las aceleraciones espectrales en periodos alejados del periodo de interés. Se utiliza el EMC para obtener resultados menos conservadores, ya sea con estimaciones más certeras de la respuesta estructural (Macedo, 2013) o logrando una menor probabilidad de colapso (Baker, 2006b). El UHS, para valores de periodo altos (baja frecuencia), entrega aceleraciones espectrales que pueden ser causadas por sismos de gran intensidad a distancias lejanas del sitio donde se evalúa la amenaza sísmica, mientras que en periodos bajos (altas frecuencias) los valores espectrales son de sismos de mediana intensidad, cercanos al área de estudio.

Los factores de correlación indican como se relacionan en distintos periodos las diferencias entre los valores de aceleración espectral determinados por un modelo de atenuación y el espectro de respuesta de aceleración de cada registro. Para la obtención de los factores de correlación se pueden utilizar modelos de atenuación propuestos por distintos autores, entre los cuales están Abrahamson et al. (2012), Zhao et al. (2006), Boore y Atkinson (2008) y Boroschek et al. (2012), siendo este último modelo de especial interés puesto que fue determinado solo con registros de aceleraciones chilenos. Sin embargo, el modelo de atenuación que se utilizó para la presente investigación fue el propuesto por Abrahamson et al. (2012), debido a que este modelo puede alcanzar periodos de hasta 10 seg, mientras que el modelo propuesto por Boroschek et al. (2012) solo alcanza los 4 seg. Para la construcción del EMC se consideran las siguientes hipótesis:

- A partir del Espectro de Amenaza Uniforme se obtiene un valor de aceleración espectral conocido para un valor de periodo específico (periodo condicionante).
- Se escoge un modelo de atenuación a partir del cual se obtienen los valores espectrales en periodos distintos al periodo condicionante.
- Se selecciona un modelo estadístico (Coeficiente de Correlación de Pearson) que relacione las diferencias espectrales entre cada par de periodos de la banda de periodos a evaluar. Este modelo corresponde a los Coeficientes de Correlación $\rho(T_i, T_j)$.

El Espectro Medio Condicional solo puede ser calculado si existe un estudio de amenaza sísmica del cual se pueda obtener un Espectro de Amenaza Uniforme para seleccionar el valor de aceleración espectral en el periodo condicionante. Los pasos para obtener el EMC se presentan a continuación:

1. Se obtiene un Espectro de Amenaza Uniforme para una probabilidad de excedencia, para obtener el valor de aceleración espectral en el periodo de interés (Periodo Condicionante, T^*).
2. Se desagregan los resultados de magnitud y distancia para el periodo de interés T^* , con el fin de obtener un valor de magnitud y de distancia representativos de la aceleración espectral en dicho periodo.
3. Usando un modelo de atenuación se obtiene un espectro de respuesta (Sa_{GMPE}) y una desviación estándar σ (usualmente entregada en los modelos de atenuación) para todo el vector de periodos, usando los valores de magnitud y de distancia determinados en el punto 2.

4. Se calcula la diferencia espectral (parámetro épsilon, ε) entre el Espectro de Amenaza Uniforme (Sa_{UHS}) y el valor entregado por el modelo de atenuación (Sa_{GMPE}) en el periodo T^* :

$$\varepsilon(T^*) = \frac{Sa_{UHS}(T^*) - Sa_{GMPE}(T^*)}{\sigma(T^*)} \quad 5.15$$

5. Se utilizan los valores de correlación ρ propuestos por Baker y Jayaram (2008), parámetro que informa de los valores esperados en otro valor de periodo.
6. Se obtiene un valor promedio para épsilon:

$$\bar{\varepsilon}(T_i) = \varepsilon(T^*) * \rho(T_i, T^*) \quad 5.16$$

7. Se calcula el Espectro Medio Condicional (EMC) para todos los periodos:

$$EMC(T_i) = Sa_{GMPE}(T_i) + (\bar{\varepsilon}(T_i) * \sigma(T_i)) \quad 5.17$$

Usualmente se utiliza como valor de periodo condicionante el periodo fundamental de la estructura (Baker, 2011). Sin embargo, es posible considerar múltiples periodos fundamentales y generar un Espectro Medio Condicional a partir de un set de espectros (Carlton y Abrahamson, 2014).

5.4.2.2.1. Modelo de atenuación

Las ecuaciones de predicción de movimiento de suelo (GMPE: Ground Motion Prediction Equations) son utilizadas para estimar los niveles esperados de movimiento sísmico en función de parámetros como la magnitud del terremoto, distancia a la fuente y parámetros de sitio. Se consideran las curvas de aceleración espectral a partir del modelo de atenuación de Abrahamson et al. (2012) calculado con datos para zonas de subducción alrededor de todo el mundo, incluyendo Chile. Los siguientes son los datos de entrada del modelo de atenuación, así como la magnitud de momento máxima de aplicación y el rango de periodos.

- Abrahamson et al. (2012)

M_w : Magnitud de Momento.

Z_h : Profundidad focal (km).

R : Distancia más cercana a la ruptura en sismos interplaca (km).

F_{event} : Mecanismo focal. Su valor es 0 si el sismo es interplaca y 1 si es intraplaca.

F_{FABA} : Sitio antearco o trasarco. Su valor es 0 si es antearco o desconocido y 1 si es trasarco.

V_{S30} : Velocidad de onda de corte de los primeros 30 m.

Este modelo tiene un periodo de aplicación entre 0 y 10 seg. y su magnitud máxima posible es de $M_w = 9.0$ en sismos interplaca y $M_w = 8.0$ en sismos intraplaca.

5.4.2.2.2. Diferencia de amplitud espectral

La diferencia de amplitud espectral (ε) debe ser definida para un periodo específico (periodo condicionante) y corresponde a la diferencia entre ordenadas espectrales logarítmicas de la media geométrica de ambas componentes horizontales de un registro de aceleraciones, y el valor estimado mediante un modelo de atenuación. La ecuación 5.18 muestra la definición de ε y la Figura 5.11 muestra el valor obtenido de ε para un valor de periodo condicionante de un registro de aceleraciones del sismo de Illapel M_w 8.4 del 16 de septiembre de 2015, usando el modelo de atenuación de Abrahamson et al. (2012).

$$\varepsilon(T_i) = \ln(\overline{Sa}(T_i)) - \ln(Sa_{GMPE}(T_i)) \quad 5.18$$

donde $\overline{Sa}(T_i)$ es la media geométrica de la aceleración espectral de las componentes horizontales para el periodo T_i y $Sa_{GMPE}(T_i)$ es el valor de la aceleración espectral determinado mediante el uso de la curva de atenuación para un periodo T_i . La ecuación 5.18 muestra una diferencia espectral ε distinta a la presentada en la ecuación 5.15. La definición es más amplia y relaciona el valor de la media geométrica de un espectro de respuesta de aceleraciones con un espectro de aceleraciones de un modelo de atenuación. López (2016) indica que calculando las diferencias espectrales, ya sea utilizando la ecuación 5.15 o la ecuación 5.18, se obtienen los mismos resultados para los coeficientes de correlación.

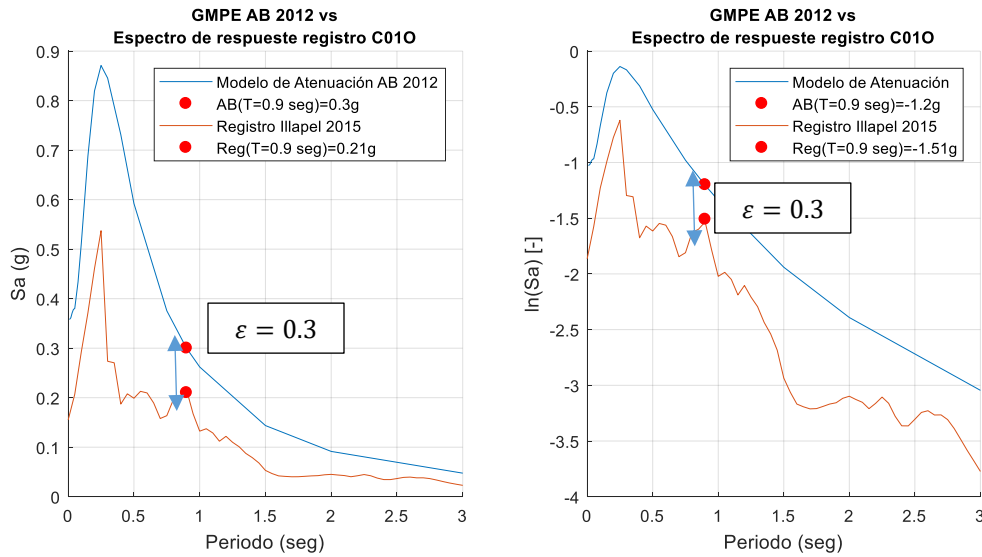


Figura 5.11 Valores de ε para un valor de periodo condicionante usando el modelo de atenuación de Abrahamson et al. (2012). Izquierda: Ordenadas en g. Derecha: Ordenadas en logaritmo natural del espectro, $\ln(S_a)$.

Como se observa en la Figura 5.11, independientemente de la escala utilizada en la coordenada de la aceleración espectral, se obtiene el mismo valor de diferencia de amplitud espectral ε .

5.4.2.2.3. Factores de correlación

El comportamiento del Espectro Medio Condicional está influenciado por los valores espectrales en otros periodos en relación al valor determinado para el periodo condicionante. Este comportamiento se puede modelar a través de un parámetro que pueda informar de los valores esperados en otro valor de periodo, considerando la aceleración espectral que se tiene en el periodo condicionante. Los valores esperados corresponden a las diferencias espectrales ε y los factores de correlación son el Coeficiente de Correlación de Pearson, parámetro estadístico que indica cómo se relacionan las diferencias espectrales entre distintos valores de periodo.

La definición del Coeficiente de Correlación de Pearson se presenta en la ecuación:

$$\rho_{\varepsilon(T_1), \varepsilon(T_2)} = \frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i(T_1) - \overline{\varepsilon(T_1)}) * (\varepsilon_i(T_2) - \overline{\varepsilon(T_2)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i(T_1) - \overline{\varepsilon(T_1)})^2 * \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i(T_2) - \overline{\varepsilon(T_2)})^2}} \quad 5.19$$

Esta ecuación se encuentra disponible en planillas de cálculo y en Matlab, para distintos periodos T_1 y T_2 , y donde i es un subíndice que recorre la cantidad de registros usados para el cálculo del coeficiente en ese par de periodos. Los valores $\overline{\varepsilon(T_1)}$ y $\overline{\varepsilon(T_2)}$ corresponden a las diferencias espectrales promedio para esos periodos, es decir el valor medio reportado por los n registros.

Para el cálculo del espectro medio condicional distintos autores (Baker et al., 2011, Carlton and Abrahamson, 2014,) recomiendan el uso de los factores de correlación determinados por Baker y Jayaram (2008). En ese estudio se ocupó una base de datos de más de 2500 registros alrededor de zonas sísmicas activas con terremotos del tipo intraplaca superficial. Para la presente investigación se utilizaron los factores de correlación propuestos por Baker y Jayaram (2008), el cual se encuentra habilitado en una rutina de Matlab preparada por Baker (2008).

El espectro medio condicional se puede desarrollar considerando dos enfoques diferentes. El primero se presentó en la sección 5.4.2.2 resumido en 7 pasos, mientras que un segundo enfoque consiste en calcular el EMC utilizando una amplia base de datos de registros sísmicos a los cuales se les desagregan sus valores de magnitud y distancia para un periodo representativo. Luego se calculan los espectros de aceleración mediante un modelo de atenuación para cada uno de estos valores con el fin de obtener un promedio de los valores de ϵ_i donde el subíndice i representa el número de registros sísmicos a analizar. En consecuencia, para determinar estos espectros de aceleración se requieren todos los parámetros de entrada que se especificaron en el modelo de atenuación de Abrahamson et al. (2012) para la totalidad de registros sísmicos que se utilicen. Finalmente se calculan los factores de correlación mediante la ecuación 5.19 y se utiliza la ecuación 5.17 para calcular el EMC. El primer enfoque es el que se utilizó para calcular el EMC que se utiliza en esta investigación. Sin embargo, el segundo enfoque entregaría resultados más representativos para un sitio específico si los registros utilizados poseen las mismas características del sitio. López (2016) realizó la comparación de estos dos enfoques en los que la diferencia en los EMC son mínimas, obteniendo las mismas tendencias al comparar los modelos.

5.4.2.3. Cálculo del Espectro Medio Condicional

En las siguientes secciones se presenta el cálculo del Espectro Medio Condicional (EMC) que se utiliza como espectro objetivo para el cálculo de los gráficos ADRS a partir de un Espectro de Amenaza Uniforme (UHS) y el Sismo Máximo Posible (SMP) de la norma NCh2745 ocupando el modelo de atenuación propuesto por Abrahamson et al. (2012). El cálculo es realizado utilizando los coeficientes de correlación propuestos por Baker y Jayaram (2008) obteniendo el Espectro Medio Condicional para un valor de periodo condicionante T^* de 0,9 seg obtenido en la sección 5.3.2.

5.4.2.3.1. Espectro de Amenaza Uniforme (UHS) y Sismo Máximo Posible (SMP)

Se utiliza un Espectro de Amenaza Uniforme obtenido de López (2016) el cual fue determinado a través de un enfoque probabilístico para un periodo de retorno de 2475 años (2% de probabilidad de excedencia en 50 años) para un sitio cercano a Huentelauquén, IV Región, zona sísmica 3 y clasificación sísmica de suelo tipo B (Según NCh433.Of96.Mod2009). En la Figura 5.12 se muestra el Espectro de Amenaza Uniforme obtenido y se señala el periodo de interés con su respectivo valor de aceleración espectral.

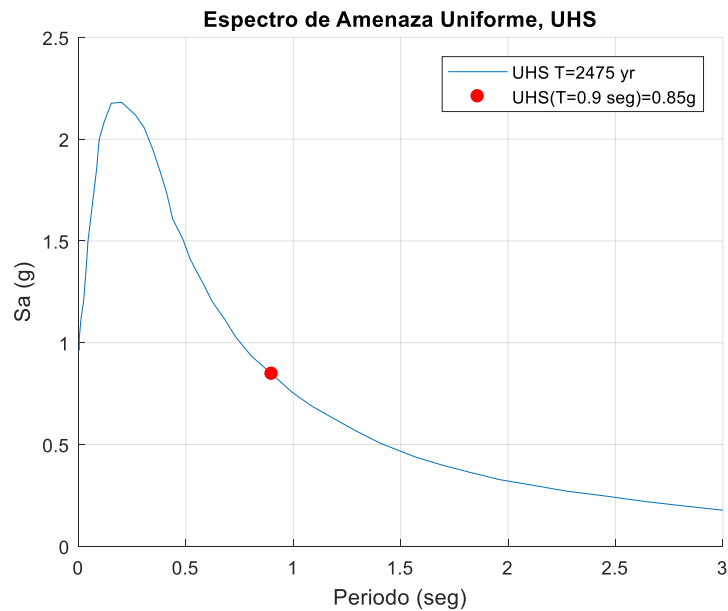


Figura 5.12 Espectro de Amenaza Uniforme para un periodo de retorno de 2475 años.

El Sismo Máximo Posible (SMP) se determina para una zona sísmica 3 y clasificación sísmica de suelo tipo B (Según NCh433.Of96.Mod2009). La Figura 5.13 muestra el SMP y se señala el periodo de interés con su respectivo valor de aceleración espectral.

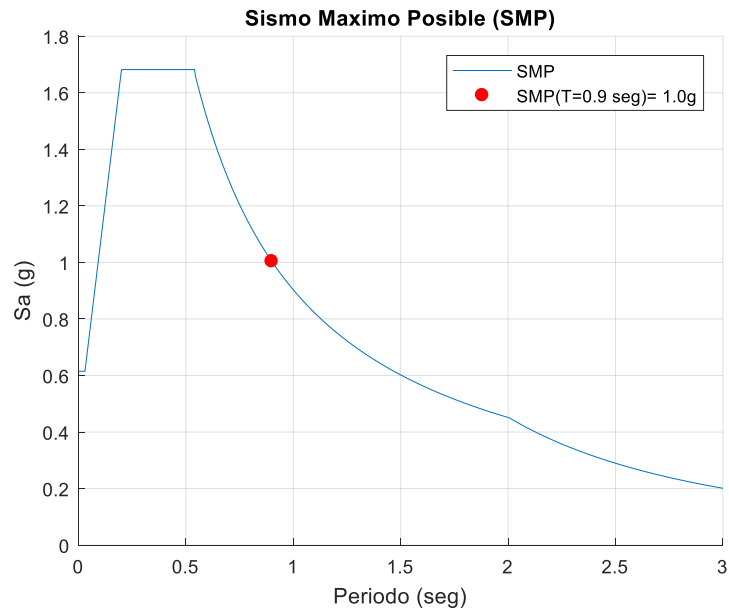


Figura 5.13 Sismo Máximo Posible para zona sísmica 3 y suelo tipo B.

Continuando con los pasos descritos en la sección 5.4.2.2 se necesitan los valores de magnitud y distancia a la fuente representativos del periodo condicionante (T^*), \bar{M} y \bar{R} . Estos valores generalmente son entregados en el cálculo del Espectro de Amenaza Uniforme para todos los periodos. A falta de información más detallada para el SMP, se utilizan los mismos valores que el UHS. En la Tabla 5.4 se muestran estos valores para el periodo de interés T^* .

Tabla 5.4 Valores de Magnitud de Momento y Distancia a la Ruptura para el periodo de interés.

Periodo Condicionante T^* (seg.)	Magnitud \bar{M} (M_w)	Distancia a la ruptura \bar{R} (Km.)
0.9	8.0	34.7

5.4.2.3.2. Modelo de atenuación para valores de \bar{M} y \bar{R}

Con los valores de magnitud y distancia a la fuente calculados en la sección anterior, se procede a aplicar el modelo de atenuación propuesto por Abrahamson et al. (2012) para calcular las aceleraciones espectrales para toda la banda de periodos. Como se observa en la Tabla 5.4, la distancia es menor a la profundidad focal usada para sismos del tipo Intraplaca (mayor a 60 Km), no obstante, se asume que los valores de magnitud y distancia determinados corresponden a un sismo del tipo Interplaca.

En la Figura 5.14 se muestran en líneas continuas las aceleraciones espectrales y en líneas segmentadas estos mismos valores más y menos una desviación estándar obtenidas a partir del modelo de atenuación empleado para este estudio, para los valores de magnitud y distancia a la ruptura mostrados en la Tabla 5.4 para el periodo de interés $T^* = 0.9 \text{ seg}$. Para el modelo de

atenuación también fue necesario determinar el parámetro V_{S30} , la velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 m de profundidad, la que fue calculada por Rauld et al. (2015) como un mapa de microzonificación sismo-geológico para todo el territorio de Chile. Adicionalmente, se grafica el Espectro de Amenaza Uniforme y un espectro de respuesta de aceleraciones de un registro del sismo de Illapel del 16 de septiembre de 2015, cuya estación está a 80 km de la fuente.

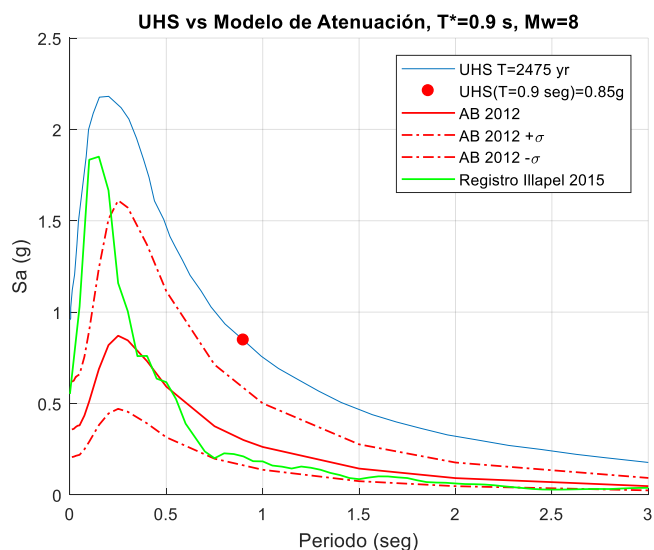


Figura 5.14 Aceleraciones Espectrales para magnitud y distancia de $T^* = 0.9 \text{ seg}$ utilizando el modelo de atenuación de Abrahamson et al. (2012) para el UHS.

La Figura 5.15 muestra las mismas curvas de aceleraciones espectrales de la Figura 5.14 modificando el UHS por el SMP.

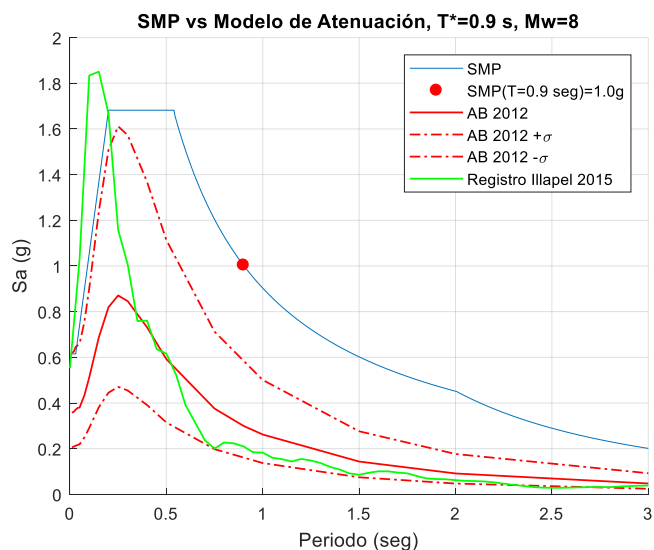


Figura 5.15 Aceleraciones Espectrales para magnitud y distancia de $T^* = 0.9 \text{ seg}$ utilizando el modelo de atenuación de Abrahamson et al. (2012) para el SMP.

5.4.2.3.3. Espectro Medio Condicional

Se calcula el Espectro Medio Condicional del modelo de atenuación y sus valores de desviación estándar para el periodo de interés en base a la metodología descrita en la sección 5.4.2.2. Se emplearon los coeficientes de correlación propuestos por Baker y Jayaram (2008). Adicionalmente se graficó el Espectro de Amenaza Uniforme y un espectro de respuesta de aceleración de un registro del sismo de Illapel del 16 de septiembre de 2015. En la Figura 5.16 se presenta el Espectro Medio Condicional para $T^* = 0.9 \text{ seg}$.

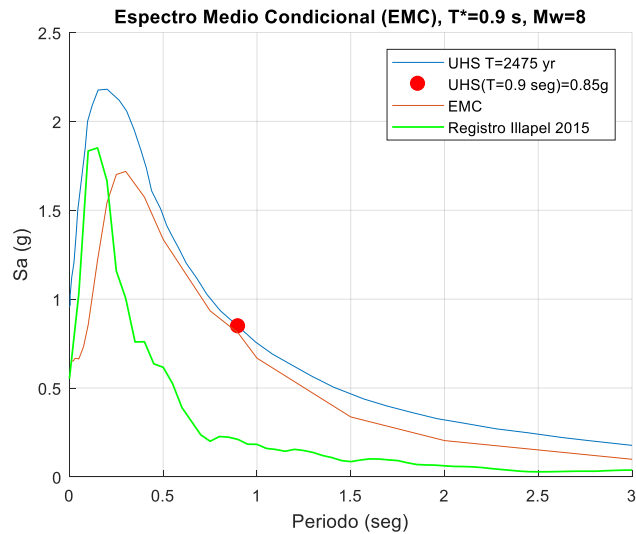


Figura 5.16 Aceleraciones Espectrales para magnitud y distancia de $T^* = 0.9 \text{ seg}$ utilizando el modelo de atenuación de Abrahamson et al. (2012) para el UHS.

La Figura 5.17 muestra el SMP y un espectro de respuesta de aceleración de un registro del sismo de Illapel del 16 de septiembre de 2015. Adicional se presenta el EMC para el SMP.

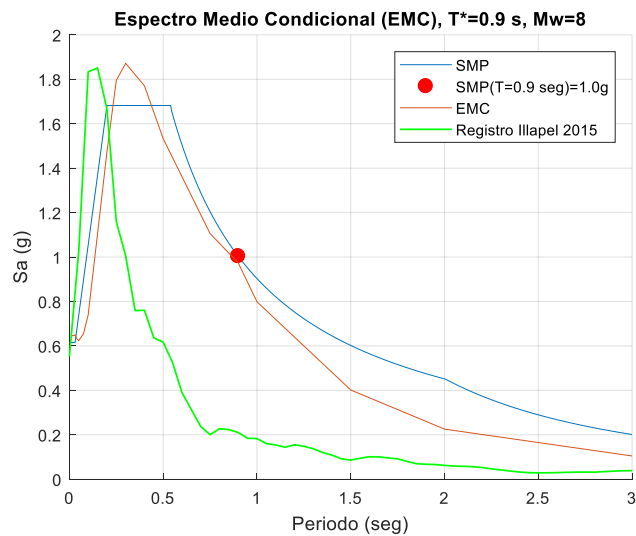


Figura 5.17 Aceleraciones Espectrales para magnitud y distancia de $T^* = 0.9 \text{ seg}$ utilizando el modelo de atenuación de Abrahamson et al. (2012) para el SMP.

Con los valores de magnitud y distancia obtenidos de la desagregación del estudio probabilístico se obtuvieron las aceleraciones espectrales para un valor de periodo condicionante, utilizando el modelo de atenuación propuesto por Abrahamson et al. (2012). Se calculó el Espectro Medio Condicional para este modelo de atenuación con los coeficientes de correlación propuestos por Baker y Jayaram (2008). Los valores del Espectro Medio Condicional coinciden con el Espectro de Amenaza Uniforme y el Sismo Máximo Posible en el respectivo valor de periodo condicionante y se alejan de este a medida que los periodos se alejan entre sí. Finalmente, en la Figura 5.18 se muestra la comparación del Espectro Medio Condicional a partir del SMP y el UHS con respecto al Sismo Máximo Posible de la norma NCh2745.

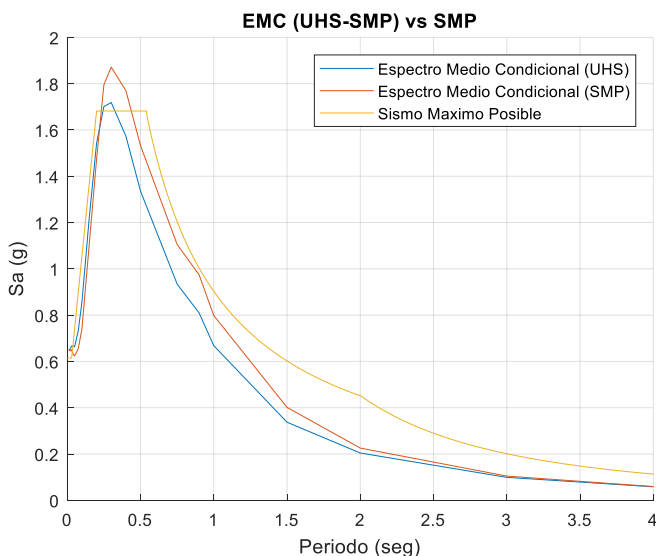


Figura 5.18 Comparación del Espectro Medio Condicional a partir del SMP y UHS; y el Sismo Máximo Posible de la norma NCh2745

Para la presente investigación se utilizan los EMC en la metodología ADRS a partir de los SMP debido a la falta de información de los Espectros de Amenaza Uniforme para las distintas zonas sísmicas y tipos de suelos. En la Figura 5.18 se observa que los EMC obtenidos a partir del UHS y SMP tienen valores similares a medida que aumenta el periodo por lo que se justifica el uso del SMP para desarrollar el EMC.

5.5. Aplicaciones de los registros sísmicos en el modelo estructural

La manera en que las dos componentes horizontales de los registros sísmicos deben ser orientadas cuando son aplicadas al modelo estructural es muy importante. La medida de intensidad de movimiento del suelo más apropiada para aplicar (Sa_{arb} , Sa_{mg} o Sa_{maxDir}) depende de la orientación del movimiento del suelo aplicado al modelo estructural. Como se menciona en la sección 5.1.3, las estimaciones de la respuesta estructural no deben ser dependientes de la

definición de la aceleración espectral utilizada para cuantificar el movimiento del suelo (ej. Sa_{arb} , Sa_{mg} o Sa_{maxDir}), siempre y cuando cada paso del procedimiento se complete de manera que sea consistente con la definición de aceleración espectral escogida (selección, escalamiento, aplicación al modelo estructural e interpretación de la respuesta del sistema).

Para sitios distantes a la fuente, existen varias guías y documentos en relación a los registros sísmicos. Cuando el valor de la aceleración de la media geométrica (Sa_{mg}) es utilizado para describir la intensidad del movimiento sísmico, no hay implicada una dependencia direccional al movimiento del suelo, por lo que el par de componentes horizontales del registro de aceleraciones podría ser aplicado en una orientación aleatoria (Haselton et al., 2011). Si el espectro en la máxima dirección (Sa_{maxDir}) es utilizado para describir la intensidad del movimiento del suelo, hay una dependencia direccional en el movimiento del suelo. Sin embargo, la dirección (o azimut) en donde el valor de Sa_{maxDir} ocurre es aleatorio en sitios distantes a la fuente (Huang et al., 2008) y no necesariamente coincide con la dirección principal de la estructura. Para efectuar análisis no lineales de respuesta en el tiempo, los registros de aceleraciones deben ser aplicados a la estructura en orientaciones aleatorias. Esto puede parecer inconsistente con el procedimiento de escalamiento del registro de aceleraciones, pero no existe inconsistencia en este proceso y la aplicación de los pares de registros en forma aleatoria es necesaria para prevenir una estimación sesgada de la respuesta estructural. En un análisis de respuesta en el tiempo, es muy común aplicar un par de registros horizontales de aceleraciones en una dirección y luego aplicar el mismo par de registros en una segunda orientación (típicamente rotado 90 grados respecto de la orientación original). Este análisis adicional es considerado innecesario (Haselton et al., 2011).

5.6. Interpretaciones en la estimación de la respuesta estructural

Estas secciones se enfocaron en una guía para la selección y corrección de registros sísmicos y el escalamiento adecuado para un análisis no lineal de respuesta en el tiempo para la metodología ADRS desarrollada. Sin embargo, los criterios de aceptación requeridos para determinar la aceptabilidad de la respuesta estructural no se contemplan en esta investigación (ej. derivas de entrepisos admisibles, deformaciones inelásticas admisibles en elementos estructurales, etc.). Aun así, la manera en la que la respuesta estructural es interpretada tiene un impacto crítico en los procedimientos de selección, corrección y escalamiento de los registros sísmicos, permitiendo de esta manera una discusión más rigurosa.

Los registros de aceleraciones deben ser escogidos y escalados considerando la respuesta buscada, dado que esto condiciona la selección y escalamiento de registros indicado en secciones anteriores. Por ejemplo, la predicción de espectros de piso puede requerir registros

sísmicos con una amplia banda de contenido de frecuencias comparado con la predicción de las máximas derivas de entre piso. La presente investigación se centra en la estimación de espectros ADRS. Es necesaria una mayor investigación para validar que estas recomendaciones se pueden aplicar a otros tipos de respuestas estructurales.

6. PROCEDIMIENTOS DE MODELACIÓN PARA APLICACIÓN DE METODOLOGIA ADRS

En el presente capítulo se detallará el procedimiento de modelación del amortiguamiento en un análisis no lineal de respuesta en el tiempo y el valor de tasa de amortiguamiento del sistema ante bajas deformaciones. El modelo histerético y el método de integración numérico que obtenga los resultados óptimos para la metodología ADRS, y finalmente se estudia la relación entre la rigidez inicial y la rigidez post-fluencia.

6.1. Modelamiento de amortiguamiento en análisis no lineal de respuesta en el tiempo

En los modelos numéricos de estructuras, la disipación de energía se obtiene de tres fuentes distintas: fuerzas restauradoras, radiación de fundaciones y amortiguamiento interno de la estructura. Actualmente la disipación de energía se cuantifica mediante ensayos de laboratorio a elementos y materiales estructurales, sistemas de identificación de la respuesta estructural aplicados a resultados obtenidos partir de análisis no lineales de respuesta en el tiempo e instrumentaciones de campo. Los datos de los ensayos de laboratorio tienden a ser muy precisos y pueden ser implementados directamente en modelos histeréticos (Hall, 2005). Los sistemas de identificación de la respuesta a partir del análisis no lineal de respuesta en el tiempo, son mucho menos específicos entre todos los métodos de cuantificación de energía. El último método de cuantificación de energía, correspondiente a la instrumentación de campo, usualmente es desarrollado a bajos niveles de amplitud de vibración, por lo que solo se puede cuantificar la radiación de soportes y el amortiguamiento intrínseco de la estructura.

El amortiguamiento en los sistemas estructurales es difícil de cuantificar, por lo que la mayoría de los modelos numéricos lo representan como un amortiguamiento viscoso lineal, el cual resulta conveniente ya que, en la ecuación de movimiento, toma la forma de una matriz de amortiguamiento con coeficientes constantes que multiplica un vector de velocidades asociado a los grados de libertad del sistema. Cabe mencionar que obtener el vector de velocidades es una tarea que se complica cuando el sistema es no lineal, ya que en sistemas lineales el amortiguamiento viscoso se comporta de manera predecible debido a la naturaleza modal de la respuesta lineal y a la relación entre la matriz y valores modales de amortiguamiento. En la siguiente sección se discuten dos maneras de modelar el amortiguamiento en estructuras mediante el uso del amortiguamiento de Rayleigh, el cual es una forma particular del amortiguamiento viscoso lineal.

6.1.1. Sistemas con amortiguamiento

Cuando se incluye el amortiguamiento, la ecuación de equilibrio del sistema para excitación externa nula (vibraciones libres) $p(t) = 0$, está dada por:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad 6.1$$

donde $p(t)$ es el vector de fuerzas; y \ddot{u} , \dot{u} y u son los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento respectivamente, del sistema de varios grados de libertad. Se debe encontrar la solución $u(t)$ de la ecuación 6.1 que satisfaga las condiciones iniciales:

$$u = u(0) \quad \dot{u} = \dot{u}(0) \quad 6.2$$

Para obtener la solución deseada, los procedimientos varían dependiendo del tipo de amortiguamiento considerado: clásico o no clásico. Si la matriz de amortiguamiento de un sistema lineal satisface la siguiente identidad:

$$cm^{-1}k = km^{-1}c \quad 6.3$$

todos los modos de vibración natural tienen un valor real, y tales sistemas poseen un amortiguamiento clásico. Para establecer una propiedad importante de los sistemas clásicamente amortiguados, el desplazamiento u se puede expresar en términos de los modos naturales ϕ_r del sistema de la siguiente manera:

$$u = \sum_{r=1}^N \phi_r q_r = \Phi q \quad 6.4$$

donde N representa el número de GDL del sistema, q_r son los multiplicadores escalares llamados coordenadas modales y $q = \langle q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n^T \rangle$. La ecuación 6.4 se sustituye en la ecuación 6.1:

$$m\Phi\ddot{q} + c\Phi\dot{q} + k\Phi q = 0 \quad 6.5$$

Si se multiplica previamente por Φ^T , se tiene:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = 0 \quad 6.6$$

donde las matrices diagonales masa M , rigidez K y amortiguamiento C se definen:

$$M = \Phi^T m \Phi \quad 6.7$$

$$K = \Phi^T k \Phi \quad 6.8$$

$$C = \Phi^T c \Phi$$

6.9

Para los sistemas clásicamente amortiguados, las matrices cuadradas M , K y C son diagonales, entonces la ecuación 6.6 representa N ecuaciones diferenciales no acopladas en las coordenadas modales q_r , y a tales sistemas se les puede aplicar el análisis modal clásico. Se dice que un sistema lineal posee un amortiguamiento no clásico si su matriz de amortiguamiento no satisface la ecuación 6.3. Para dichos sistemas los modos de vibración natural ϕ_r no tienen valores reales y la matriz cuadrada C de la ecuación 6.9 no es diagonal.

6.1.2. Construcción de la matriz de amortiguamiento

6.1.2.1. Matriz de amortiguamiento

La matriz de amortiguamiento debe definirse por completo si el análisis modal clásico no se puede aplicar. En un análisis no lineal, uno de los aspectos de mayor interés consiste en analizar la respuesta sísmica del sistema estructural más allá de su intervalo elástico lineal. Para la definición de la matriz de amortiguamiento se debe tener en cuenta que no será similar al cálculo de las matrices de masa o de rigidez. Si bien se podría pensar que es posible determinar la matriz de amortiguamiento de la estructura a partir de las propiedades de amortiguamiento de los diferentes elementos estructurales que conforman el sistema, determinar la matriz de amortiguamiento de esta manera no resulta práctico. Las propiedades de amortiguamiento de cada elemento no son conocidas (no es así en el cálculo de la rigidez ya que se conocen los módulos de elasticidad de los distintos materiales), incluso si estas propiedades se conocieran, se estaría omitiendo cantidades significativas de energía disipada debido a la fricción interna de los elementos estructurales, la interacción con los elementos no estructurales, y otros mecanismos similares. Por estas razones, la matriz de amortiguamiento para un sistema estructural se debe calcular a partir de sus tasas de amortiguamiento modal (β_i) que representan todos los mecanismos de disipación de energía. A continuación, se explica brevemente los valores de β_i comúnmente utilizados y los que se utilizarán para la metodología propuesta por esta investigación.

6.1.2.2. Tasa de amortiguamiento (β_i)

Se tiene una vibración libre amortiguada descrita en la ecuación 6.1, si al dividir la ecuación de equilibrio por la masa m se tiene:

$$\ddot{u} + 2\beta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = 0 \quad 6.10$$

donde la tasa de amortiguamiento β se define como:

$$\beta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad 6.11$$

La tasa de amortiguamiento es una propiedad del sistema (una medida adimensional del amortiguamiento) que depende de la masa y de la rigidez. En ingeniería estructural las tasas de amortiguamiento son típicamente menores al 10% ($\beta < 0.10$), las que por lo general se deben estimar a partir de datos experimentales reales obtenidos de estructuras similares que han experimentado movimientos fuertes durante eventos sísmicos, pero que no han incurrido en el rango inelástico.

Para obtener un mejor estimativo en cuanto al valor de tasa de amortiguamiento a utilizar se consideraron dos procedimientos: uno teórico y otro empírico, los cuales consisten en obtener el valor de β a partir de la normativa NCh2745 y mediante registros sísmicos reales obtenidos en estructuras con sistemas de aislación sísmica.

6.1.2.2.1. Tasa de amortiguamiento a partir de procedimiento teórico

En los sistemas de aislación sísmica de base, a medida que aumenta el desplazamiento en el sistema, el amortiguamiento efectivo tiende a disminuir. Esto se puede concluir fácilmente a partir de la siguiente fórmula:

$$\beta = \frac{EDC}{2\pi K_{eff} D^2} \quad 6.12$$

donde EDC es la energía disipada por el aislador, K_{eff} la rigidez efectiva del sistema y D es el desplazamiento máximo que experimenta el sistema de aislación. Como se observa en la ecuación 6.12, a medida que aumenta el desplazamiento, la tasa de amortiguamiento disminuye, tienen una relación inversamente proporcional. En la Figura 6.1 se puede observar cómo se cumple esta relación. Sin embargo, se observa que a medida que el desplazamiento disminuye, alcanzando el desplazamiento de fluencia, la tasa de amortiguamiento histerético tiende a cero, debido a que el sistema de aislación no incursiona inelásticamente.

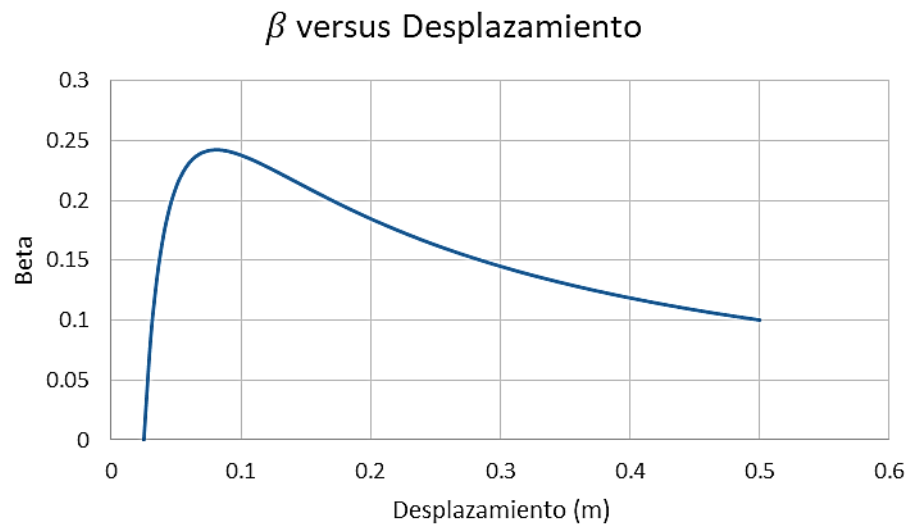


Figura 6.1 Curva de tasa de amortiguamiento vs desplazamiento para un sistema de aislación con $Q_0 = 0.025w$, $T_2 = 4 \text{ seg}$ y desplazamiento de fluencia de $D_Y = 0.025 m$

Una de las variables de modelación que este trabajo investiga corresponde a la tasa de amortiguamiento requerida para representar el comportamiento del sistema de aislación sísmica a bajas deformaciones.

6.1.2.2.2. Tasa de amortiguamiento a baja deformación obtenida a partir de datos experimentales

La tasa de amortiguamiento que experimenta un sistema de aislación sísmica a pequeñas deformaciones ha sido determinada a partir de datos obtenidos experimentalmente. Para ello se consideran resultados de 15 ensayos de aisladores sísmicos, sometidos a 21 ciclos de carga a deformaciones por debajo de la deformación de fluencia (desplazamientos máximos de hasta 2.2 cm). La Tabla 6.1 muestra los desplazamientos máximos, amortiguamiento efectivo, resistencia característica, energía disipada por ciclo (EDC) y la tasa de amortiguamiento para cada ciclo del aislador.

Tabla 6.1 Datos de ensayo de aislador a bajas deformaciones.

Aislador A1					
Cycle	D _{max} (cm)	K _{eff} (Ton/cm)	Q _d (Ton)	EDC (Ton*cm)	beta(-)
1	2.15	3.15	3.17	17.5	0.191
2	2.18	3.49	2.37	19.8	0.190
3	2.18	3.51	2.18	18.2	0.174
4	2.18	3.53	2.05	17.7	0.168
5	2.21	3.51	2.03	17.8	0.165
6	2.17	3.50	1.90	16.6	0.160
7	2.20	3.49	1.96	17.1	0.161
8	2.21	3.49	1.95	17.3	0.162
9	2.27	3.43	2.01	17.9	0.161
10	2.16	3.42	1.82	15.7	0.157
11	2.20	3.44	1.89	16.4	0.157
12	2.17	3.45	1.83	15.7	0.154
13	2.27	3.42	2.02	17.6	0.159
14	2.20	3.45	1.87	16.6	0.158
15	2.28	3.40	2.00	17.5	0.158
16	2.23	3.42	1.92	16.8	0.157
17	2.21	3.39	1.88	16.3	0.157
18	2.28	3.35	2.00	17.4	0.159
19	2.27	3.38	1.97	17.4	0.159
20	2.24	3.40	1.92	17.0	0.159
21	2.22	3.39	1.82	16.3	0.155
Prom.	2.21	3.43	2.03	17.2	0.163

La tasa de amortiguamiento es calculada a partir del área encerrada por el ciclo de histéresis (EDC) según la siguiente fórmula:

$$\beta = \frac{EDC}{2\pi K_{eff} D_{max}^2} * 100 \quad 6.13$$

De la ecuación 6.13 se obtiene una tasa de amortiguamiento de 16.3% para este aislador. Este mismo procedimiento se realiza para los 14 aisladores restantes sometidos a las mismas condiciones. La Tabla 6.2 muestra el resumen de los resultados de la tasa de amortiguamiento para cada uno de los ensayos y se calcula el promedio.

Tabla 6.2 Valores de amortiguamiento obtenidos de los ensayos de los 15 aisladores sísmicos.

Aislador	Beta	Deformación de ensayo (cm)	Tipo de aislador
A1	0.163	2.2	RB
A2	0.401	1.8	LRB
A3	0.039	1.8	RB
A4	0.034	1.8	RB
A5	0.318	1.1	LRB
A6	0.337	1.6	LRB
A7	0.051	1.6	RB
A8	0.236	1.6	RB
A9	0.159	1.7	RB
A10	0.232	1.0	RB
A11	0.341	2.1	LRB
A12	0.122	1.1	RB
A13	0.299	1.2	LRB
A14	0.316	1.2	LRB
A15	0.308	2.3	LRB
Promedio	0.224	1.6	

El valor de tasa de amortiguamiento promedio resultante de los 15 ensayos es de 22.4%. Los datos de los ensayos de los restantes aisladores se muestran en el Anexo B. Este valor se compara con el obtenido para la segunda aproximación, descrita a continuación, y finalmente se selecciona el valor que otorga los mejores resultados en la metodología ADRS.

La segunda aproximación para el cálculo de la tasa de amortiguamiento se obtiene mediante el uso de espectros de potencia, o PSD (Power Spectral Density), para registros sísmicos obtenidos en estructuras con aislación sísmica, sobre y debajo el sistema de aislación. Se estudiaron datos de dos estructuras ubicadas en la zona central de Chile, las cuales son permanentemente monitoreadas por sensores ubicados en diferentes puntos de los edificios y que captan diariamente las señales generadas por ruido ambiental o sismos.

Para el edificio #1 se considera la información registrada por 4 sensores ubicados en dos puntos diferentes (Oriente y Poniente). Para el edificio #2 se considera la información registrada por 2 sensores, ubicados sobre y debajo el sistema de aislación sísmica. Para realizar el procesamiento de estas señales, se realiza el mismo procedimiento descrito en el capítulo 3 para el filtrado de las señales, donde se realizó una corrección por línea base y se utilizó un filtro Butterworth de orden 4 pasa-bajo. La Figura 6.2, muestra un ejemplo de una de las señales obtenidas por los sensores, con su respectiva corrección.

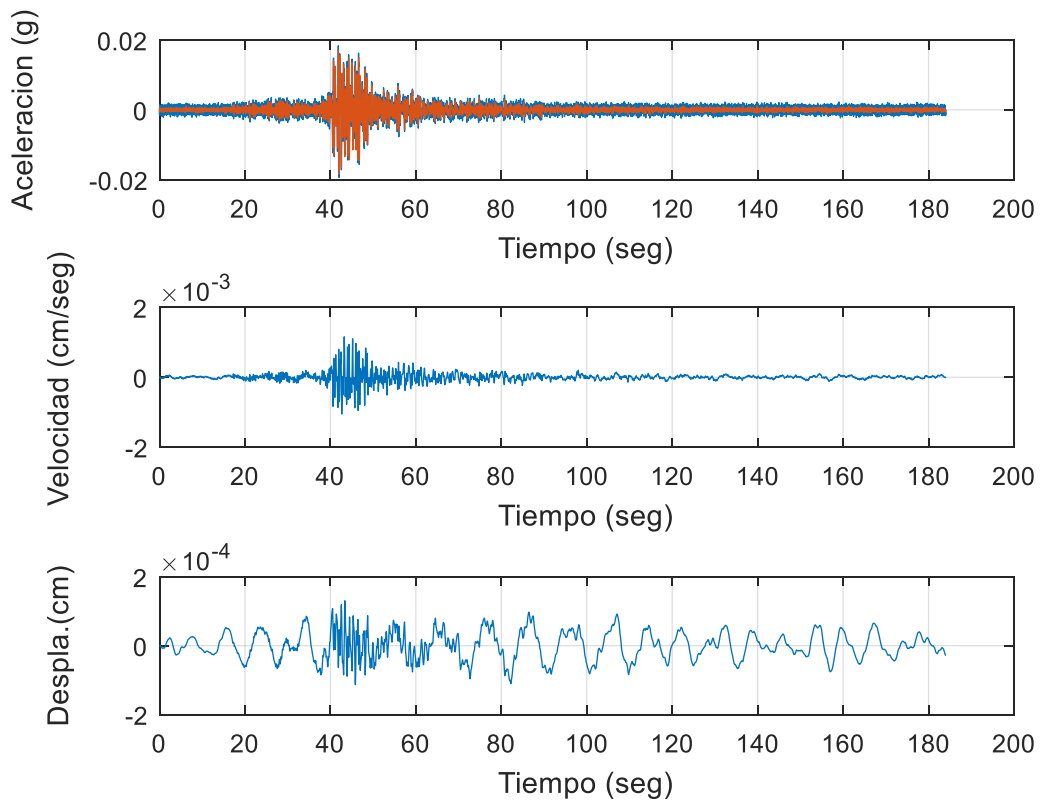


Figura 6.2 Azul: Registro de aceleraciones sin corregir, Naranja: Registro de aceleraciones, velocidad y desplazamiento corregidos respectivamente.

Dado que las señales consideradas se encuentran con desfase una con respecto a la otra, se ha debido aplicar medidas correctivas. Entre las medidas consideradas se encuentran la raíz media cuadrática con ventana móvil, la minimización del error cuadrático y el comando "finddelay" del programa Matlab. Para esta investigación se utilizó la última de estas alternativas para corregir el desfase entre señales. La Figura 6.3 muestra 2 señales del edificio #1, en las que la señal superior corresponde a la registrada por el sensor ubicado en la dirección Oriente del edificio, con coordenada local X, sobre el sistema de aislación sísmica, mientras que la señal de la parte inferior corresponde al sensor ubicado en la misma dirección y sentido que el anterior, pero por debajo del sistema de aislación.

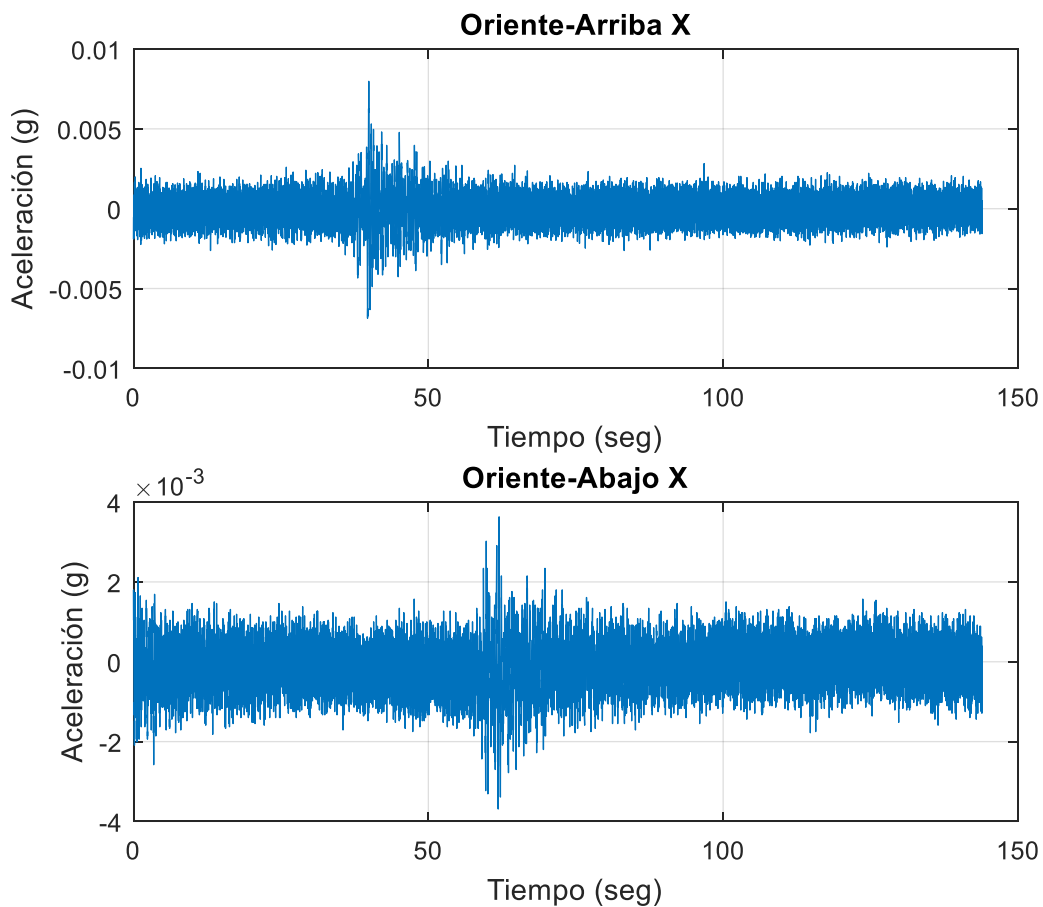


Figura 6.3 Señales registradas por el sensor del edificio #1 en la dirección Oriente, con coordenada local X. La imagen superior corresponde a la señal sobre el sistema de aislación sísmica y la inferior a la señal debajo del sistema de aislación sísmica.

La Figura 6.3 muestra el desfase entre ambas señales. Para la corrección de este desfase entre señales se utilizó una programación en Matlab en donde se determinó el desfase entre ambos registros sísmicos, dando como resultado dos señales en fase, como se muestra en la Figura 6.4.

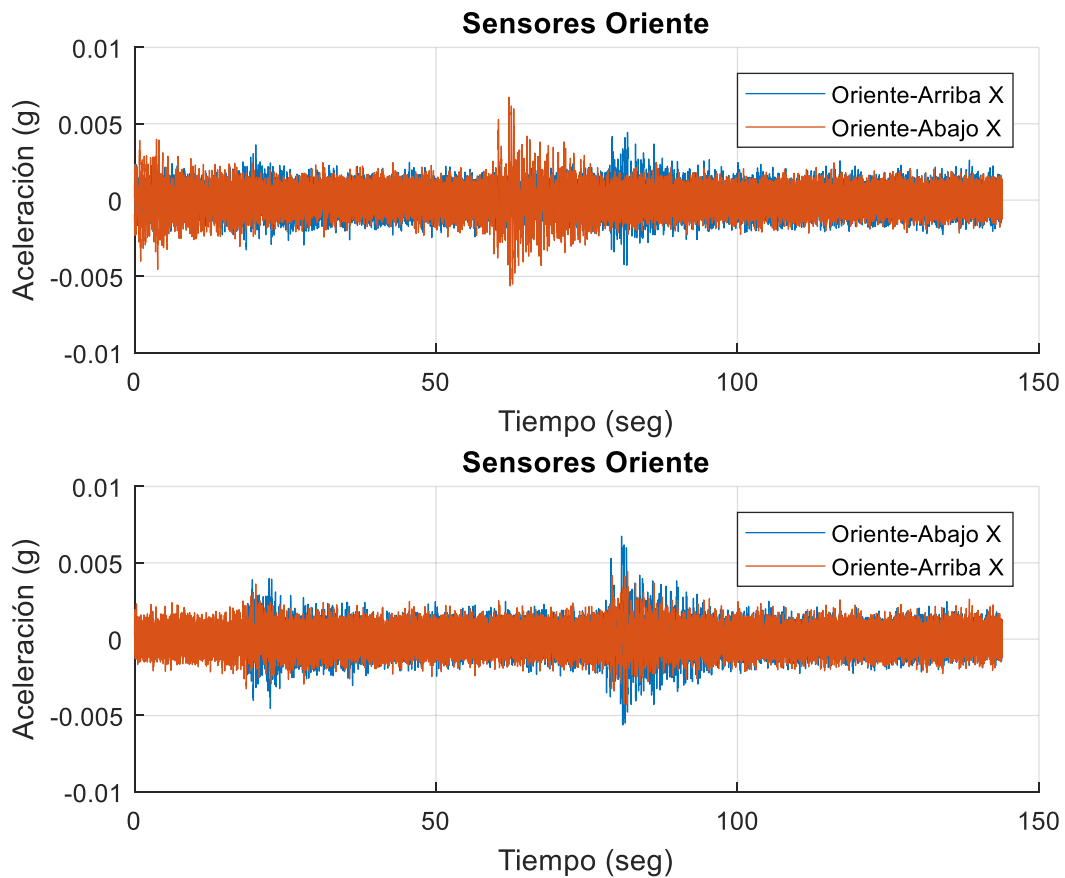


Figura 6.4 Señales registradas por el sensor del edificio #1 en la dirección Oriente, con coordenada local X sobre y debajo del sistema de aislación sísmica. La imagen superior corresponde a las señales con desfase y la imagen inferior a las señales en fase.

Es necesario corregir este desfase entre señales debido a que para el cálculo de la tasa de amortiguamiento mediante el método de ancho de banda, se requiere obtener el cociente entre los PSD de las señales sobre y bajo el sistema de aislación sísmica. El PSD es un espectro que muestra el contenido de energía de la señal en función de la frecuencia. Es una herramienta que permite caracterizar frecuencias y amplitudes de la serie de tiempo. Para realizar los PSD a las señales se utilizó el método de Welch, el cual se encuentra programado en Matlab y consiste en los siguientes 3 pasos:

1. El segmento original de N datos se divide en segmentos (superpuestos) de K datos, cada uno de longitud M.
2. Un ventaneo tipo Hamming (función usada en el procesamiento de señales para evitar las discontinuidades al principio y al final de los segmentos analizados) es utilizado para determinar el periodograma (un estimado de la densidad espectral de una señal) de cada segmento, utilizando la transformada discreta de Fourier (DFT). El resultado obtenido se eleva

al cuadrado y se divide por M.

3. Se promedia el resultado de los periodogramas anteriores para los segmentos de K datos.

El resultado final es un gráfico de amplitud de poder versus frecuencia. El promedio de los periodogramas reduce la variación del valor estimado con respecto a un periodograma simple estimado de toda señal. Adicionalmente, la superposición entre segmentos tiende a introducir información redundante. Sin embargo, este efecto es disminuido mediante el uso de ventanas no rectangulares, lo cual reduce la importancia o el peso de las ventanas al inicio y final de los segmentos. La Figura 6.5, muestra el PSD de las señales registradas por el sensor del edificio #1 en la dirección Oriente, con coordenada local X, sobre y debajo del sistema de aislación sísmica.

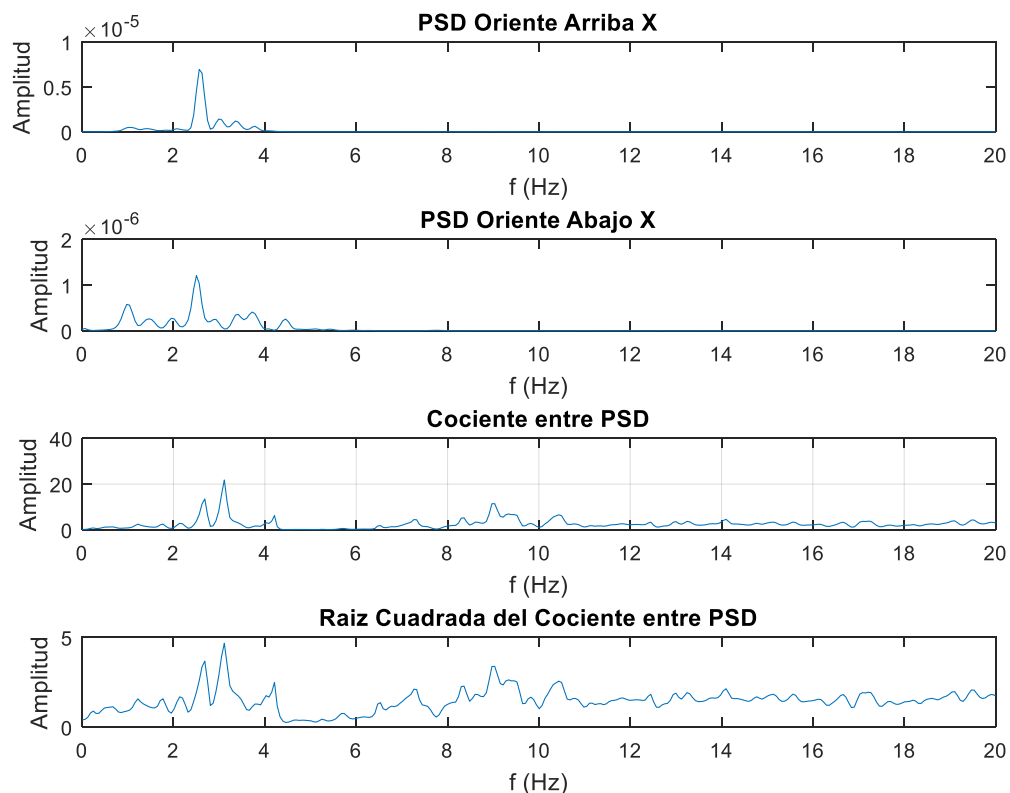


Figura 6.5 Ventanas enumeradas desde arriba hacia abajo. (1) PSD de señal registrada por el sensor del edificio #1 en la dirección Oriente, con coordenada local X sobre el sistema de aislación sísmica; (2) PSD de la señal registrada por el sensor del edificio #1 en la dirección Oriente, con coordenada local X bajo el sistema de aislación sísmica; (3) Cociente entre las amplitudes de los PSD de las señales sobre y bajo el sistema de aislación sísmica; (4) Raíz cuadrada del cociente entre PSD.

Finalmente, para el cálculo de la tasa de amortiguamiento del sistema se observa el primer (o cualquier otro) peak de la gráfica de la raíz cuadrada del cociente entre PSD de las señales, se divide esta amplitud máxima por raíz de dos, obteniendo así una amplitud a dos frecuencias f_1 y f_2 , respectivamente, como se muestra en la Figura 6.6.

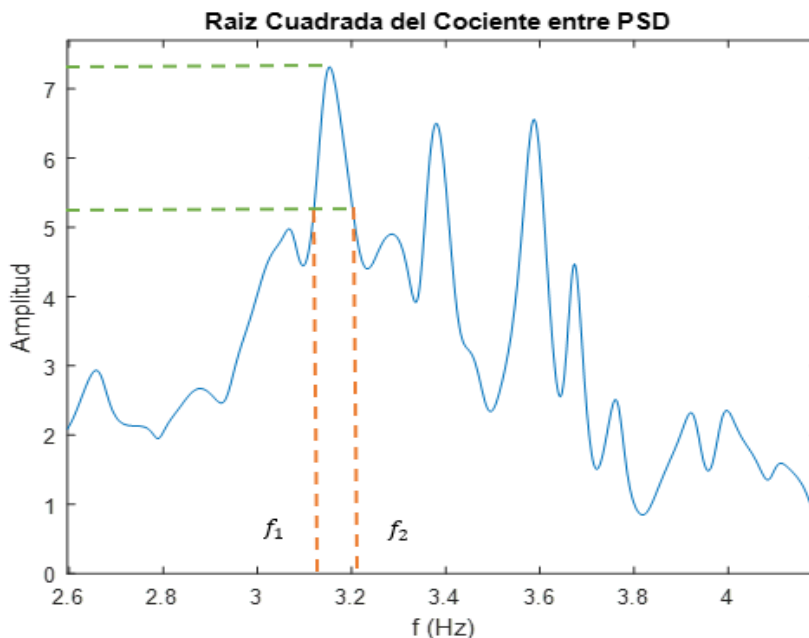


Figura 6.6 Raíz cuadrada del cociente entre PSD donde se obtienen las frecuencias. f_1 y f_2 .

Para obtener la tasa de amortiguamiento se utiliza la siguiente fórmula:

$$\beta = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \quad 6.14$$

Para las señales que se mostraron en el ejemplo, se obtuvieron frecuencias $f_1 = 3.12 \text{ Hz}$ y $f_2 = 3.21 \text{ Hz}$ dando como resultado una tasa de amortiguamiento $\beta = 0.0133$. Este proceso fue realizado para las 29 señales del edificio #1 y las 14 señales del edificio #2 resumidas en el Anexo C. Los registros utilizados alcanzan valores de PGA de hasta 0.05g. El promedio de todas las tasas de amortiguamiento obtenidas (a pequeñas deformaciones) es $\beta = 0.0479$, valor que se redondea al 5%. El valor de tasa de amortiguamiento obtenido del primer análisis de ensayos experimentales es de 22.4%, entre estos dos resultados se escoge el de 5% por ser un valor más conservador y será utilizado en los análisis presentados en los siguientes capítulos de la presente investigación.

6.1.2.3. Matriz de amortiguamiento clásico

Como se mencionó anteriormente, para que un amortiguamiento sea clásico debe satisfacer la propiedad de la ecuación 6.3. Esta condición se satisface cuando los mecanismos de amortiguamiento de toda la estructura son similares, siendo un ejemplo típico el de un edificio de varios niveles con materiales y elementos estructurales similares en todo el sistema. Existen varios procedimientos para desarrollar la matriz de amortiguamiento clásico a partir de una tasa de amortiguamiento modal (β_i). Sin embargo, en esta sección se presenta el método utilizado en el cálculo de la matriz de amortiguamiento clásico.

6.1.2.3.1. Amortiguamiento de Rayleigh

Considerando inicialmente un amortiguamiento proporcional a la masa y un amortiguamiento proporcional a la rigidez se tiene que:

$$c = a_0 m \quad 6.15$$

$$c = a_1 k \quad 6.16$$

donde a_0 y a_1 son constantes con unidades de s^{-1} y s respectivamente. Estas dos matrices se tratan de matrices de amortiguamiento clásico, debido a que la matriz C de la ecuación 6.9 es diagonal. Para un mejor entendimiento de las matrices de las ecuaciones 6.15 y 6.16 se presenta la Figura 6.7, que muestra una representación física de los modelos de amortiguamiento para un edificio de tres niveles. El amortiguamiento proporcional a la rigidez representa la disipación de energía obtenida a partir de las deformaciones de entrepiso, mientras que el amortiguamiento proporcional a la masa físicamente no es tan fácil de justificar debido a que el amortiguamiento del aire que puede ser utilizado en este modelo es demasiado pequeño para la mayoría de las estructuras. Más adelante se analizan las opciones de utilizar ambos modelos de amortiguamiento conjuntamente o por si solos.

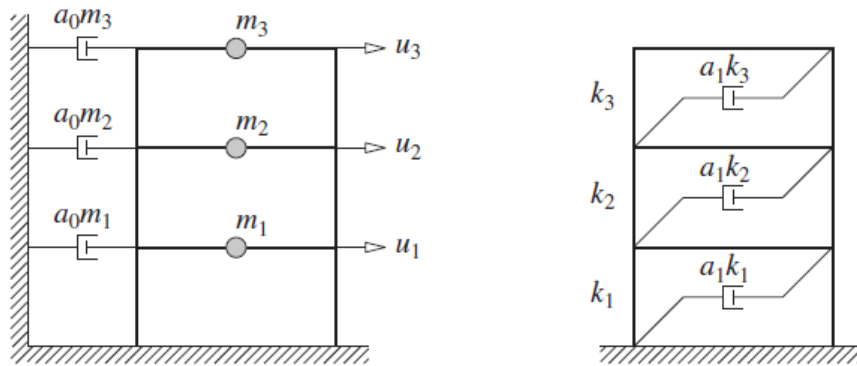


Figura 6.7 Lado izquierdo: amortiguamiento proporcional a la masa, lado derecho: amortiguamiento proporcional a la rigidez. Fuente: Chopra (2014).

Para un sistema con amortiguamiento proporcional a la masa, con coeficiente a_0 , el amortiguamiento para el n -ésimo modo de vibrar es:

$$C_n = a_0 M_n \quad 6.17$$

La tasa de amortiguamiento se obtiene reemplazando 6.11 en la ecuación 6.17:

$$\beta_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n} \quad 6.18$$

La tasa de amortiguamiento es inversamente proporcional a la frecuencia natural ω_n . El coeficiente a_0 puede seleccionarse de manera de obtener un valor específico de la tasa de amortiguamiento en cualquier modo, por ejemplo β_i para el i -ésimo modo de vibrar. Entonces, la ecuación 6.18 se puede escribir como:

$$a_0 = 2\beta_i \omega_i \quad 6.19$$

Una vez obtenido el valor de a_0 , se puede conocer la matriz de amortiguamiento c de la ecuación 6.15. La tasa de amortiguamiento en cualquier otro modo está dada por la ecuación 6.18.

De la misma manera como se relacionó la tasa de amortiguamiento con el amortiguamiento proporcional a la masa, se puede obtener una relación con respecto al amortiguamiento proporcional a la rigidez, relacionándolo con el coeficiente a_1 . Para este caso:

$$C_n = a_1 \omega_n^2 M_n \quad 6.20$$

$$\beta_n = \frac{a_1}{2} \omega_n \quad 6.21$$

en las que se utiliza la ecuación 6.11. La tasa de amortiguamiento en este caso resulta ser directamente proporcional a la frecuencia natural. Se puede obtener un valor específico de tasa

de amortiguamiento a partir del coeficiente a_1 , por ejemplo β_j para el j -ésimo modo de vibrar de la estructura. Entonces, la ecuación 6.20 se puede reescribir como:

$$a_1 = \frac{2\beta_j}{\omega_j} \quad 6.22$$

Una vez encontrado el valor de a_1 , la matriz de amortiguamiento c se conoce a partir de la ecuación 6.16, y la tasa de amortiguamiento en cualquier otro modo está dada por la ecuación 6.21. El amortiguamiento de Rayleigh combina las ecuaciones 6.15 y 6.16 para la construcción de una matriz de amortiguamiento, y se la describe de la siguiente forma:

$$c = a_0 m + a_1 k \quad 6.23$$

La tasa de amortiguamiento para el n -ésimo modo será:

$$\beta_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n \quad 6.24$$

Los coeficientes a_0 y a_1 pueden determinarse a partir de las tasas de amortiguamiento β_i y β_j para los modos i -ésimo y j -ésimo, respectivamente. La ecuación 6.24 para estos dos modos se puede expresar de forma matricial de la siguiente manera:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \beta_i \\ \beta_j \end{Bmatrix} \quad 6.25$$

Si ambos modos de vibrar tienen la misma tasa de amortiguamiento β , lo cual se puede concluir en base a datos experimentales, entonces:

$$a_0 = \beta \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad a_1 = \beta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad 6.26$$

La matriz de amortiguamiento se conoce de la ecuación 6.23 y la tasa de amortiguamiento para cualquier otro modo se obtiene de la ecuación 6.24, la cual varía con la frecuencia natural, como se muestra en la ecuación 6.8.

Al aplicar el procedimiento anterior a un problema práctico como el edificio de estudio del Capítulo 3, los modos i y j seleccionados son el 1 y el 5, la tasa de amortiguamiento para ambos modos es $\beta = 0,02$ y los valores de los coeficientes a_0 y a_1 son 0.19 y 0.00046, respectivamente. Los modos i y j se deben seleccionar de forma de alcanzar valores razonables para las tasas de

amortiguamiento de los modos restantes, de manera que todos ellos contribuyan de manera significativa a la respuesta.

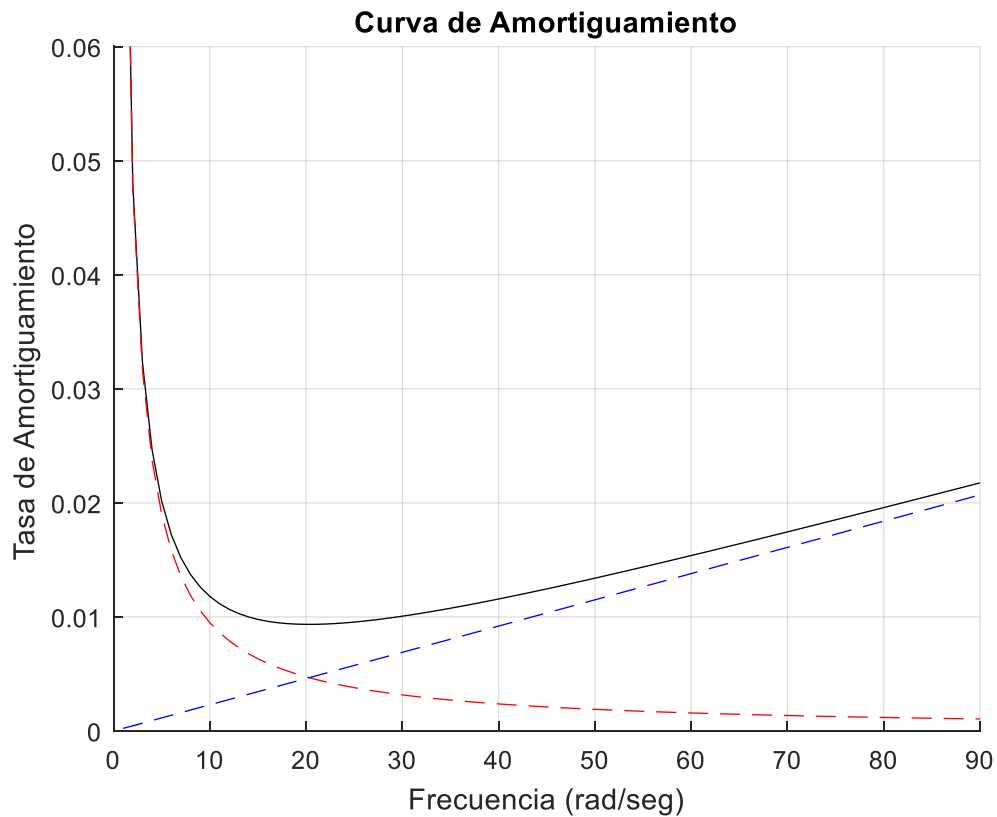


Figura 6.8 Azul: amortiguamiento proporcional a la rigidez, Rojo: amortiguamiento proporcional a la masa, Negro: amortiguamiento de Rayleigh

En la actualidad existen muchas formulaciones de la matriz de amortiguamiento que ofrecen un mejor control sobre las tasas de amortiguamiento impartidas a los modos de vibrar del sistema estructural. Sin embargo, estas matrices c son completas, carecen de las características bandas de m y k . Por tal motivo, su presencia aumenta considerablemente el esfuerzo computacional requerido para integrar la ecuación de movimiento, por lo que raramente son utilizadas. Al utilizar el amortiguamiento de Rayleigh, la banda se transmite a la matriz c por ser la suma escalar de m y k . Otro punto importante del amortiguamiento de Rayleigh es que tiene una interpretación física muy simple, como se mencionó con anterioridad. Si m es una matriz diagonal (por lo general siempre es el caso), los coeficientes diagonales a_0 son constantes de amortiguamiento proporcionales a la masa para un set de amortiguadores viscosos lineales que conectan cada grado de libertad a un soporte fijo (Figura 6.7, izquierdo). Los coeficientes a_1 son constantes de amortiguamiento proporcional a la rigidez para un set de amortiguadores viscosos lineales que interconectan los grados de libertad en un arreglo paralelo a la rigidez estructural.

6.1.2.4. Matriz de amortiguamiento no clásico

La matriz de amortiguamiento clásico no es apropiada si el sistema está formado por dos o más niveles con amortiguamientos diferentes. Un ejemplo básico en la ingeniería estructural es la interacción suelo-estructura. Aunque en muchos análisis de estructuras el suelo puede suponerse rígido, la estructura puede presentar periodos naturales muy bajos, como la estructura de tres pisos de la Figura 10, situación que hace necesario considerar la interacción suelo-estructura. La tasa de amortiguamiento del suelo suele ser muy diferente de la tasa de amortiguamiento de la estructura. Por ejemplo, para el suelo es común considerar amortiguamientos entre el 15 y 20%, mientras que para la estructura el amortiguamiento varía entre 3 y 5% (Chopra, 2014). Por esta razón, el supuesto del amortiguamiento clásico no resultaría apropiado para modelar la interacción del sistema suelo-estructura, pero sería adecuado para analizar ambos sistemas por separado.

La matriz de amortiguamiento para un sistema con tasas de amortiguamiento distintas se construye directamente al ensamblar las matrices de amortiguamiento para los dos subsistemas (estructura y suelo para el ejemplo anterior). Como se muestra en la Figura 6.9, las matrices de rigidez y masa del sistema combinado suelo-estructura se ensamblan a partir de las matrices correspondientes para los dos subsistemas. Los grados de libertad en la interfaz están descritos como I dentro de las matrices de los dos subsistemas que a su vez incluyen las contribuciones de ambos subsistemas. Estas matrices de amortiguamiento de los subsistemas se suponen que serán clásicas por lo que se podría utilizar el procedimiento de la matriz de amortiguamiento de Rayleigh, así las matrices de amortiguamiento para la estructura y la fundación (descrita por el subíndice f) son:

$$c = a_0 m + a_1 k \quad c_f = a_{0f} m_f + a_{1f} k_f \quad 6.27$$

Los coeficientes a_0 y a_1 pueden determinarse a partir de la ecuación 6.19 y 6.22 respectivamente, para una tasa de amortiguamiento apropiada para la estructura, como el ejemplo de la sección anterior $\beta = 0,02$, donde ω_i y ω_j son las frecuencias de los modos naturales para los modos i -ésimo y j -ésimo del sistema combinado sin amortiguamiento. Los coeficientes a_{0f} y a_{1f} se determinan de manera similar, y debieran ser cinco veces mayor si la tasa de amortiguamiento para el suelo de fundación se estima en $\beta_f = 0,02$.

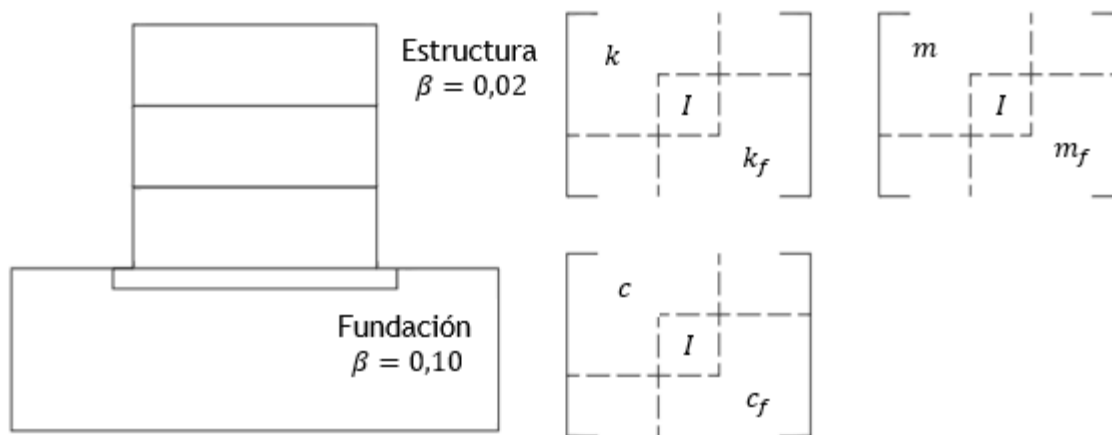


Figura 6.9 Ensamble de las matrices de los subsistemas

El supuesto de amortiguamiento clásico puede no ser apropiado en sistemas con aislación sísmica de base, incluso si la estructura cuenta con amortiguamiento clásico. Para dicho sistema, se construye la matriz de amortiguamiento no clásico evaluando la matriz de amortiguamiento clásico c solo de la estructura, sin incluir el sistema de aislación sísmica. La contribución de amortiguamiento del sistema de aislación se ensambla en c para obtener la matriz de amortiguamiento del sistema completo. Este proceso se puede evitar si la superestructura tiende a ser muy rígida y el sistema estructural resulta ser gobernado solo por el sistema de aislación, reduciéndose todo a un análisis de un oscilador de 1GDL.

6.1.3. Modelación del amortiguamiento usando Rayleigh

En todas las estructuras se observan pérdidas de energía durante vibraciones libres. Estas pérdidas de energía son conocidas comúnmente como amortiguamiento inherente. La fuente más significativa para estas pérdidas son las fricciones internas en los materiales estructurales, conexiones y componentes no estructurales (Kareem y Gurley, 1996). La experiencia muestra que el amortiguamiento inherente generalmente incrementa con la amplitud del desplazamiento y no es dependiente de la frecuencia (Ting y Crawley, 1992), por lo que un modelo matemático que mejor represente este comportamiento sería el de un amortiguamiento histerético. Esta aproximación implica que es necesario un análisis no lineal, y usualmente este análisis linealiza el amortiguamiento inherente asumiendo que es un amortiguamiento viscoso lineal. Dicho amortiguamiento es directamente proporcional a la velocidad, es dependiente de la frecuencia y no es dependiente de la amplitud del desplazamiento. La ecuación de movimiento para un sistema lineal elástico de múltiples grados de libertad (MGDL) con amortiguamiento viscoso lineal es la siguiente:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = p(t) \quad 6.28$$

donde M es la matriz de masa; C es la matriz de amortiguamiento; y K es la matriz de rigidez elástica. Una solución clásica para las ecuaciones de equilibrio dinámico se basa en el principio de superposición modal. En esta aproximación es necesario conocer las matrices de masa y de rigidez. La matriz total de amortiguamiento no es requerida para este proceso, porque las tasas de amortiguamiento son asignadas directamente a los modos individuales. Estas tasas de amortiguamiento en cada modo se pueden especificar de manera arbitraria. Sin embargo, se realizó un análisis detallado de la tasa de amortiguamiento adecuada para el desarrollo del modelamiento del amortiguamiento en la respuesta del sistema que se presenta en las secciones siguientes. La asignación de amortiguamiento a los modos en forma individual implica que la matriz de amortiguamiento es clásica.

El amortiguamiento clásico es el procedimiento estándar en el análisis lineal de estructuras porque mantiene la linealidad del sistema y, además, permite transformar un sistema de MGDL en un sistema de un grado de libertad (1GDL). En esta investigación se estudió el efecto de usar el amortiguamiento viscoso lineal en el análisis de respuesta en el tiempo de un sistema no lineal y el uso del amortiguamiento de Rayleigh, considerando las soluciones propuestas por Charney (2008), las cuales están presentes en el software académico Opensees.

6.1.3.1. Amortiguamiento de Rayleigh para sistemas elásticos

Se consideró amortiguamiento de Rayleigh para el análisis de la estructura de estudio del Capítulo 3. Se estableció una tasa de amortiguamiento de 0.02 en los modos 1 y 5, resultando a_0 y a_1 iguales a 0.19 y 0.00046, respectivamente. Usando estos coeficientes, la matriz de amortiguamiento tiene el mismo perfil que la matriz de rigidez. Una representación física de la matriz de amortiguamiento se muestra en la Figura 6.9.

Un gráfico de la relación de amortiguamiento de la ecuación 6.23 usando $a_0 = 0.19$ y $a_1 = 0.00046$ se muestra en la Figura 6.8. En la figura, las componentes proporcionales a la masa y rigidez del amortiguamiento se muestran por separado, donde se puede observar que la componente proporcional a la masa decrece cuando incrementa la frecuencia, y el término proporcional a la rigidez se incrementa a medida que incrementa la frecuencia. La curva final de amortiguamiento tiene ambas características. También es importante identificar en la Figura 6.8 que la parte proporcional a la masa en el amortiguamiento es dominante en los modos superiores.

Como se mencionó con anterioridad, las tendencias generadas por el amortiguamiento de Rayleigh no son observadas en las estructuras reales. Por ejemplo, hay evidencia experimental que indica que el amortiguamiento en los modos más altos de la estructura no incrementa

significativamente (Kareem y Gurley, 1996). Fritz et al. (2006) muestran que, para edificios altos, existe una tendencia general en la que el amortiguamiento decrece si el número de pisos aumenta, implicando, tal vez, un incremento con la frecuencia. Sin embargo, se nota que para los edificios altos los componentes no estructurales contribuyen relativamente menos al amortiguamiento que los de los edificios más bajos.

De acuerdo con la Figura 6.8 y la ecuación 6.24 resulta imposible obtener una tasa de amortiguamiento negativa en cualquier frecuencia. Sin embargo, se observa que cambios en la frecuencia hacia la izquierda puedan resultar en amortiguamientos mucho más grandes que los esperados para los primeros modos. De ocurrir estos cambios en la frecuencia, serían debido a cambios en la matriz de rigidez producidos por la fluencia (Charney, 2008). Este fenómeno se explica a detalle en la siguiente sección.

6.1.3.2. Amortiguamiento de Rayleigh para sistemas inelásticos

Cuando el sistema responde de manera inelástica, el término de la rigidez en la ecuación 6.28 cambia. Este cambio puede ser de manera abrupta o gradual, dependiendo de varios factores como el sistema estructural usado o el modelo matemático que se esté aplicando. Estos cambios, por lo general, resultan no uniformes a lo largo de la estructura. Cuando se utiliza amortiguamiento de Rayleigh, el análisis tiene tres enfoques básicos para tratar con la respuesta inelástica (Charney 2008). Estos enfoques, que se describen a continuación, están asignados como A, B y C para futuras referencias.

Enfoque A: La matriz de amortiguamiento se desarrolla en base a la rigidez inicial y se usa durante toda la respuesta del sistema. Por lo tanto, la matriz de amortiguamiento descrita en la ecuación 6.23, y repetida a continuación como la ecuación 6.29, se utiliza para cada paso en el análisis:

$$C_A = a_0 M + a_1 K \quad 6.29$$

Esta matriz de amortiguamiento es constante durante todo el análisis del sistema. En cualquier paso del análisis en que la rigidez tangente no sea igual a la rigidez inicial, la matriz de amortiguamiento será no clásica porque las actuales formas modales (basadas en la rigidez tangente estacionaria) no diagonalizarán K .

Enfoque B: La matriz de amortiguamiento se desarrolla en base a la rigidez tangente, y la matriz de amortiguamiento se va actualizando cada vez que la rigidez tangente cambia. La matriz de rigidez quedaría de la forma:

$$C_B = a_0 M + a_1 K_t \quad 6.30$$

donde el subíndice t en el término de K representa la rigidez tangente. En este enfoque la matriz de amortiguamiento será clásica en todos los pasos del análisis porque las actuales formas de los modos diagonalizarán K_t .

Enfoque C: Los coeficientes a_0 y a_1 se actualizan cada vez que la rigidez cambia, y la matriz de amortiguamiento es reformada con esta misma base. Para este caso la matriz de amortiguamiento queda de la siguiente manera:

$$C_C = a_{0t} M + a_{1t} K_t \quad 6.31$$

donde el subíndice t en los coeficientes a_0 y a_1 indican que están basados en la rigidez tangente. Igual que en el enfoque B, la matriz de amortiguamiento será clásica. La principal desventaja de utilizar este enfoque es que las frecuencias modales ω_i y ω_j en las que a_0 y a_1 están basados, se deben actualizar con cada variación de la rigidez. Esto implica la necesidad de un análisis de valores y vectores propios cada vez que la rigidez en el sistema cambia.

En la siguiente sección, se estudia la implicancia de utilizar el amortiguamiento proporcional de Rayleigh en los análisis de sistemas inelásticos a partir de un cambio en la rigidez global (variando la rigidez de manera uniforme) de la estructura de estudio del Capítulo 3.

6.1.3.2.1. Efecto del cambio global de rigidez en estructuras modeladas con amortiguamiento de Rayleigh

Dada una matriz de amortiguamiento, ya sea clásica o no clásica, las tasas de amortiguamiento en cada modo se pueden encontrar mediante la ecuación 6.11. Para sistemas clásicamente amortiguados, las tasas de amortiguamiento resultantes son exactas, mientras que en los sistemas no clásicos, estas son aproximadas (Warburton y Soni, 1977). Una determinación precisa de las tasas de amortiguamiento en los sistemas no clásicos requiere de una transformación al espacio de estado, donde las tasas de amortiguamiento son extraídas de eigenvalores complejos (Liang y Lee, 1991).

Los efectos de los diferentes métodos para establecer el amortiguamiento en sistemas inelásticos son examinados para la estructura de estudio del Capítulo 3. Se investiga el caso en que la matriz total de rigidez presenta una reducción del 50% de su valor original. Los modos de vibrar de este sistema son idénticos a los del sistema original, y las frecuencias para cada modo serán $\sqrt{0.5} = 0.707$ veces la frecuencia original. Las frecuencias para este sistema uniformemente deteriorado

se muestran en la columna 3 de la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Propiedades modales de la estructura prototipo

Frecuencia Angular (rad/seg)		
Modo	Sin Deterioro (Original)	Deterioro Uniforme
1	5.044	3.570
2	18.79	13.28
3	41.19	29.12
4	70.61	49.92
5	81.91	57.91

Los resultados del análisis para la estructura con la rigidez uniforme modificada se muestran en la Figura 6.10, la cual es un gráfico de curvas de tasa de amortiguamiento versus frecuencia angular para las tres aproximaciones diferentes: A, B y C. En la gráfica también se observa el resultado obtenido en el sistema elástico, la cual está señalada como aproximación O. En cada caso las tasas de amortiguamiento son calculadas mediante la ecuación (6.12). La Tabla 2 resume como los cambios en la rigidez tangente se reflejan en el desarrollo de cada curva.

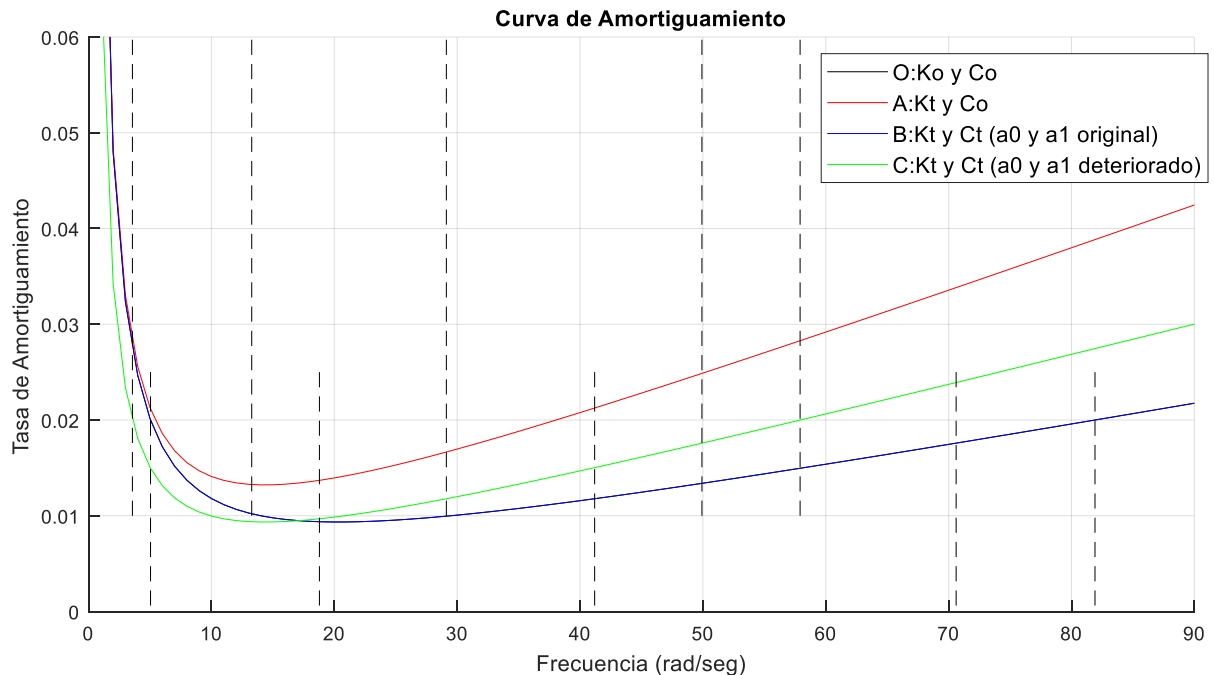


Figura 6.10 Tasa de Amortiguamiento versus Frecuencia para la estructura con Rigidez Uniforme Deteriorada.

El gráfico en la Figura 6.10 tiene 2 sets de líneas verticales segmentadas. Las líneas verticales que se extienden desde abajo del gráfico representan las frecuencias originales, y las líneas verticales que se extienden desde arriba del gráfico representan las frecuencias para el sistema

deteriorado. Como se observa en la figura, las tasas de amortiguamiento para la aproximación A, basadas en la matriz de amortiguamiento original y en las frecuencias del sistema deteriorado, son algo más altas que los valores originales. De hecho, la tasa de amortiguamiento para cada frecuencia del sistema deteriorado es exactamente 1.414 veces la tasa de amortiguamiento original para la correspondiente frecuencia original. Matemáticamente, la curva de amortiguamiento para la aproximación A es $\beta(\omega) = 0.5(0.19/\omega + 0.00092\omega)$. El coeficiente proporcional a la masa es el mismo del sistema original, y el coeficiente proporcional a la rigidez es dos veces el del sistema original. Por lo tanto, la curva de tasa de amortiguamiento versus frecuencia para el sistema deteriorado es diferente a la del sistema original.

La tasa de amortiguamiento para la aproximación B, que está basada en el sistema deteriorado con la matriz de amortiguamiento basada en la rigidez tangente y los coeficientes originales a_0 y a_1 , yace en la misma curva que la del sistema original. Sin embargo, las tasas de amortiguamiento para cada una de las frecuencias deterioradas son diferentes en comparación a las del sistema original porque las frecuencias se han desplazado hacia la izquierda en la figura.

La tasa de amortiguamiento para la aproximación C se encuentra en una curva diferente, siendo la ecuación de la curva $\beta(\omega) = 0.5((0.707 * 0.19/\omega) + (1.414 * 0.00092\omega))$. Para esta aproximación, el coeficiente proporcional a la masa es 0.707 veces el coeficiente de masa original del sistema, y el coeficiente proporcional a la rigidez es 1.414 veces el de la curva original. Las tasas de amortiguamiento para las cinco frecuencias del sistema deteriorado son las mismas que las tasas de amortiguamiento de la aproximación O usando las frecuencias originales. La Tabla 6.4 muestra las distintas rigideces utilizadas en las cuatro aproximaciones para calcular los modos de vibrar de la estructura, la matriz de amortiguamiento y los coeficientes a_0 y a_1 .

Tabla 6.4 Matriz de Rigidez utilizada en los distintos análisis.

Aproximación	Rigidez usada para calcular los modos de vibrar	Rigidez usada para calcular la matriz de amortiguamiento	Rigidez usada para calcular los coeficientes a_0 y a_1
O	K	K	K
A	K_T	K	K
B	K_T	K_T	K
C	K_T	K_T	K_T

Como se observa en los resultados presentados para un deterioro uniforme, la tasa de amortiguamiento obtenida para cada paso de tiempo de un análisis no lineal de respuesta en el tiempo dependerá del método utilizado para modelar el amortiguamiento (aproximación A, B o

C), y en el estado de deterioro de la estructura en ese instante de tiempo. Está claro que, de todas las aproximaciones, la A es la que presenta el mayor incremento en la tasa de amortiguamiento, donde la matriz de amortiguamiento se basa en el estado original del sistema.

La aproximación B, cuya matriz de amortiguamiento se basa en la rigidez tangente instantánea, pero usa los coeficientes de proporcionalidad originales a_0 y a_1 , produce tasas de amortiguamientos que son diferentes al sistema elástico, pero en la misma curva de amortiguamiento de Rayleigh del sistema original. Por lo tanto, cualquier cambio hacia la izquierda en la frecuencia generalmente resultará en mayores amortiguamientos en los modos bajos dominados por la parte proporcional de la masa, y menores amortiguamientos en los modos superiores dominados por la parte proporcional de la rigidez.

La aproximación C produce tasas de amortiguamiento cercanas a las del sistema original. Sin embargo, esta aproximación puede ser no práctica debido a la necesidad de recalcular las frecuencias modales en cada paso de tiempo. Leger y Dussault (1992) recomiendan esta última aproximación, con la consideración adicional que las dos frecuencias en las que se calcula el amortiguamiento de Rayleigh sean las del primer modo, y la del modo más bajo en la que la masa efectiva alcanza un 90% de la masa total.

En estas secciones se analizó el uso del amortiguamiento de Rayleigh en los análisis de sistemas no lineales. Sin embargo, Charney (2008) indica que el uso de un simple modelo histerético, como el desarrollado por Bouc (1967), puede ser la mejor aproximación para modelar el amortiguamiento en los sistemas inelásticos. Dichos modelos tienen la ventaja de eliminar totalmente la matriz de amortiguamiento y tratar el amortiguamiento como una componente del comportamiento histerético estructural en general.

6.1.4. Modelación del amortiguamiento usando amortiguamiento viscoso e histerético

En los capítulos anteriores se analizó el uso del amortiguamiento de Rayleigh en los análisis no lineales, se presentaron las ventajas y desventajas de su uso y el procedimiento de modelación. A partir de esto, surge otra manera de modelar el amortiguamiento mediante la suma de un amortiguamiento viscoso ξ_v y el amortiguamiento histerético ξ_h :

$$\xi = \xi_v + \xi_h \quad 6.32$$

6.1.4.1. Componente histerética

La aproximación considerada utiliza distintos modelos histeréticos con el fin de calibrar la respuesta histerética de un sistema de aislación sísmica al realizar análisis no lineal de respuesta en el tiempo. El objetivo es analizar el comportamiento histerético que mejor se adecue a la metodología ADRS propuesta en esta investigación para estudiar el comportamiento sísmico de estructuras con sistemas de aislación sísmica.

Los modelos histeréticos pretenden representar matemáticamente la relación entre la fuerza y el desplazamiento en una secuencia (aleatoria en eventos sísmicos) de carga y descarga. Una característica de selección de modelo histerético se basaría en capacidad de modelar la variación de la capacidad de disipación de energía, lo cual guarda relación entre modelos degradantes y no degradantes. Los primeros se utilizan, por ejemplo, para modelar elementos estructurales de hormigón armado de estructuras convencionales (Wakabayashi, 1986). Para la presente investigación se utilizan modelos histeréticos no degradados, un ejemplo se muestra en la Figura 6.11.

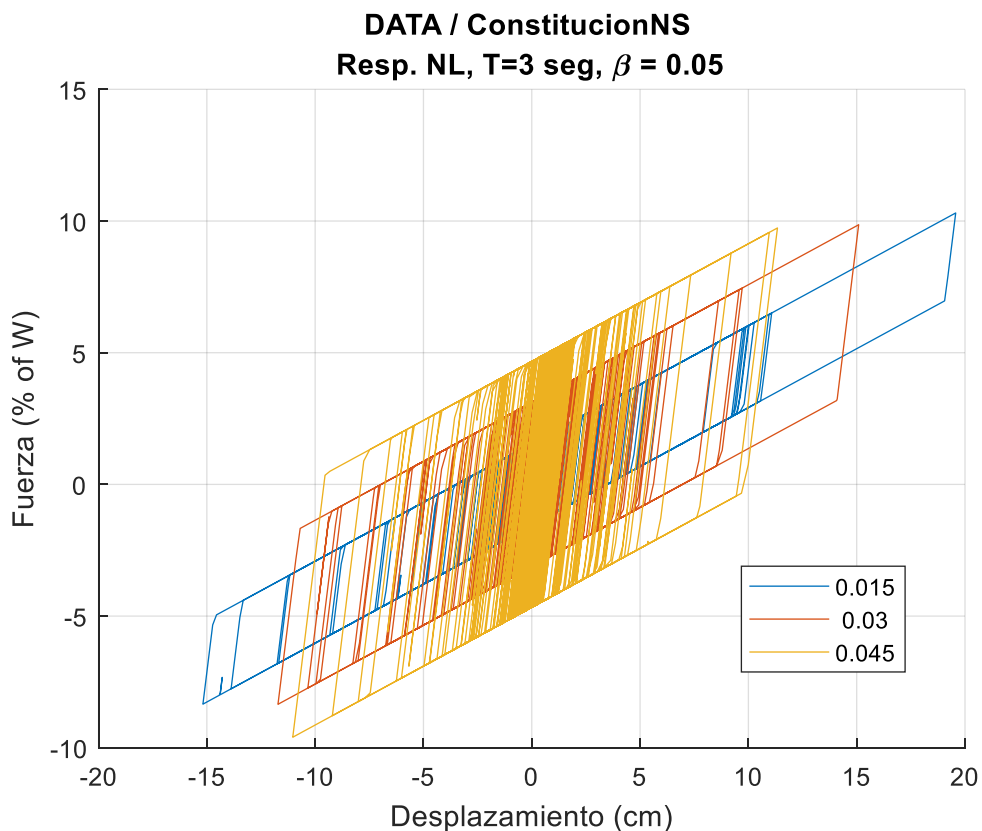


Figura 6.11 Ejemplo de un modelo histerético sin degradación para diferentes niveles de resistencia característica Q_d .

6.1.4.2. Componente viscosa

El amortiguamiento viscoso es utilizado en los análisis no lineales de respuesta en el tiempo para representar el amortiguamiento que no es capturado por el modelo histerético adoptado en el análisis. Esto puede deberse a muchos factores, siendo el más importante la simplificación asumida en el modelo histerético de una respuesta perfectamente lineal en el rango elástico. Como se mencionó con anterioridad, el amortiguamiento adicional también resulta de la no linealidad en las fundaciones y los fenómenos de radiación, y entre la interacción entre la estructura y los elementos no estructurales.

El amortiguamiento viscoso dependerá principalmente de dos factores. El primero es la tasa de amortiguamiento (β) que mejor represente el sistema estructural, valor que se analizó a detalle en la sección 6.1.2.2, y como segundo paso el valor de rigidez que se utilice en el análisis. En la mayoría de los análisis no lineales, se utiliza la rigidez inicial, lo que resulta en grandes fuerzas de amortiguamiento cuando el sistema alcanza el rango no lineal, lo cual ha sido discutido por muchos autores indicando que el uso de esta rigidez es inapropiada (Priestley et al., 2005), y que la rigidez tangencial debiera ser utilizada como la base en el cálculo del amortiguamiento elástico. Con la rigidez tangencial, el coeficiente de amortiguamiento cambia proporcionalmente cada vez que la rigidez varía. Esto resulta en una reducción en las fuerzas de amortiguamiento a medida que la rigidez se degrada una vez producida la fluencia.

Para la presente investigación se analiza el problema mediante el uso de una tasa de amortiguamiento del 5% y en base a la aproximación B, donde la matriz de amortiguamiento se basa la rigidez tangente instantánea, y los coeficientes de proporcionalidad originales a_0 y a_1 . El análisis se desarrolla usando el programa académico Opensees.

6.2. Modelamiento histerético

Los elementos estructurales pueden alcanzar el rango no lineal durante un evento sísmico de alta intensidad. La trayectoria seguida en cuanto a desplazamientos y fuerzas restitutivas se denomina histéresis. La forma de la histéresis en los ciclos carga/descarga representa las propiedades no lineales dinámicas de la estructura. Para la presente investigación, se estudian dos tipos de modelos histeréticos: Bi-Lineal y Bouc-Wen.

6.2.1. Modelo histerético Bi-lineal

El caso más simple corresponde a una histéresis del tipo bi-lineal. El modelo presenta un comportamiento lineal elástico hasta alcanzar la fuerza de fluencia, donde la curva a partir de ese

punto toma una pendiente. La Figura 6.12 muestra un ejemplo del comportamiento del modelo bi-lineal.

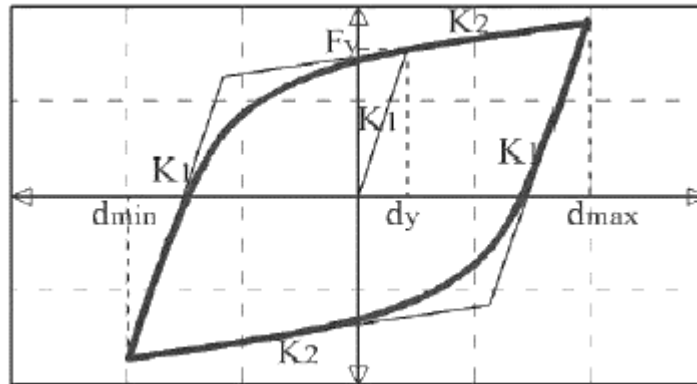


Figura 6.12 Modelo histerético Bi-Lineal. Fuente: Vidal 2008

En la Figura 6.12 se observan los parámetros que conforman el modelo histerético, donde la rigidez inicial (K_1), es asociada a la interacción del sistema estructural frente a cargas de baja magnitud. La rigidez inicial se obtiene al trazar una recta tangente a la zona elástica. La rigidez post-fluencia (K_2) está asociada a la reacción del sistema frente a incursiones inelásticas. La fuerza de fluencia (F_y) y el desplazamiento de fluencia (d_y) establecen un punto de transición entre las rigideces antes mencionadas. Matemáticamente el modelo histerético está expresado de la siguiente manera:

$$F^{i+1} = \text{sat}\{k(\delta^{i+1} - \delta^i), F_{max}, F_{min}\} \quad 6.33$$

donde F es la fuerza por ciclo de carga, k es la rigidez del sistema y “ sat ” es la función de saturación:

$$\text{sat}(x, u, l) = \begin{cases} u, & \text{si } x > u \\ l, & \text{si } x < l \\ x, & \text{otro caso} \end{cases} \quad 6.34$$

La principal ventaja de este modelo es su simplicidad al modelar la curva histerética. Sin embargo, en la región de transición en el estado elástico se obtiene una mejor aproximación al utilizar una curva y no una recta.

6.2.2. Modelo histerético Bouc-Wen

El último modelo histerético que se considera para el desarrollo de esta investigación corresponde al propuesto por Bouc (1971) y extendido por Wen (1976). Es uno de los modelos más utilizados dado a su versatilidad para representar distintas formas histeréticas y por presentar una transición

suave a la fluencia. El comportamiento en ciclos de carga y descarga se basa en la ecuación de Bouc-Wen, descrita por la ecuación diferencial:

$$\dot{z} = \frac{1}{u_y} (\alpha \dot{u} - z^n (\gamma \operatorname{sgn}(\dot{u}z) + \beta) \dot{u}) \quad 6.35$$

donde $\operatorname{sgn}()$ es la función signo, z es una variable histerética adimensional, u_y es el desplazamiento de fluencia, n es una cantidad adimensional que controla la suavidad de la transición del rango lineal al no-lineal, y las variables α , β y γ son parámetros adimensionales que caracterizan la forma de la histéresis.

El modelo original tiene un parámetro redundante, por lo que existe una combinación infinita de parámetros que producen la misma respuesta para una excitación dada (Ma et al. 2004). Por esta razón, comúnmente se fija el parámetro α igual a la unidad, además de la condición para problemas físicos que restringe los valores de β y γ de tal forma que $\beta + \gamma = 1$. Al variar estos parámetros histeréticos para la ecuación de Bouc-Wen es posible cubrir distintas formas para los ciclos de carga y descarga que mejor se adecuen a un sistema dado. Un ejemplo de esto es la posibilidad de tener el modelo histerético bi-lineal como se observa en la Figura 6.13.

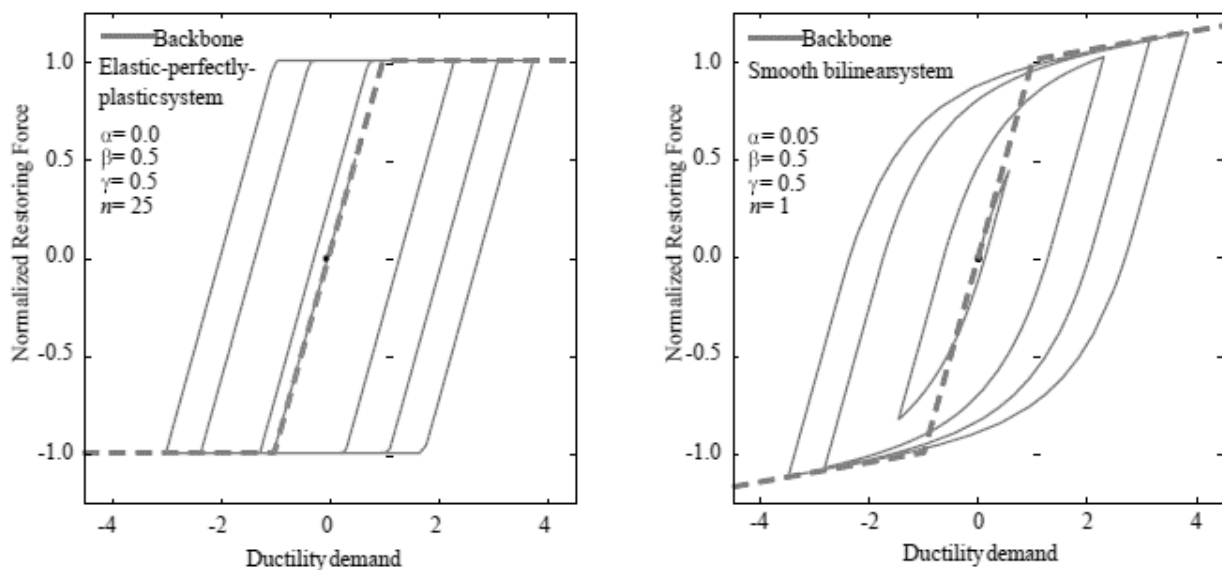


Figura 6.13 Modelo histerético Bouc-Wen. Fuente: Ma et al. 2004.

La fuerza restitutiva puede ser descrita en función de la variable histerética z y el desplazamiento u .

$$\frac{F(u, z)}{F_y} = r_s \frac{u}{u_y} + (1 - r_s)z \quad 6.36$$

donde r_s es la razón entre la rigidez inicial y la rigidez post-fluencia y F_y la fuerza de fluencia. A partir de esto se pueden obtener las pendientes:

$$k_i = \frac{F_y}{u_y} \quad 6.37$$

$$k_p = r_s \frac{F_y}{u_y} \quad 6.38$$

donde k_i y k_p son las rigideces inicial y post-fluencia respectivamente. La primera pendiente representara la rigidez del resorte lineal-elástico en paralelo al resorte histerético de rigidez inicial $k_i - k_p$. La fuerza restitutiva en función de las rigideces mencionadas es:

$$F(u, z) = k_p u + (k_i - k_p) u_y z \quad 6.39$$

6.3. Método de integración numérico

En general, la solución analítica de la ecuación de movimiento para un sistema de un grado de libertad no es posible si la excitación varía arbitrariamente con el tiempo o si el sistema no es lineal. Tales problemas se abordan al satisfacer el equilibrio dinámico en puntos discretos de tiempo después de definir la solución en tiempo cero. La mayoría de métodos utilizan intervalos iguales de tiempo Δt . Estos métodos se los resuelve de distintas maneras. Sin embargo, todos los enfoques pueden ser clasificados como métodos de integración explícitos o implícitos.

Los métodos explícitos utilizan la ecuación diferencial en el tiempo “ t ” para predecir una solución en el tiempo “ $t + \Delta t$ ”. Estos métodos no implican la solución de un grupo de ecuaciones lineales en cada paso. Los métodos implícitos son totalmente opuestos ya que intentan satisfacer la ecuación diferencial en el tiempo “ t ” después de encontrar la solución en el tiempo “ $t + \Delta t$ ”, por lo que estos métodos requieren la solución de un grupo de ecuaciones lineales en cada paso de tiempo. Edward Wilson (2000) propone que para obtener la solución exacta de estructuras no-lineales se deben emplear solamente métodos implícitos y de paso simple, para el análisis sísmico paso a paso de estructuras reales.

En las siguientes secciones se incluyen presentaciones de métodos implícitos que se utilizan en el análisis de la respuesta dinámica de sistemas de 1 GDL con el objetivo de comparar estos métodos y analizar su respuesta al utilizarlos en la metodología ADRS. Se presentarán gráficos ADRS utilizando estos métodos de integración numérica.

6.3.1. Método de Newmark

En el año 1959 Newmark presentó una serie de métodos de paso en el tiempo para solucionar problemas dinámicos sometidos a cargas sísmicas basándose en las siguientes ecuaciones:

$$\dot{u}_t = \dot{u}_{t-\Delta t} + [(1 - \gamma)\Delta t]\ddot{u}_{t-\Delta t} + (\gamma\Delta t)\ddot{u}_t \quad 6.40$$

$$u_t = u_{t-\Delta t} + (\Delta t)\dot{u}_{t-\Delta t} + [(0.5 - \beta)(\Delta t)^2]\ddot{u}_{t-\Delta t} + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{u}_t \quad 6.41$$

Las variables γ y β son parámetros numéricos que controlan la estabilidad del método y el amortiguamiento numérico introducido en el sistema por parte de este método. Típicamente el valor de γ es de $\frac{1}{2}$ y β debe satisfacer la condición $\frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}$. Estas dos ecuaciones, en combinación con la ecuación de equilibrio presentada a continuación:

$$m\ddot{u}_t + c\dot{u}_t + ku_t = p_t \quad 6.42$$

al final del paso del tiempo, proporcionan la base para calcular u_t , \dot{u}_t y \ddot{u}_t en el tiempo t a partir de $u_{t-\Delta t}$, $\dot{u}_{t-\Delta t}$ y $\ddot{u}_{t-\Delta t}$ conocidas en el tiempo $t - \Delta t$. Para implementar estos cálculos es necesario iterar debido a que la expresión \ddot{u}_t desconocida aparece en el lado derecho de la ecuación 6.40.

La Figura 6.14, muestra un gráfico ADRS utilizando el método de integración de Newmark para un total de 21 pares de registros seleccionados aleatoriamente y escalados en el dominio del tiempo al Sismo Máximo Posible de la norma NCh2745. El método de integración numérico se encuentra habilitado en el software académico Opensees, donde se especifica el comando “*integrator Newmark \$gamma \$beta*” y los parámetros γ y β que se utilizan son 0.5 y 0.25 respectivamente.

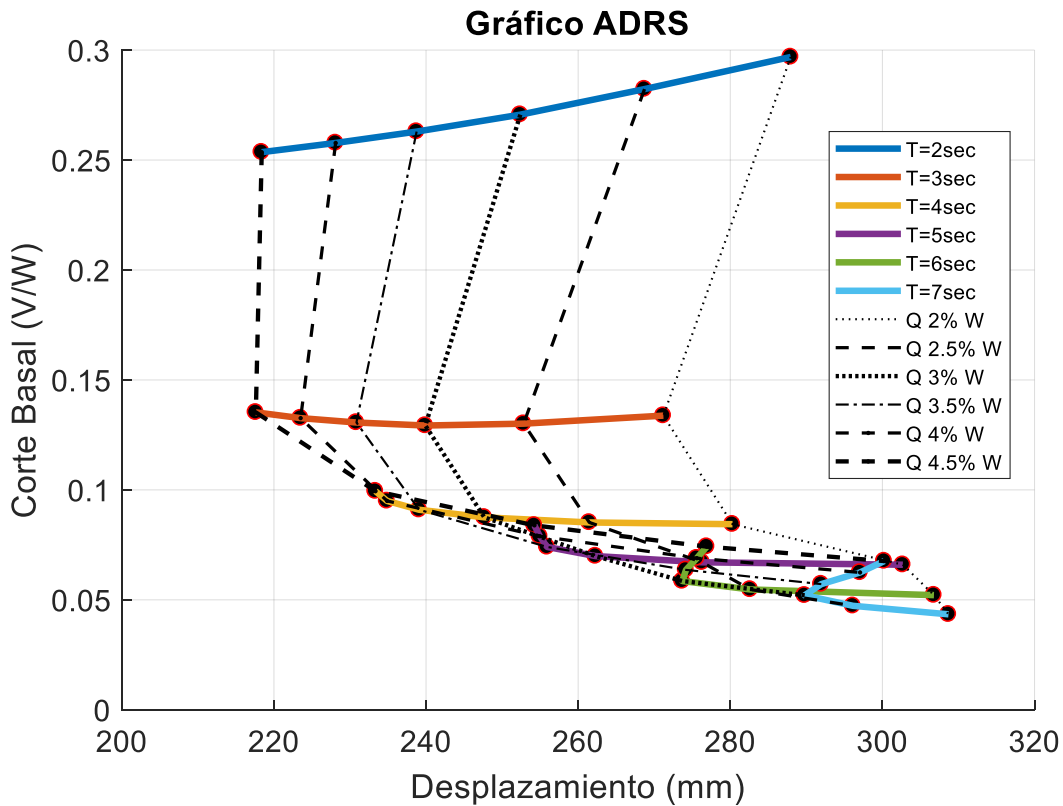


Figura 6.14 Gráfico ADRS a partir del método de integración de Newmark.

6.3.2. Método de Hilber, Hughes y Taylor

El método de integración numérico propuesto por Hilber, Hughes y Taylor, es un método implícito que permite la disipación de energía y la precisión de segundo orden. Usa el método de Newmark para solucionar la siguiente ecuación modificada de movimiento:

$$m\ddot{u}_t + (1 + \alpha)c\dot{u}_t + (1 + \alpha)ku_t = (1 + \alpha)p_t - \alpha p_t + \alpha c\dot{u}_{t-\Delta t} + \alpha ku_{t-\Delta t} \quad 6.43$$

La calibración del método dependerá del valor de α a utilizar. Hilber (1977) propone diferentes algoritmos y los compara con un radio espectral, parámetro importante en la medición de la estabilidad y disipación de un método iterativo. Si el parámetro es menor a 1 el método tiene convergencia, tal y como se muestra en la Figura 6.15, que ilustra el comportamiento del radio espectral (ρ) versus el paso de tiempo ($\Delta t/T$). Los algoritmos se presentan a continuación:

1. Regla Trapezoidal ($\alpha = 0, \beta = 0.25, \gamma = 0.5$)
2. Regla Trapezoidal con amortiguamiento- α ($\alpha = 0.1, \beta = 0.25, \gamma = 0.5$)

3. Método de Newmark con amortiguamiento- γ ($\alpha = 0$, $\beta = 0.3025$, $\gamma = 0.6$)
4. Nuevo Algoritmo ($\alpha = -0.1$, $\beta = 0.3025$, $\gamma = 0.6$)

Los radios espectrales para los casos (3) y (4) son estrictamente bajos a medida que el paso de tiempo aumenta. Esta condición asegura que la respuesta en los modos superiores es amortiguada. Los resultados para el caso (2) indican porque el amortiguamiento α no es un mecanismo de disipación efectivo. Para grandes pasos de tiempo los casos (3) y (4) son idénticos. Sin embargo, el radio espectral para el caso (4) es más cercano a 1 para largos rangos de pasos de tiempo, por el valor negativo de α .

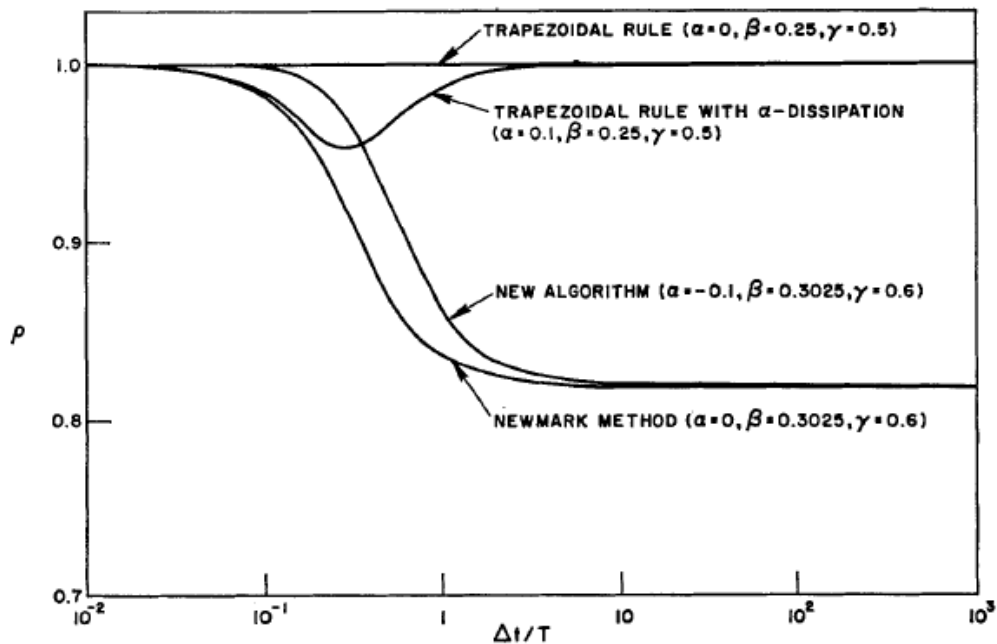


Figura 6.15 Radio espectral versus paso de tiempo. Fuente: Hilber (1977).

Similar al método de Newmark, la precisión del método de HHT se aplica a problemas lineales. Sin embargo, en la actualidad está siendo utilizado por muchos programas computacionales para resolver problemas no lineales. La Figura 6.16, muestra un gráfico ADRS utilizando el método de integración de Hilber, Hughes y Taylor para los mismos parámetros utilizados con el método de Newmark. El método de integración numérico se encuentra habilitado en el software académico Opensees, mediante el comando "*integrator HHT \$alpha <\$gamma \$beta>*" donde el parámetro $\alpha = -0.3$ y los parámetros γ y β son opcionales, y los valores considerados por defecto garantizan que el método sea implícito de segundo orden. Si el valor de $\alpha = 0$, el análisis será igual al método de integración de Newmark.

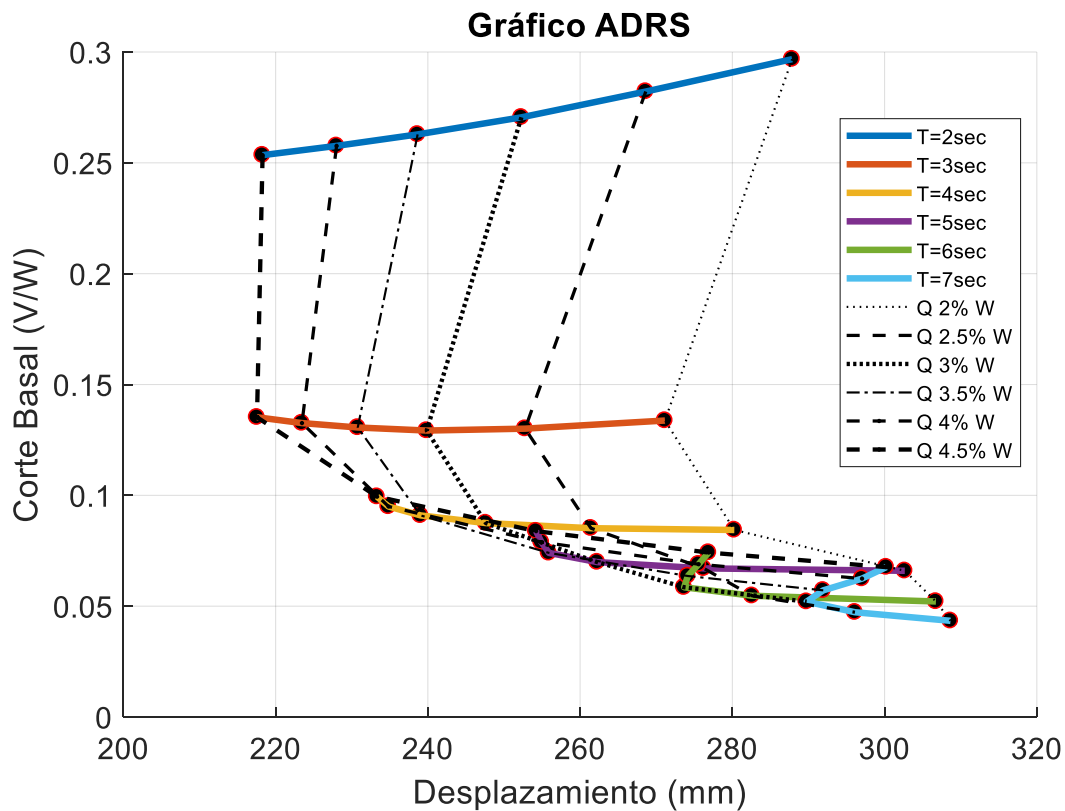


Figura 6.16 Gráfico ADRS a partir del método de integración de HHT.

6.3.3. Método alpha generalizado

El método de integración numérico alpha generalizado es un método implícito que al igual que el método de Hilber, Hughes y Taylor permite la disipación de energía en altas frecuencias y precisión de segundo orden. La forma básica de este método está dada por la ecuación de equilibrio descrita de la siguiente manera:

$$m[(1 - \alpha_m)\ddot{u}_t + \alpha_m\ddot{u}_{t-\Delta t}] + c[(1 - \alpha_f)\dot{u}_t + \alpha_f\dot{u}_{t-\Delta t}] + k[(1 - \alpha_f)u_t + \alpha_fu_{t-\Delta t}] = p[(1 - \alpha_f) + \alpha_f] \quad 6.44$$

donde las ecuaciones de desplazamiento u y velocidad \dot{u} son similares a las ecuaciones 6.40 y 6.41 utilizadas en el método de Newmark. La ecuación de movimiento modificada es una combinación de los métodos de Hilber, Hughes y Taylor (1977) y de Wood, Bossak y Zienkiewicz (1981), y tiene como obstáculo fundamental encontrar los valores de α_f y α_m . Si el valor de $\alpha_m = 0$, el algoritmo se reduce al método de Hilber, Hughes y Taylor, y si el valor de $\alpha_f = 0$, resulta el método de Wood, Bossak y Zienkiewicz. Si ambos parámetros son igual a 0, se tendrá el método de Newmark (donde solo dependerá de los valores de γ y β). Para garantizar la precisión de segundo orden del método los valores de α_f y α_m deben cumplir las siguientes restricciones:

$$\gamma = 0.5 - \alpha_m + \alpha_f \quad 6.45$$

$$\alpha_m \leq \alpha_f \leq 0.5 \quad 6.46$$

$$\beta \geq 0.25 + 0.5(\alpha_f - \alpha_m) \quad 6.47$$

La Figura 6.17, muestra el gráfico ADRS para el método de integración de Alpha Generalizado para los mismos parámetros utilizados en los métodos de integración antes mencionados. Este método también se encuentra implementado en el software académico Opensees, donde se especifica el comando “*integrator GeneralizedAlpha \$alphaM \$alphaF <\$gamma \$beta>*”, los valores que se utilizaron fueron $\alpha_m = 0.5$ y $\alpha_f = 0.5$ y los parámetros γ y β son opcionales y los valores que vienen por defecto garantizan que el método sea implícito de segundo orden.

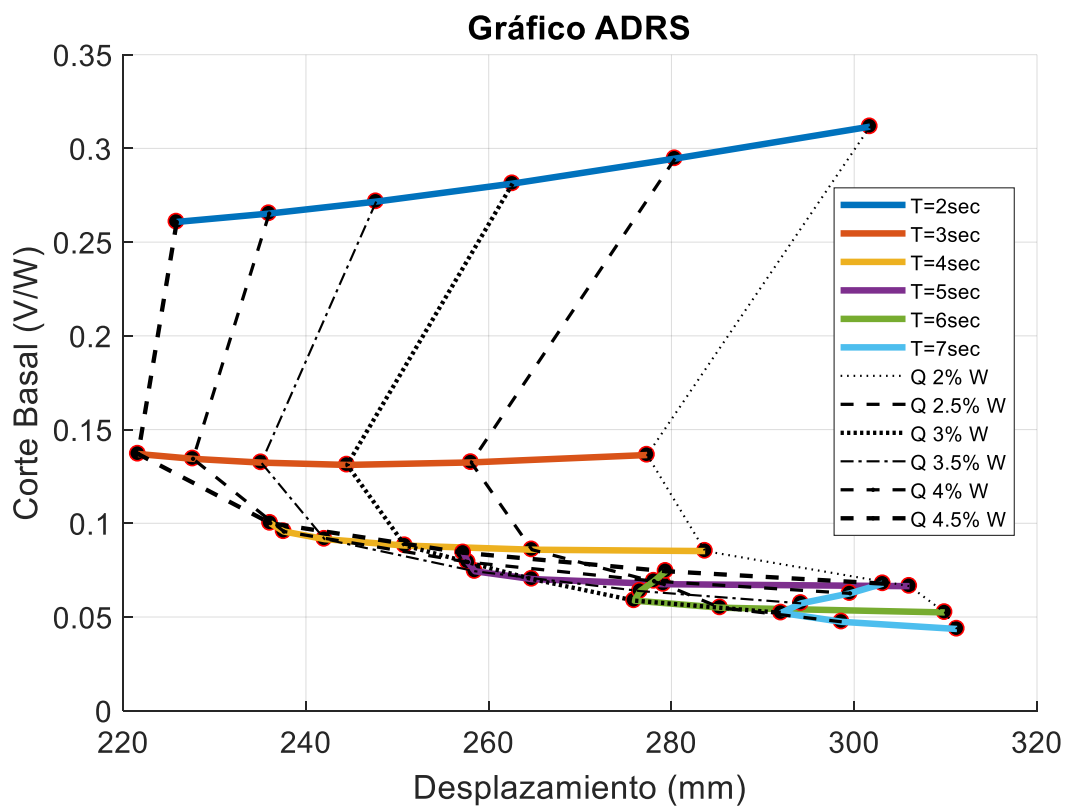


Figura 6.17 Gráfico ADRS a partir del método de integración alpha generalizado.

6.4. Relación entre la rigidez inicial y la rigidez post-fluencia

Los sistemas de aislación sísmica se representan mediante modelos analíticos. El método más simplificado es el del modelo lineal con propiedades efectivas compuesto por la rigidez efectiva (K_{eff}) y el amortiguamiento viscoso efectivo (β_{eff}). El modelo más adoptado para un análisis dinámico de una estructura aislada sísmicamente es la idealización bi-linear para la histéresis, dada su simplicidad y precisión para identificar la relación fuerza-desplazamiento en los sistemas de aislación sísmica. La Figura 6.18 muestra un ejemplo de una histéresis bi-linear, donde los

principales parámetros que caracterizan el modelo son la rigidez inicial (K_i), la resistencia característica (Q_o), y la rigidez post-fluencia (K_p).

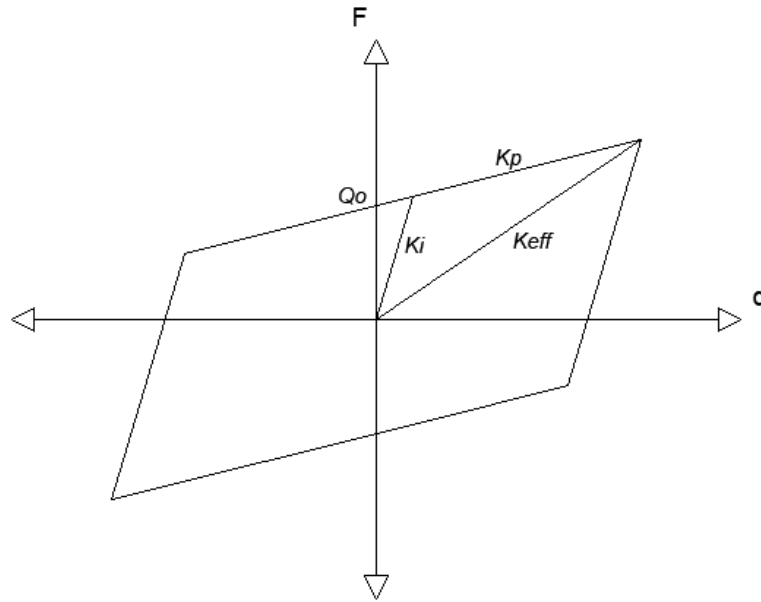


Figura 6.18 Modelo histerético bilineal y sus principales parámetros

En la norma de aislación sísmica NCh2745 se especifica que la relación entre la rigidez inicial y la rigidez post-fluencia se expresa por la siguiente ecuación:

$$K_i = \alpha K_p \quad 6.48$$

donde α puede tomar valores entre 5,5 y 9, este rango de valores se basa en un sinnúmero de ensayos realizados a distintos sistemas de aislación sísmica. Sin embargo, para esta investigación se efectúa un análisis de sensibilidad de los gráficos ADRS obtenidos dependiendo del valor de α considerado. Hall (2000) indica que el valor de α puede ser un factor de 3 o mas, y existen ensayos en los que se alcanzan valores de α iguales a 15. Para el desarrollo de los gráficos ADRS se utilizan valores de α iguales a 5, 10 y 15.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Análisis de sensibilidad de los parámetros de la metodología ADRS

Un análisis de sensibilidad es el estudio de los cambios en la respuesta sísmica del modelo, cualitativa o cuantitativamente, debido a las variaciones en diferentes parámetros de modelación. La sensibilidad del modelo con respecto a los parámetros de modelación y análisis es el grado en que el parámetro afecta la respuesta del sistema. La forma más simple de desarrollar un análisis de sensibilidad es variar repetidamente un parámetro a la vez, mientras se mantienen fijos los demás a valores nominales previamente escogidos (Ma et al., 2004). Para el presente estudio, el desplazamiento que tendrá el sistema de aislación y el corte basal de la estructura serán los parámetros de salida, mientras los parámetros de entrada serán los siguientes:

1. Número de registros sísmicos, divididos en grupos de 3, 7 y 21 pares de registros de aceleraciones (excluyendo el registro de Concepción).
2. Selección de los registros sísmicos a ser considerados en los grupos del punto anterior aleatoriamente o de acuerdo a su Intensidad de Arias (IA).
3. Modelo histórico utilizado: Bi-lineal o Bouc-Wen.
4. Método de escalamiento de los registros sísmicos: Factor de escala constante, escalamiento en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo.
5. Espectro objetivo para el escalamiento de registros sísmicos: Sismo Máximo Posible (SMP) de la norma NCh2745 y el Espectro Medio Condicional (EMC).
6. Factor α que representa la relación entre la rigidez inicial (k_i) y la rigidez post fluencia (k_p), siendo los valores de $\alpha = 5, 10$ y 15 .
7. Método de integración numérico: Método de Newmark, Método de Hilber, Hughes y Taylor, y el Método Alpha Generalizado.

Se realiza este análisis para cada valor de periodo post fluencia, para identificar la variación de los resultados con respecto al periodo T_2 que tendrá el sistema de aislación sísmica. A continuación se muestra el análisis de sensibilidad para un parámetro de entrada y sus respectivos gráficos ADRS para comparar los resultados. Se muestra una tabla resumen de los resultados del análisis de sensibilidad de todos los parámetros de salida especificados anteriormente. En el Anexo D se presentan en detalle los resultados obtenidos.

Los gráficos se muestran divididos en dos secciones. Del lado izquierdo del gráfico se encuentran los valores del corte basal para cada valor de resistencia característica y del lado derecho del gráfico los valores de desplazamiento del sistema de aislación con respecto a la resistencia

característica. Cada gráfico representa los resultados de un solo periodo post-fluencia. La Figura 7.1 y Figura 7.2 muestra el análisis de sensibilidad al variar el número de registros de aceleraciones a utilizar en la metodología ADRS para los periodos post-fluencia de $T_2 = 3$ y 4 respectivamente. Los valores mostrados son el promedio de los máximos valores de corte basal y desplazamiento de los registros analizados. Los parámetros fijos para el análisis son: método de escalamiento por factor de escala, método de integración de Newmark, registros sísmicos seleccionados por la intensidad de Arias, registros escalados al Espectro Medio Condicional, modelo histerético bi-lineal y factor $\alpha = 10$.

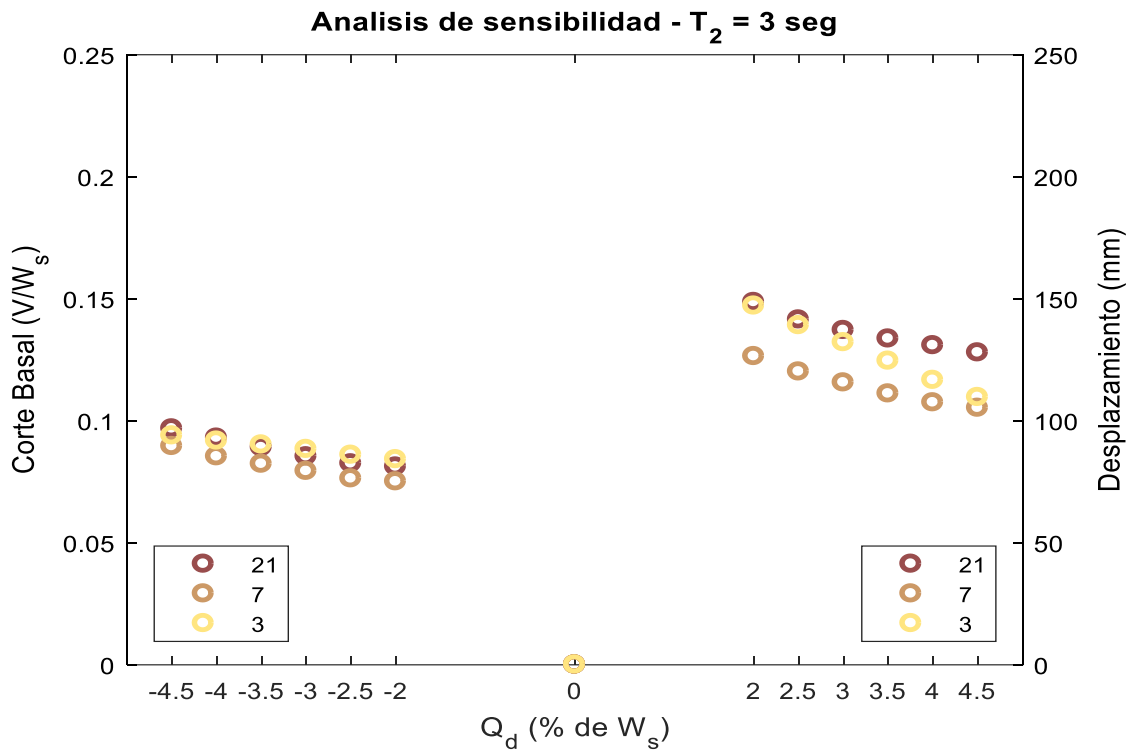


Figura 7.1 Análisis de sensibilidad para $T_2 = 3$ con parámetro de entrada: número de registros sísmicos a utilizar

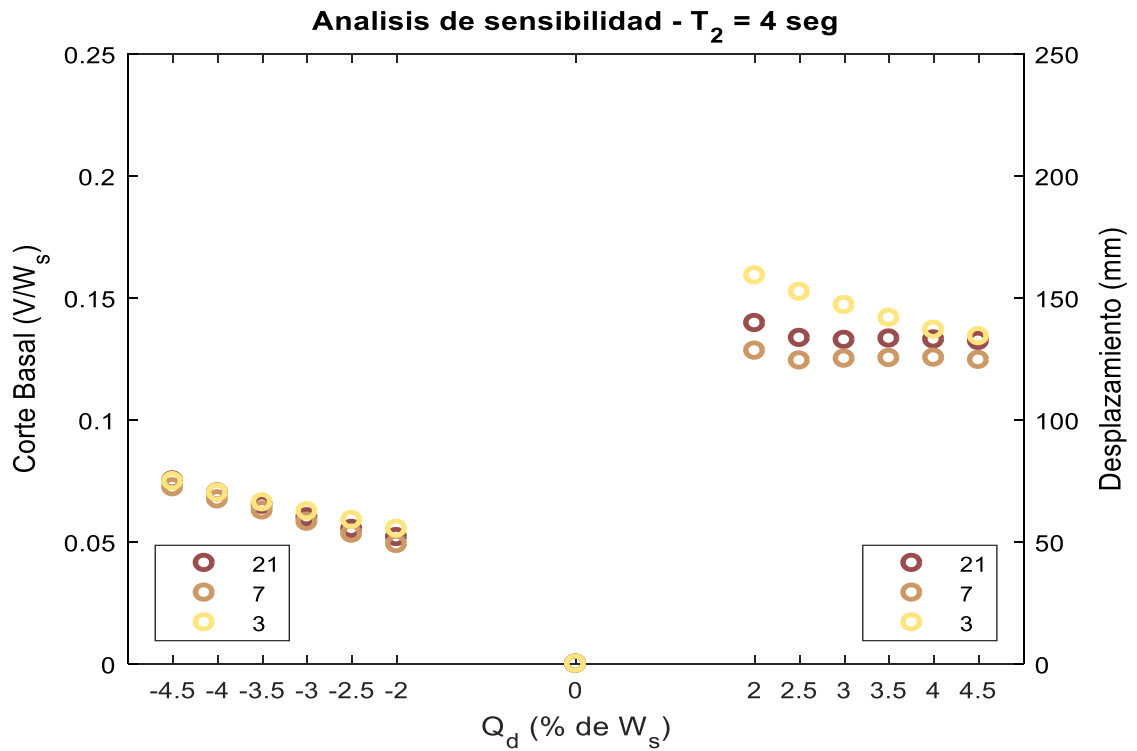


Figura 7.2 Análisis de sensibilidad para $T_2 = 4$ con parámetro de entrada: número de registros sísmicos a utilizar

Los análisis de sensibilidad se obtienen a partir de los espectros ADRS para los parámetros descritos anteriormente. La Figura 7.3 muestra el gráfico ADRS para 21 registros sísmicos, la Figura 7.4 para 7 registros sísmicos, y la Figura 7.5 para 3 registros. Se observa que a medida que aumenta el número de registros sísmicos, los gráficos ADRS tienen una distribución más organizada y entendible de los datos.

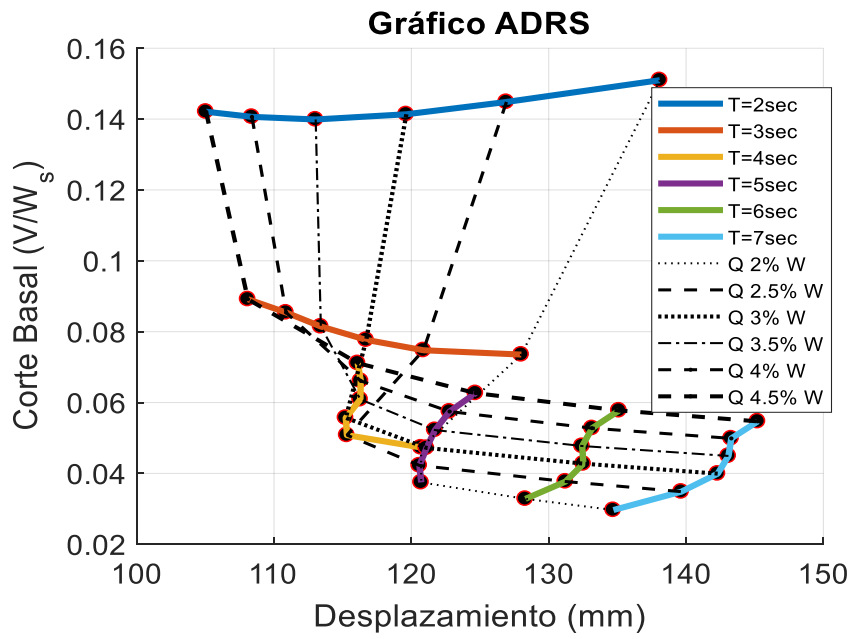


Figura 7.3 Gráfico ADRS utilizando 21 pares de registros

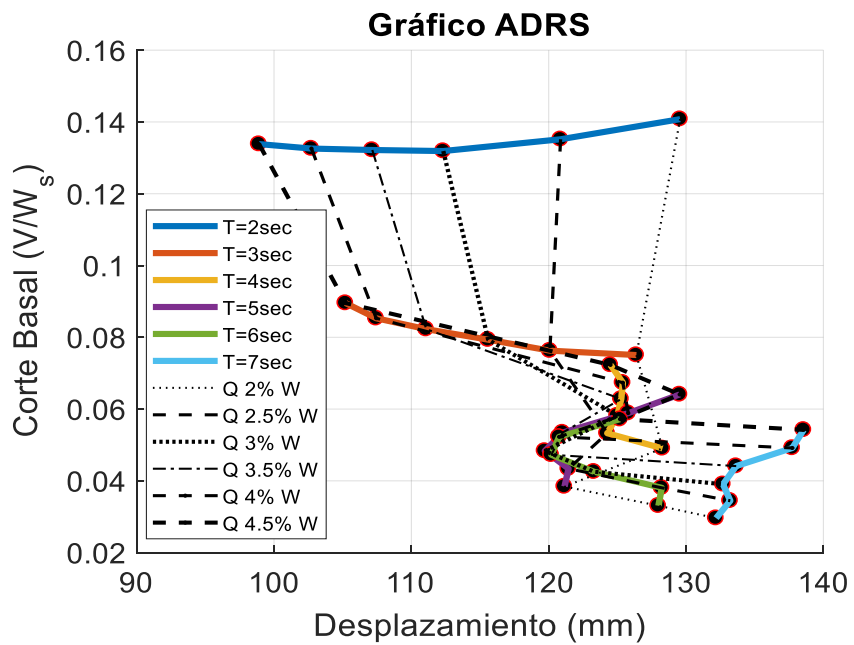


Figura 7.4 Gráfico ADRS utilizando 7 pares de registros

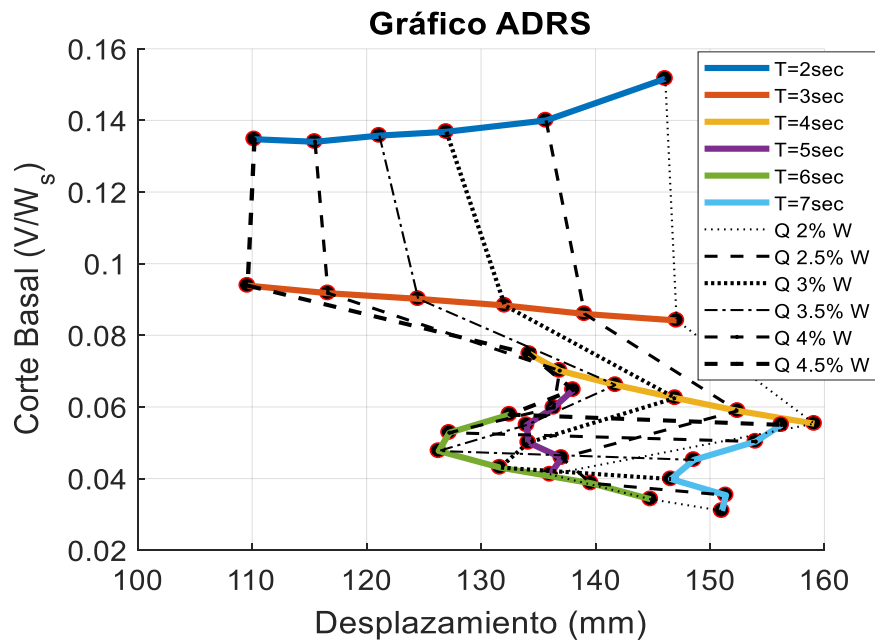


Figura 7.5 Gráfico ADRS utilizando 3 pares de registros

En la Figura 7.1 y Figura 7.2 se puede observar que utilizar 3 pares de registros para la metodología ADRS genera los máximos cortes basales y desplazamientos para todo el rango de resistencias características en los periodos de 3 y 4 seg. Similares resultados se obtienen en los gráficos ADRS, para el desarrollado con 3 pares de registros se observa que los cortes basales y desplazamientos alcanzan valores máximos de $\frac{V_S}{W_S} = 0.15$ y $\Delta = 159 \text{ mm}$. Los gráficos de sensibilidad para periodos de 3 y 4 seg muestran que a mayores valores de resistencia característica los desplazamientos disminuyen y los cortes basales aumentan. Para periodos post fluencia mayores a 4 seg, en general, los desplazamientos aumentan al incrementarse la resistencia característica. La Figura 7.3 muestra la transición de este cambio al aumentar de $T_2 = 4 \text{ seg}$ a $T_2 = 5 \text{ seg}$, esta variación también se observa en la Figura 7.4 y Figura 7.5. La Tabla 7.1 muestra los valores de desplazamiento y corte basal para cada valor de resistencia característica, en función del número de registros sísmicos considerado en el análisis de sensibilidad efectuado para cada periodo post-fluencia.

Tabla 7.1 Valores promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (V_S/W_S) en función del número de registros sísmicos, para todos los valores de Q_d y T_2 .

		Resistencia Característica (% de W_S)												
		Desplazamiento (mm)						Corte Basal (V_S/W_S)						
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
Periodo (seg)	21 registros	2	138	127	120	113	108	105	0.151	0.145	0.141	0.140	0.141	0.142
		3	128	121	117	113	111	108	0.074	0.075	0.078	0.081	0.085	0.089
		4	121	115	115	116	116	116	0.047	0.051	0.056	0.061	0.066	0.071
		5	121	121	121	122	123	125	0.037	0.042	0.047	0.052	0.057	0.063
		6	128	131	133	132	133	135	0.033	0.038	0.043	0.048	0.053	0.058
		7	135	140	142	143	143	145	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055
	7 registros	2	130	121	112	107	103	99	0.141	0.135	0.132	0.132	0.133	0.134
		3	126	120	116	111	107	105	0.075	0.076	0.079	0.082	0.085	0.090
		4	128	124	125	125	125	124	0.049	0.053	0.058	0.063	0.067	0.072
		5	121	121	120	121	126	130	0.038	0.043	0.048	0.053	0.059	0.064
		6	128	128	123	120	121	125	0.033	0.038	0.043	0.047	0.052	0.057
		7	132	133	133	134	138	139	0.030	0.034	0.039	0.044	0.049	0.054
	3 registros	2	146	136	127	121	115	110	0.152	0.140	0.137	0.136	0.134	0.135
		3	147	139	132	125	117	110	0.084	0.086	0.088	0.090	0.092	0.094
		4	159	152	147	142	137	134	0.055	0.059	0.063	0.066	0.070	0.075
		5	136	137	134	134	136	138	0.041	0.046	0.050	0.055	0.060	0.065
		6	145	140	132	126	127	133	0.034	0.039	0.043	0.048	0.053	0.058
		7	151	151	147	149	154	156	0.031	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055

Se puede observar que el valor máximo de desplazamiento $\Delta = 159$ mm es obtenido para un periodo post-fluencia $T_2 = 4$ seg y resistencia característica $Q_d = 2.0\%$ de W_S . Anteriormente se menciona que para los periodos bajos $T_2 = 2, 3$ y 4 seg los máximos desplazamientos se observan a bajas resistencias características. Al aumentar el valor de T_2 , los valores máximos de desplazamientos se observan a altos valores de Q_d . Por ejemplo, los resultados del gráfico ADRS que utiliza 21 pares de registros sísmicos para $T_2 = 3$ seg y $Q_d = 2\%$ de W_S son de 128 mm para el desplazamiento, mientras que para $Q_d = 4.5\%$ de W_S el desplazamiento es de 108 mm. Los resultados son diferentes al variar $T_2 = 5$ seg, donde el desplazamiento para $Q_d = 2\%$ de W_S es de 121 mm, mientras que para $Q_d = 4.5\%$ de W_S es de 125 mm. Para los cortes basales la tendencia es monótonica. Los máximos valores de corte basal se obtienen para los valores altos de resistencia característica para cada valor de periodo post fluencia (a excepción de $T_2 = 2$ seg), mientras que al aumentar el periodo post-fluencia los cortes basales disminuyen.

La Tabla 7.2 muestra los valores de desviación estándar para cada combinación de Q_d y T_2 para los desplazamientos y cortes basales en función del número de registros sísmicos. Se observa que para los desplazamientos, la dispersión de los datos es la misma para las opciones de 7 y 3 cantidad de registros analizados en todo el rango de periodos post fluencia y resistencias características, siendo esta variación de 8 a 10 mm. La mayor dispersión está en la selección de 21 registros sísmicos con variaciones de 7 a 12 mm. Los valores de corte basal presentan una baja dispersión para los parámetros de 3 y 7 registros, mientras que para 21 registros tiene la mayor variación entre 0.006 a 0.117 W_S .

Tabla 7.2 Valores de desviación estándar de los promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (V_S/W_S) en función del número de registros sísmicos, para todos los valores de Q_d y T_2 .

		Resistencia Característica (% de W_S)												
		Desplazamiento (mm)						Corte Basal (V_S/W_S)						
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
Periodo (seg)	21 registros	2	12	11	10	9	8	8	0.117	0.103	0.093	0.085	0.079	0.074
		3	10	9	9	8	8	7	0.043	0.040	0.037	0.035	0.033	0.031
		4	10	9	9	8	8	8	0.023	0.020	0.019	0.017	0.016	0.015
		5	7	7	7	7	7	7	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
		6	7	7	7	7	7	7	0.008	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008
		7	7	7	7	7	7	7	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
		7 registros	2	9	9	8	8	8	8	0.067	0.060	0.054	0.052	0.049
	3		9	9	8	8	8	8	0.028	0.026	0.025	0.024	0.024	0.023
	4		10	9	9	9	8	8	0.015	0.014	0.012	0.011	0.012	0.013
	5		8	8	8	8	8	8	0.013	0.011	0.009	0.008	0.008	0.009
	6		8	8	8	8	8	8	0.013	0.011	0.010	0.008	0.007	0.007
	7		8	8	8	8	8	8	0.015	0.012	0.011	0.009	0.007	0.007
	3 registros		2	9	8	8	8	8	8	0.058	0.050	0.046	0.043	0.040
		3	8	8	8	8	8	8	0.026	0.024	0.024	0.022	0.021	0.020
		4	9	9	8	8	8	8	0.014	0.012	0.011	0.011	0.011	0.012
		5	8	8	8	8	8	8	0.010	0.009	0.008	0.008	0.008	0.008
		6	8	8	8	8	8	8	0.011	0.009	0.008	0.007	0.007	0.007
		7	8	8	8	8	8	8	0.011	0.010	0.009	0.007	0.007	0.007

La Tabla 7.3 muestra los desplazamientos y cortes basales en función de la selección de registros sísmicos. En la tabla se comparan los resultados obtenidos al seleccionar 21 registros sísmicos de manera aleatoria o por su Intensidad de Arias. Los registros seleccionados aleatoriamente muestran los máximos desplazamientos y cortes basales. Sin embargo, se observan dos tendencias diferentes para los valores de desplazamiento. Para los periodos post-fluencia $T_2 = 2, 3$ y 4 seg, a medida que aumenta la resistencia característica, los desplazamientos disminuyen, mientras que para los periodos $T_2 = 5, 6$ y 7 seg, estos valores aumentan. Los desplazamientos

se encuentran entre 105 y 166 mm. Los cortes basales exhiben una tendencia monótona creciente, aumentando a medida que aumentan los valores de T_2 y Q_d (a excepción de $T_2 = 2$ seg). Los cortes basales se observan en el rango entre 0.031 y 0.151 W_S .

Tabla 7.3 Valores promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (V_S/W_S) en función de la selección de registros sísmicos, para todos los valores de Q_d y T_2 .

		Resistencia Característica (% de W_S)												
		Desplazamiento (mm)						Corte Basal (V_S/W_S)						
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
Periodo (seg)	IA	2	138	127	120	113	108	105	0.151	0.145	0.141	0.140	0.141	0.142
		3	128	121	117	113	111	108	0.074	0.075	0.078	0.081	0.085	0.089
		4	121	115	115	116	116	116	0.047	0.051	0.056	0.061	0.066	0.071
		5	121	121	121	122	123	125	0.037	0.042	0.047	0.052	0.057	0.063
		6	128	131	133	132	133	135	0.033	0.038	0.043	0.048	0.053	0.058
		7	135	140	142	143	143	145	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055
		Aleatorio	2	166	153	142	133	127	122	0.178	0.170	0.164	0.160	0.159
	3		155	144	136	130	126	124	0.086	0.086	0.087	0.090	0.093	0.096
	4		155	144	137	134	131	131	0.055	0.058	0.061	0.065	0.069	0.074
	5		136	136	135	135	136	137	0.041	0.045	0.050	0.055	0.059	0.064
	6		138	139	140	143	144	145	0.035	0.039	0.044	0.048	0.053	0.057
	7		145	149	150	151	152	153	0.031	0.036	0.040	0.044	0.048	0.052

La Tabla 7.4 muestra los valores de desviación estándar para el criterio de selección de registros sísmicos. La mayor dispersión de desplazamientos y cortes basales se observa para los registros seleccionados aleatoriamente. La desviación estándar de los resultados de desplazamiento para cada parámetro varía de 7 a 20 mm en el rango de T_2 y Q_d , mientras que para el corte basal, la desviación estándar de los resultados es menor a medida que disminuyen T_2 y Q_d .

Tabla 7.4 Valores de desviación estándar de los promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (V_S/W_S) en función de la Selección de registros sísmicos, para todos los valores de Q_d y T_2 .

		Resistencia Característica (% de W_S)												
		Desplazamiento (mm)						Corte Basal (V_S/W_S)						
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
Periodo (seg)	IA	2	12	11	10	9	8	8	0.117	0.103	0.093	0.085	0.079	0.074
		3	10	9	9	8	8	7	0.043	0.040	0.037	0.035	0.033	0.031
		4	10	9	9	8	8	8	0.023	0.020	0.019	0.017	0.016	0.015
		5	7	7	7	7	7	7	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
		6	7	7	7	7	7	7	0.008	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008
		7	7	7	7	7	7	7	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
		Aleatorio	2	18	17	15	14	13	13	0.175	0.160	0.145	0.132	0.123
	3		16	15	14	13	13	12	0.071	0.067	0.063	0.060	0.057	0.055
	4		20	18	16	15	14	14	0.044	0.039	0.035	0.032	0.030	0.030
	5		13	12	11	11	11	11	0.019	0.018	0.018	0.018	0.018	0.019
	6		11	11	11	11	11	11	0.013	0.013	0.013	0.014	0.015	0.016
	7		11	11	12	12	12	12	0.009	0.010	0.011	0.012	0.013	0.015

La Figura 7.6 y Figura 7.7 muestran los gráficos ADRS para los registros seleccionados a partir de su Intensidad de Arias o aleatoriamente respectivamente.

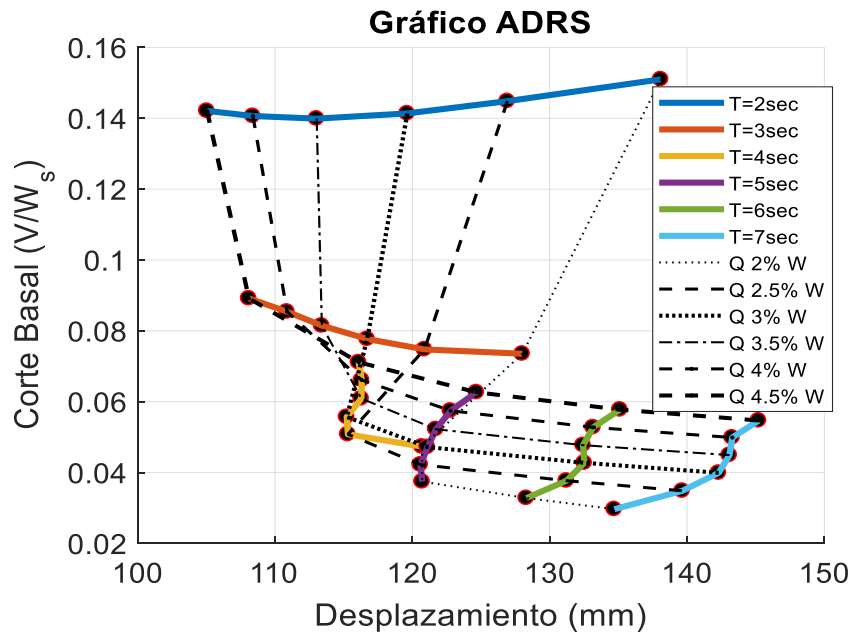


Figura 7.6 Gráfico ADRS para los registros seleccionados por Intensidad de Arias

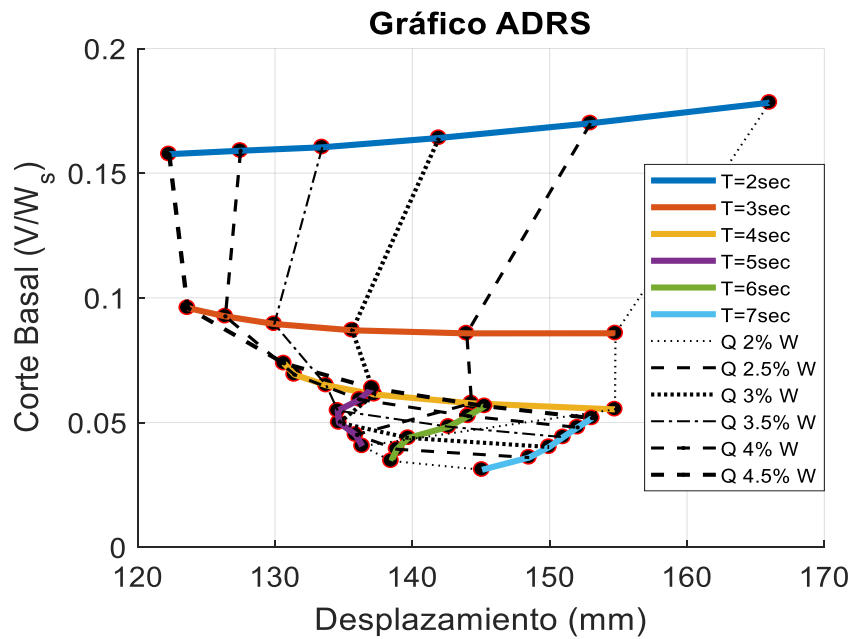


Figura 7.7 Gráfico ADRS para los registros seleccionados aleatoriamente.

En la Tabla 7.5 se observan los desplazamientos y cortes basales en función del modelo histerético. Para este parámetro los resultados son aproximadamente similares, tanto los valores de desplazamiento como los de corte basal en los dos parámetros analizados para el rango de T_2 y Q_d . Los desplazamientos varían entre 165 y 241 mm y los cortes basales entre 0.037 y 0.249 W_s .

Tabla 7.5 Valores promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (V_s/W_s) en función del modelo histerético, para todos los valores de Q_d y T_2 .

		Resistencia Característica (% de W_s)												
		Desplazamiento (mm)						Corte Basal (V_s/W_s)						
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
Periodo (seg)	Bi-Linear	2	241	221	205	191	181	173	0.249	0.234	0.223	0.214	0.209	0.205
		3	218	199	186	178	170	165	0.112	0.106	0.105	0.106	0.109	0.112
		4	200	187	181	177	174	171	0.068	0.070	0.073	0.077	0.081	0.086
		5	204	194	190	188	187	187	0.050	0.054	0.058	0.063	0.067	0.072
		6	216	211	207	205	206	207	0.043	0.047	0.051	0.056	0.061	0.066
		7	225	222	219	220	221	221	0.037	0.041	0.046	0.051	0.056	0.061
		Bouc-Wen	2	241	221	205	191	181	173	0.250	0.235	0.223	0.214	0.209
	3		219	200	187	178	171	165	0.112	0.107	0.105	0.106	0.109	0.112
	4		200	188	181	177	174	171	0.068	0.070	0.073	0.077	0.081	0.086
	5		204	194	189	187	185	186	0.050	0.054	0.058	0.063	0.067	0.072
	6		215	209	205	202	201	201	0.042	0.046	0.051	0.055	0.060	0.065
	7		223	220	216	215	214	213	0.037	0.041	0.046	0.050	0.055	0.060

La Tabla 7.6 muestra que la dispersión en los resultados tanto de desplazamientos como cortes

basales es mayor para el parámetro de Bouc-Wen. Se observa que para los dos parámetros los valores de desplazamientos y cortes basales aumentan a medida que disminuye Q_d y aumenta T_2 .

Tabla 7.6 Valores de desviación estándar de los promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (V_S/W_S) en función del modelo histerético, para todos los valores de Q_d y

		Resistencia Característica (% de W_S)												
		Desplazamiento (mm)						Corte Basal (V_S/W_S)						
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
Periodo (seg)	Bi-Linear	2	15	15	14	14	13	13	0.143	0.137	0.130	0.122	0.115	0.107
		3	15	14	13	12	12	11	0.060	0.055	0.053	0.051	0.049	0.047
		4	14	13	12	11	11	10	0.035	0.033	0.031	0.029	0.028	0.026
		5	14	13	12	12	11	11	0.022	0.021	0.019	0.018	0.018	0.017
		6	15	14	13	12	11	11	0.017	0.015	0.014	0.014	0.013	0.012
		7	16	14	13	12	11	11	0.013	0.012	0.011	0.011	0.010	0.010
		Bouc-Wen	2	68	53	43	36	30	26	0.163	0.151	0.135	0.122	0.111
	3		30	22	17	14	12	10	0.061	0.067	0.063	0.060	0.057	0.055
	4		15	12	9	7	6	5	0.034	0.039	0.045	0.035	0.030	0.029
	5		10	8	6	5	4	4	0.019	0.018	0.018	0.018	0.017	0.019
	6		8	6	4	3	3	2	0.013	0.014	0.013	0.015	0.015	0.015
	7		6	4	3	3	2	2	0.009	0.010	0.010	0.012	0.012	0.014

La Figura 7.8 y Figura 7.9 muestran los gráficos ADRS en función del modelo histerético Bi-lineal y Bouc-Wen respectivamente.

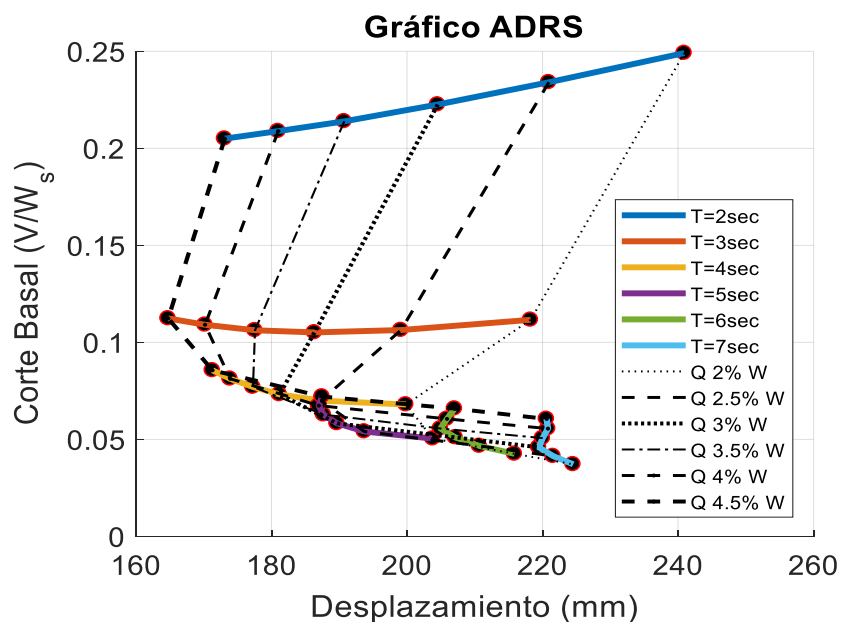


Figura 7.8 Gráfico ADRS para el modelo histerético Bi-lineal.

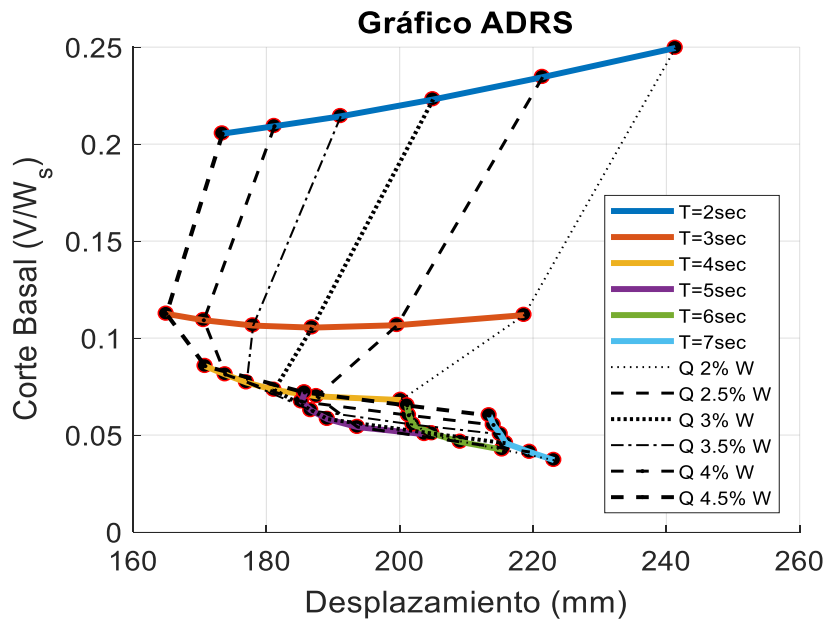


Figura 7.9 Gráfico ADRS para el modelo histerético Bouc-Wen.

La Tabla 7.7 muestra una comparación de los resultados en función del método de escalamiento, para los métodos de factor de escala constante (FS), escalamiento en el dominio del tiempo (TD) y el dominio de la frecuencia (FD). El parámetro de escalamiento por factor de escala es el que presenta los menores valores de desplazamiento y corte basal, mientras que el parámetro de escalamiento en el dominio del tiempo muestra los resultados máximos para desplazamientos y cortes basales. Se observan dos tendencias diferentes para los valores de desplazamiento. Para los periodos post-fluencia $T_2 = 2, 3$ y 4 seg, a medida que aumenta la resistencia característica, los valores de desplazamiento disminuyen, mientras que para los periodos $T_2 = 5, 6$ y 7 estos valores aumentan al aumentar Q_d .

Tabla 7.7 Valores promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (V_S/W_S) en función del método de escalamiento, para todos los valores de Q_d y T_2 .

		Resistencia Característica (% de W_s)												
		Desplazamiento (mm)						Corte Basal (V_S/W_S)						
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
Periodo (seg)	FS	2	138	127	120	113	108	105	0.151	0.145	0.141	0.140	0.141	0.142
		3	128	121	117	113	111	108	0.074	0.075	0.078	0.081	0.085	0.089
		4	121	115	115	116	116	116	0.047	0.051	0.056	0.061	0.066	0.071
		5	121	121	121	122	123	125	0.037	0.042	0.047	0.052	0.057	0.063
		6	128	131	133	132	133	135	0.033	0.038	0.043	0.048	0.053	0.058
		7	135	140	142	143	143	145	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055
	TD	2	241	221	205	191	181	173	0.249	0.234	0.223	0.214	0.209	0.205
		3	218	199	186	178	170	165	0.112	0.106	0.105	0.106	0.109	0.112
		4	200	187	181	177	174	171	0.068	0.070	0.073	0.077	0.081	0.086
		5	204	194	190	188	187	187	0.050	0.054	0.058	0.063	0.067	0.072
		6	216	211	207	205	206	207	0.043	0.047	0.051	0.056	0.061	0.066
		7	225	222	219	220	221	221	0.037	0.041	0.046	0.051	0.056	0.061
	FD	2	208	191	177	166	160	154	0.213	0.200	0.192	0.188	0.186	0.184
		3	204	184	171	161	155	151	0.108	0.104	0.103	0.104	0.105	0.107
		4	181	172	165	161	161	162	0.062	0.065	0.068	0.072	0.076	0.081
		5	178	178	177	176	176	178	0.046	0.051	0.055	0.060	0.065	0.070
		6	185	188	190	190	192	193	0.039	0.044	0.049	0.054	0.059	0.064
		7	193	199	204	206	205	209	0.034	0.039	0.045	0.050	0.055	0.060

La Tabla 7.8 muestra la dispersión entre los métodos de escalamiento. Se observa que los desplazamientos y cortes basales para el método de escalamiento en el dominio del tiempo presentan la mayor desviación en los resultados, mientras que el escalamiento en el dominio de la frecuencia presenta los menores valores de desviación. Para los desplazamientos y cortes basales, la dispersión de los resultados tiende a ser igual en los parámetros de FS y FD para los valores de $T_2 = 5, 6$ y 7 seg.

Tabla 7.8 Valores de desviación estándar de los promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (V_s/W_s) en función del método de escalamiento, para todos los valores de Q_d y T_2 .

		Resistencia Característica (% de W_s)												
		Desplazamiento (mm)						Corte Basal (V_s/W_s)						
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
Periodo (seg)	FS	2	12	11	10	9	8	8	0.117	0.103	0.093	0.085	0.079	0.074
		3	10	9	9	8	8	7	0.043	0.040	0.037	0.035	0.033	0.031
		4	10	9	9	8	8	8	0.023	0.020	0.019	0.017	0.016	0.015
		5	7	7	7	7	7	7	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
		6	7	7	7	7	7	7	0.008	0.007	0.007	0.007	0.008	0.008
		7	7	7	7	7	7	7	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
		TD	2	23	22	20	18	17	16	0.231	0.213	0.195	0.177	0.163
	3		20	18	16	15	14	13	0.086	0.073	0.065	0.059	0.056	0.054
	4		16	14	14	13	12	12	0.041	0.037	0.035	0.033	0.031	0.029
	5		17	15	13	12	12	11	0.025	0.023	0.021	0.020	0.019	0.018
	6		17	15	14	13	12	11	0.019	0.017	0.016	0.015	0.014	0.013
	7		17	16	14	13	12	11	0.014	0.013	0.012	0.012	0.011	0.010
	FD		2	4	4	4	4	4	4	0.043	0.043	0.042	0.041	0.040
		3	4	4	4	4	4	4	0.020	0.020	0.019	0.019	0.019	0.019
		4	4	3	4	4	4	4	0.009	0.008	0.008	0.009	0.009	0.009
		5	4	3	3	3	4	4	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.007
		6	4	4	3	3	3	3	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
		7	4	3	3	3	4	3	0.004	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004

La Figura 7.10, Figura 7.11 y Figura 7.12 muestran los gráficos ADRS para los métodos de escalamiento por factor de escala constante, escalamiento en el dominio del tiempo y de la frecuencia respectivamente.

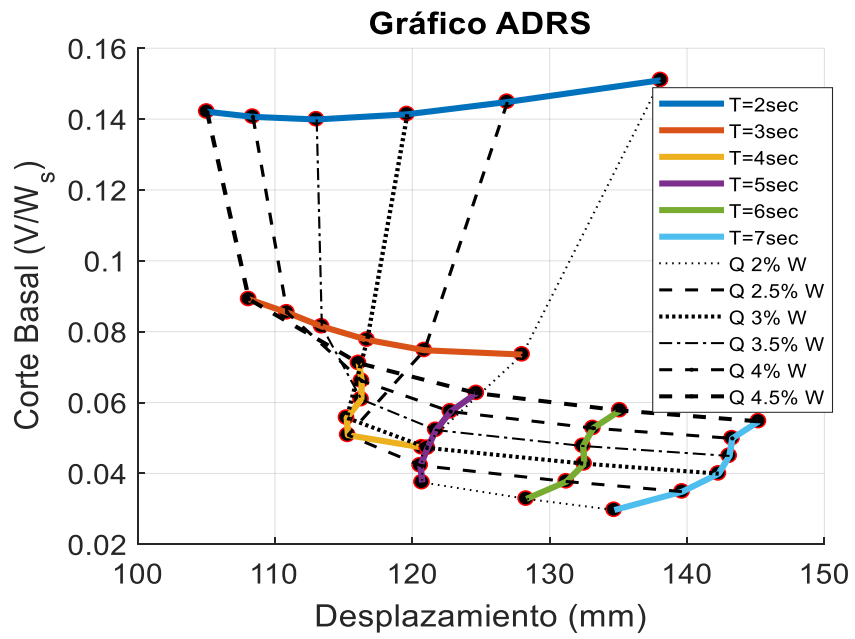


Figura 7.10 Gráfico ADRS para el método de escalamiento escalar.

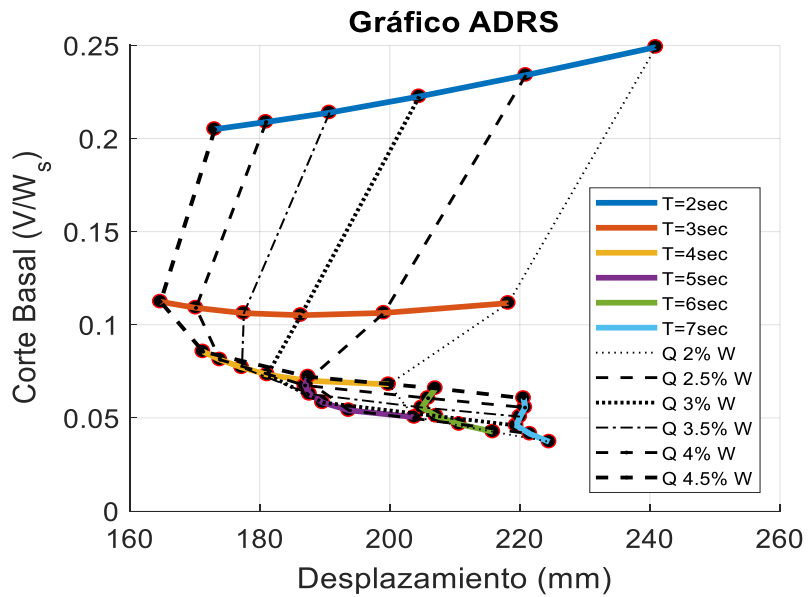


Figura 7.11 Gráfico ADRS para el método de escalamiento en el dominio del tiempo.

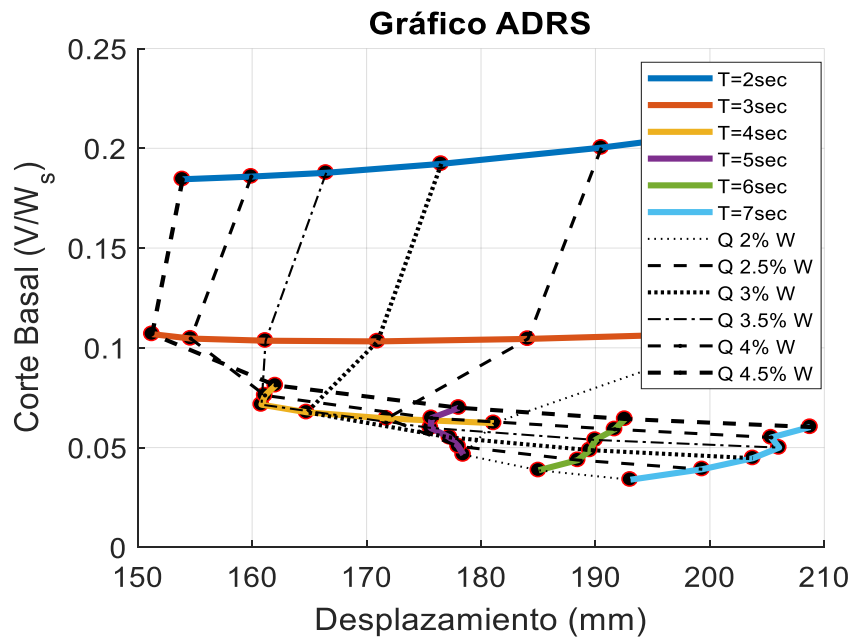


Figura 7.12 Gráfico ADRS para el método de escalamiento en el dominio de la frecuencia.

La Tabla 7.9 muestra los desplazamientos y cortes basales en función del espectro objetivo, y compara los resultados de considerar el Sismo Máximo Posible (SMP) de NCh2745 y Espectro Medio Condicional (EMC). Se observa que los desplazamientos y cortes basales son mayores para el SMP. Los desplazamientos se observan en el rango de 215 a 362 mm, mientras que los cortes basales se observan en el rango 0.045 a $0.371 W_s$. Para el EMC los desplazamientos se encuentran en el rango de 170 a 241 mm, mientras que los cortes basales se encuentran en el rango 0.037 a $0.249 W_s$. Los desplazamientos disminuyen a medida que aumenta la resistencia característica. Al observar los datos de desplazamiento con respecto al periodo post-fluencia no se aprecia una tendencia clara en los resultados. Los resultados de corte basal aumentan al disminuir los valores T_2 y aumentar Q_d .

Tabla 7.9 Valores promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (V_s/W_s) en función del espectro objetivo, para todos los valores de Q_d y T_2 .

		Resistencia Característica (% de W_s)												
		Desplazamiento (mm)						Corte Basal (V_s/W_s)						
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
Periodo (seg)	EMC	2	241	221	205	191	181	173	0.249	0.234	0.223	0.214	0.209	0.205
		3	218	199	186	178	170	165	0.112	0.106	0.105	0.106	0.109	0.112
		4	200	187	181	177	174	171	0.068	0.070	0.073	0.077	0.081	0.086
		5	204	194	190	188	187	187	0.050	0.054	0.058	0.063	0.067	0.072
		6	216	211	207	205	206	207	0.043	0.047	0.051	0.056	0.061	0.066
		7	225	222	219	220	221	221	0.037	0.041	0.046	0.051	0.056	0.061
	SMP	2	362	328	301	280	261	245	0.371	0.340	0.317	0.298	0.285	0.274
		3	281	256	240	229	221	215	0.137	0.132	0.129	0.128	0.130	0.133
		4	284	263	249	240	233	229	0.086	0.085	0.086	0.089	0.092	0.096
		5	322	292	273	261	253	248	0.068	0.068	0.070	0.072	0.076	0.080
		6	332	303	287	279	275	273	0.054	0.056	0.058	0.062	0.067	0.072
		7	331	311	301	297	296	293	0.045	0.047	0.051	0.056	0.061	0.066

En la Tabla 7.10 se observan los valores de desviación estándar en función del espectro objetivo, y se muestra que la mayor dispersión en los desplazamientos y cortes basales están en los resultados del EMC.

Tabla 7.10 Valores de desviación estándar de los promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (V_S/W_S) en función del espectro objetivo, para todos los valores de Q_d y T_2 .

		Resistencia Característica (% de W_S)												
		Desplazamiento (mm)						Corte Basal (V_S/W_S)						
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
Periodo (seg)	EMC	2	23	22	20	18	17	16	0.231	0.213	0.195	0.177	0.163	0.149
		3	20	18	16	15	14	13	0.086	0.073	0.065	0.059	0.056	0.054
		4	16	14	14	13	12	12	0.041	0.037	0.035	0.033	0.031	0.029
		5	17	15	13	12	12	11	0.025	0.023	0.021	0.020	0.019	0.018
		6	17	15	14	13	12	11	0.019	0.017	0.016	0.015	0.014	0.013
		7	17	16	14	13	12	11	0.014	0.013	0.012	0.012	0.011	0.010
		SMP	2	3	3	3	3	4	4	0.036	0.032	0.033	0.035	0.038
	3		3	3	3	3	3	3	0.015	0.014	0.015	0.016	0.016	0.016
	4		5	4	4	4	4	4	0.014	0.012	0.012	0.011	0.010	0.010
	5		12	9	7	6	5	5	0.020	0.015	0.012	0.009	0.008	0.007
	6		15	10	8	6	6	5	0.016	0.011	0.008	0.007	0.006	0.006
	7		15	10	8	7	6	6	0.011	0.008	0.006	0.005	0.005	0.004

La Figura 7.13 y Figura 7.14 muestran los gráficos ADRS para los registros sísmicos escalados al Espectro Medio Condicional y Sismo Máximo Posible respectivamente.

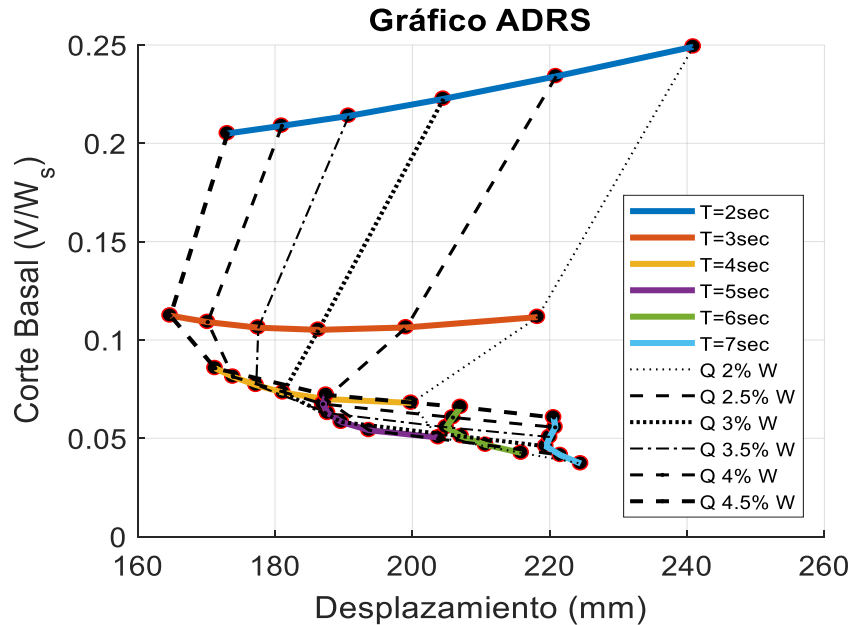


Figura 7.13 Gráfico ADRS para el Espectro Medio Condicional.

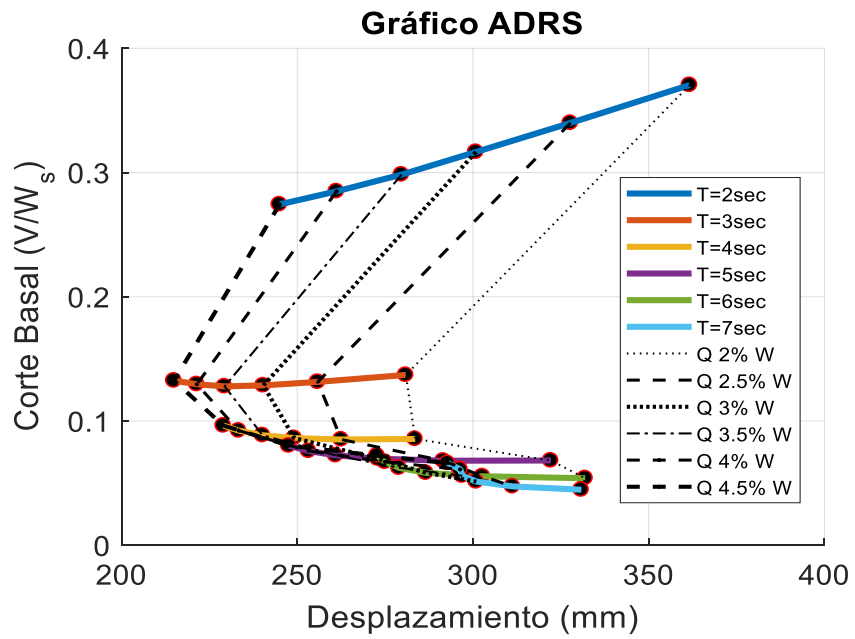


Figura 7.14 Gráfico ADRS para el Sismo Máximo Posible.

Los valores para $\alpha = 5, 10$ y 15 , que corresponde al cociente entre la rigidez inicial y post fluencia, se muestran en la Tabla 7.11. Los desplazamientos y cortes basales muestran una tendencia monótona, disminuyendo a medida que aumenta el factor α . Los desplazamientos disminuyen a medida que aumenta la resistencia característica para todos los valores de periodo post-fluencia.

Tabla 7.11 Valores promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (V_S/W_S) en función de la relación entre la rigidez inicial y post fluencia, para todos los valores de Q_d y T_2 .

		Resistencia Característica (% de W_S)												
		Desplazamiento (mm)						Corte Basal (V_S/W_S)						
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
Periodo (seg)	$\alpha = 5$	2	255	236	221	207	196	187	0.261	0.246	0.235	0.226	0.219	0.216
		3	237	219	206	198	192	187	0.119	0.114	0.113	0.113	0.114	0.116
		4	218	206	201	198	196	197	0.070	0.071	0.075	0.079	0.082	0.087
		5	227	219	215	216	217	216	0.051	0.054	0.058	0.062	0.066	0.071
		6	239	233	234	235	238	243	0.043	0.047	0.051	0.055	0.060	0.064
		7	256	257	259	261	263	268	0.037	0.042	0.047	0.051	0.056	0.060
	$\alpha = 10$	2	241	221	205	191	181	173	0.249	0.234	0.223	0.214	0.209	0.205
		3	218	199	186	178	170	165	0.112	0.106	0.105	0.106	0.109	0.112
		4	200	187	181	177	174	171	0.068	0.070	0.073	0.077	0.081	0.086
		5	204	194	190	188	187	187	0.050	0.054	0.058	0.063	0.067	0.072
		6	216	211	207	205	206	207	0.043	0.047	0.051	0.056	0.061	0.066
		7	225	222	219	220	221	221	0.037	0.041	0.046	0.051	0.056	0.061
	$\alpha = 15$	2	236	216	199	186	175	167	0.245	0.230	0.218	0.210	0.205	0.201
		3	211	192	179	170	162	156	0.109	0.104	0.103	0.105	0.108	0.111
		4	193	180	172	168	164	161	0.067	0.069	0.072	0.076	0.080	0.084
		5	198	187	182	178	177	176	0.050	0.054	0.058	0.062	0.067	0.073
		6	207	199	192	188	188	190	0.042	0.046	0.051	0.056	0.060	0.066
		7	216	210	206	204	205	208	0.037	0.042	0.046	0.051	0.056	0.062

La Tabla 7.12 muestra que la desviación estándar del parámetro α es aproximadamente igual, tanto para los desplazamientos y cortes basales. Los valores de desviación estándar del desplazamiento disminuyen al aumentar Q_d y se mantienen constantes para el rango de T_2 . Para los cortes basales la variación de los datos disminuye al aumentar los valores de T_2 y aumentan en la medida que Q_d aumenta. La Figura 7.15, Figura 7.16 y Figura 7.17 muestran los gráficos ADRS para los valores de $\alpha = 5, 10$ y 15 respectivamente.

Tabla 7.12 Valores de desviación estándar de los promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (V_S/W_S) en función de la relación entre la rigidez inicial y post fluencia, para todos los valores de Q_d y T_2 .

		Resistencia Característica (% de W_S)												
		Desplazamiento (mm)						Corte Basal (V_S/W_S)						
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
Periodo (seg)	$\alpha = 5$	2	24	23	21	20	18	17	0.239	0.223	0.207	0.191	0.176	0.164
		3	21	19	17	16	15	14	0.093	0.080	0.071	0.064	0.060	0.057
		4	18	15	14	14	13	12	0.044	0.040	0.037	0.034	0.032	0.031
		5	18	16	14	13	12	12	0.026	0.023	0.022	0.021	0.020	0.018
		6	18	16	15	14	13	12	0.020	0.018	0.016	0.015	0.014	0.013
		7	17	16	15	14	13	13	0.014	0.014	0.012	0.012	0.011	0.011
	$\alpha = 10$	2	23	22	20	18	17	16	0.231	0.213	0.195	0.177	0.163	0.149
		3	20	18	16	15	14	13	0.086	0.073	0.065	0.059	0.056	0.054
		4	16	14	14	13	12	12	0.041	0.037	0.035	0.033	0.031	0.029
		5	17	15	13	12	12	11	0.025	0.023	0.021	0.020	0.019	0.018
		6	17	15	14	13	12	11	0.019	0.017	0.016	0.015	0.014	0.013
		7	17	16	14	13	12	11	0.014	0.013	0.012	0.012	0.011	0.010
	$\alpha = 15$	2	23	21	19	18	16	15	0.229	0.210	0.191	0.173	0.158	0.145
		3	19	17	16	14	13	12	0.084	0.071	0.063	0.058	0.055	0.051
		4	16	14	13	12	12	11	0.041	0.036	0.034	0.032	0.030	0.028
		5	16	14	13	12	12	11	0.025	0.022	0.021	0.019	0.018	0.017
		6	17	15	14	12	12	11	0.018	0.017	0.015	0.014	0.013	0.013
		7	17	15	14	13	12	11	0.014	0.012	0.012	0.011	0.010	0.010

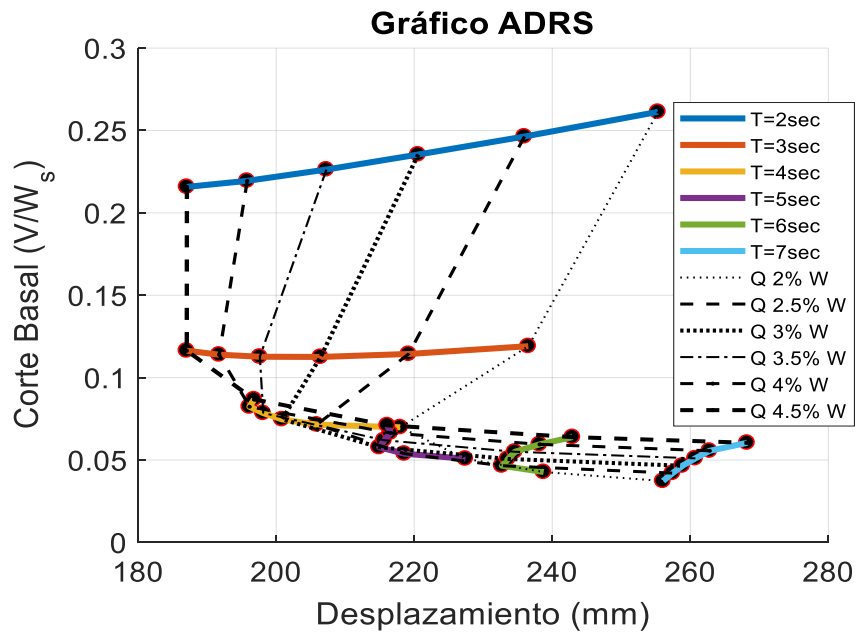


Figura 7.15 Gráfico ADRS para $\alpha = 5$.

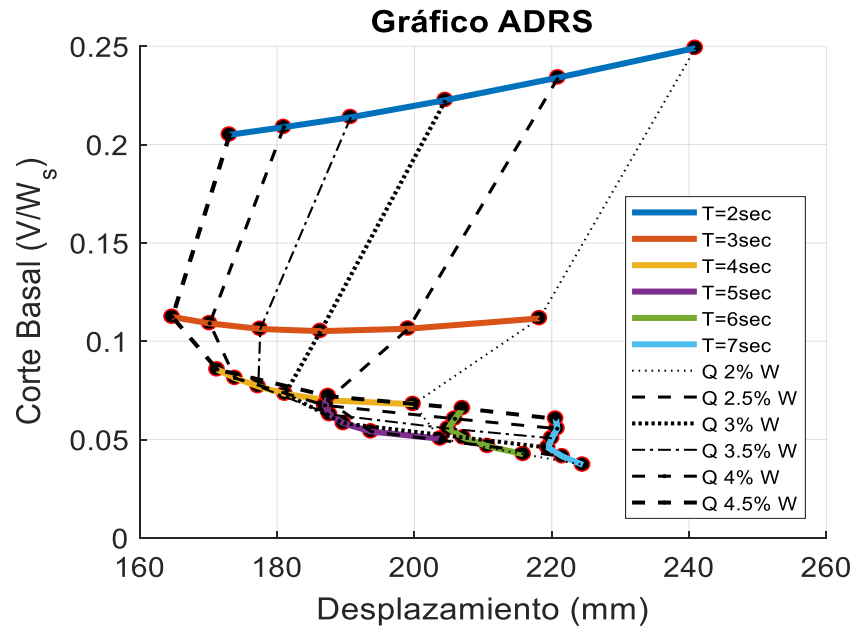


Figura 7.16 Gráfico ADRS para $\alpha = 10$.

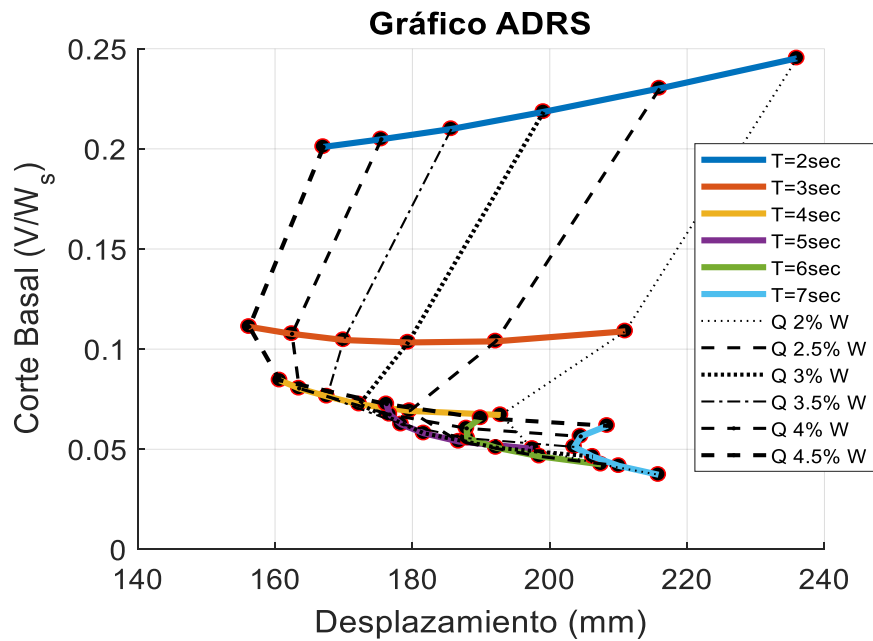


Figura 7.17 Gráfico ADRS para $\alpha = 15$.

La última variable analizada corresponde al método de integración numérico, y compara los resultados obtenidos a partir de considerar los métodos de integración de Newmark, de Hilber, Hughes y Taylor (HHT) y el método alpha generalizado. En la Tabla 7.13 se puede observar que los desplazamientos y cortes basales son similares para los métodos de integración de Newmark y HHT, mientras que los máximos valores de desplazamiento y corte basal se obtienen para el método de alpha generalizado. Se observa que los desplazamientos disminuyen al aumentar los valores de resistencia característica y los cortes basales decrecen a medida que disminuyen Q_d y T_2 .

Tabla 7.13 Valores promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (V_s/W_s) en función del método de integración numérico, para todos los valores de Q_d y T_2 .

		Resistencia Característica (% de W_s)												
		Desplazamiento (mm)						Corte Basal (V_s/W_s)						
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
Periodo (seg)	Newmark	2	241	221	205	191	181	173	0.249	0.234	0.223	0.214	0.209	0.205
		3	218	199	186	178	170	165	0.112	0.106	0.105	0.106	0.109	0.112
		4	200	187	181	177	174	171	0.068	0.070	0.073	0.077	0.081	0.086
		5	204	194	190	188	187	187	0.050	0.054	0.058	0.063	0.067	0.072
		6	216	211	207	205	206	207	0.043	0.047	0.051	0.056	0.061	0.066
		7	225	222	219	220	221	221	0.037	0.041	0.046	0.051	0.056	0.061
		HHT	2	241	221	205	191	181	173	0.249	0.234	0.223	0.214	0.209
	3		218	199	186	178	170	165	0.112	0.106	0.105	0.106	0.109	0.112
	4		200	187	181	177	174	171	0.068	0.070	0.073	0.077	0.081	0.086
	5		204	194	190	188	187	188	0.050	0.054	0.058	0.063	0.067	0.072
	6		216	211	207	205	206	207	0.043	0.047	0.051	0.056	0.061	0.066
	7		225	222	220	220	221	221	0.037	0.041	0.046	0.051	0.056	0.061
	Alpha		2	264	241	222	206	192	182	0.271	0.253	0.239	0.229	0.221
		3	227	206	191	182	175	169	0.116	0.110	0.107	0.108	0.111	0.114
		4	204	190	184	180	177	174	0.069	0.071	0.074	0.078	0.082	0.086
		5	206	196	192	190	189	190	0.051	0.054	0.059	0.063	0.068	0.072
		6	218	213	209	207	208	210	0.043	0.047	0.051	0.056	0.061	0.066
		7	226	223	222	222	223	224	0.037	0.042	0.046	0.051	0.056	0.061

Finalmente, la Tabla 7.14 muestra la desviación estándar de los resultados obtenidos al aplicar los distintos métodos de integración numérica. En la tabla se puede observar que la variación de los datos de desplazamiento que se utilizaron para comparar estos métodos es, en términos generales, similar. La mayor dispersión de desplazamientos y cortes basales se observa para los valores mínimos de resistencias características consideradas. A medida que este parámetro aumenta, la desviación estándar disminuye. La Figura 7.18, Figura 7.19 y Figura 7.20 muestran los gráficos ADRS para los metodos de integración de Newmark, HHT y alpha generalizado respectivamente.

Tabla 7.14 Valores de desviación estándar de los promedios de los máximos desplazamientos (mm) y cortes basales (V_s/W_s) en función del método de integración numérico, para todos los valores de Q_d y T_2 .

		Resistencia Característica (% de W_s)												
		Desplazamiento (mm)						Corte Basal (V_s/W_s)						
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
Periodo (seg)	Newmark	2	23	22	20	18	17	16	0.231	0.213	0.195	0.177	0.163	0.149
		3	20	18	16	15	14	13	0.086	0.073	0.065	0.059	0.056	0.054
		4	16	14	14	13	12	12	0.041	0.037	0.035	0.033	0.031	0.029
		5	17	15	13	12	12	11	0.025	0.023	0.021	0.020	0.019	0.018
		6	17	15	14	13	12	11	0.019	0.017	0.016	0.015	0.014	0.013
		7	17	16	14	13	12	11	0.014	0.013	0.012	0.012	0.011	0.010
		HHT	2	23	22	20	18	17	16	0.231	0.213	0.195	0.177	0.163
	3		20	18	16	15	14	13	0.086	0.073	0.065	0.060	0.056	0.054
	4		16	14	14	13	12	12	0.041	0.037	0.035	0.033	0.031	0.029
	5		17	15	13	12	12	11	0.025	0.023	0.021	0.020	0.019	0.018
	6		17	15	14	13	12	11	0.019	0.017	0.016	0.015	0.014	0.013
	7		17	16	14	13	12	11	0.014	0.013	0.012	0.012	0.011	0.010
	Alpha		2	28	25	23	21	19	17	0.270	0.248	0.227	0.206	0.185
		3	21	19	17	15	14	13	0.094	0.078	0.068	0.062	0.058	0.056
		4	17	15	14	13	12	12	0.043	0.038	0.035	0.033	0.032	0.030
		5	17	15	14	13	12	12	0.025	0.023	0.021	0.020	0.019	0.018
		6	17	16	14	13	12	11	0.019	0.017	0.016	0.015	0.014	0.013
		7	17	16	14	13	12	11	0.014	0.013	0.012	0.012	0.011	0.010

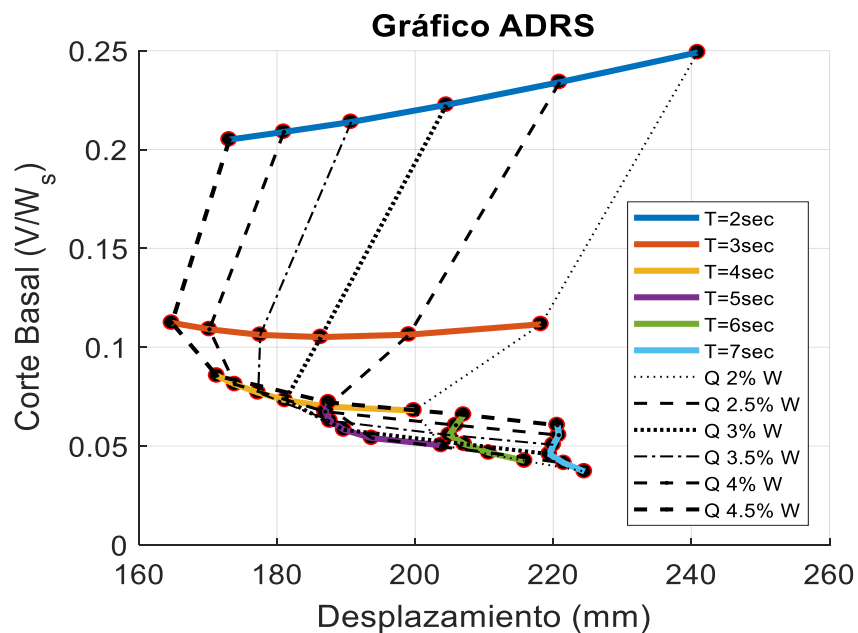


Figura 7.18 Gráfico ADRS para el método de integración de Newmark.

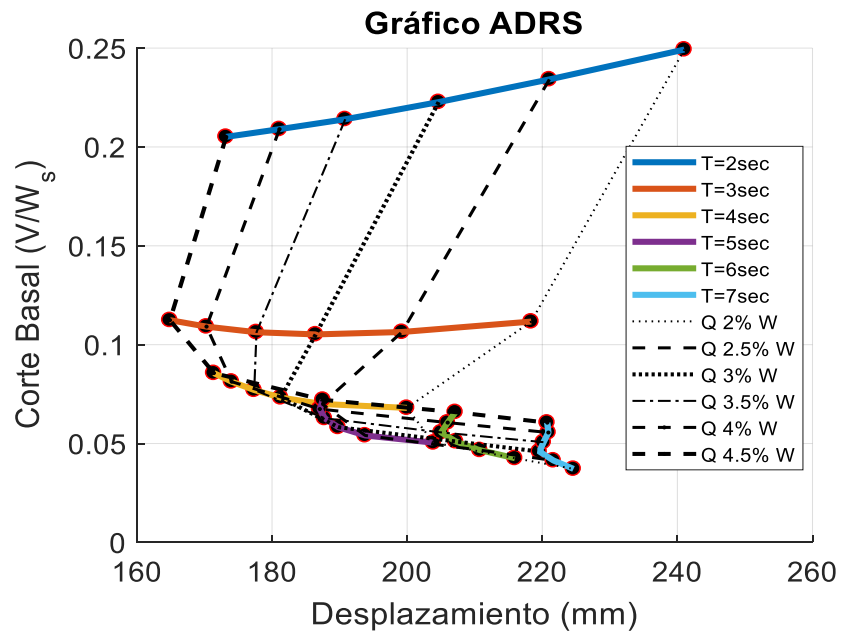


Figura 7.19 Gráfico ADRS para el método de integración de HHT.

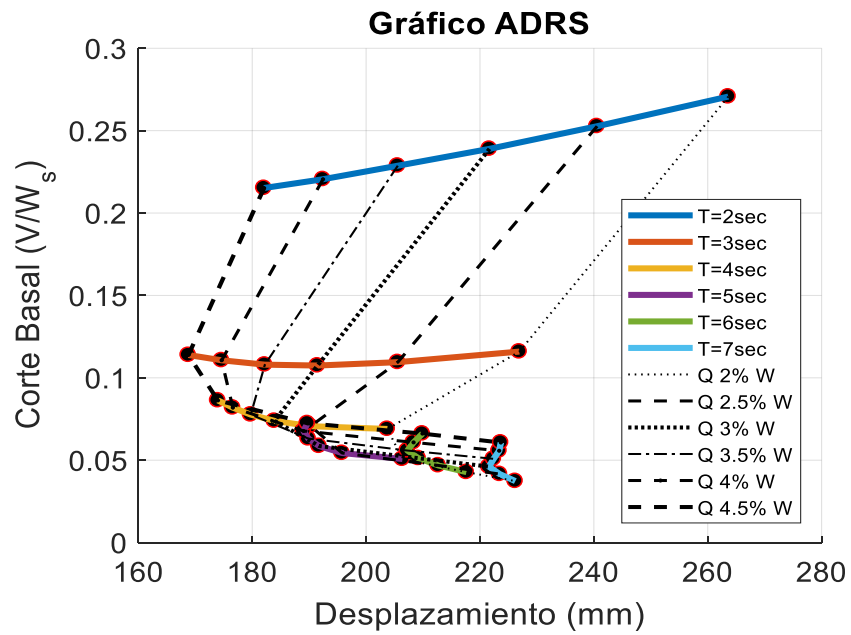


Figura 7.20 Gráfico ADRS para el método de integración alpha generalizado.

7.2. Selección de parámetros para la metodología ADRS

Para el análisis de los parámetros óptimos de la metodología ADRS, se utiliza el mismo principio aplicado en el Capítulo 4. Se seleccionan los valores de periodo post-fluencia (T_2) y resistencia característica (Q_d) que minimizan el corte basal de la estructura (V/W_s), a partir de los resultados presentados y analizados en la sección 7.1. Los parámetros seleccionados para generar el gráfico ADRS son los siguientes:

1. 21 Pares de registros de aceleraciones (excluyendo el registro de Concepción).
2. Selección de los registros sísmicos de acuerdo a su Intensidad de Arias (IA).
3. Modelo histérico utilizado Bi-lineal.
4. Método de escalamiento de los registros sísmicos en el dominio del tiempo.
5. Espectro Medio Condicional (EMC) como espectro objetivo para el escalamiento de registros sísmicos. Para zona sísmica 3 y suelo tipo B.
6. Factor $\alpha = 10$.
7. Método de integración numérico de Newmark.

Los parámetros considerados para aplicar la metodología ADRS se seleccionan por minimizar el corte basal de la estructura, con excepción del método de escalamiento de los registros sísmicos, el cual se selecciona a criterio de autor. Para aplicar la metodología se escoge el escalamiento en el dominio del tiempo debido a que utiliza la metodología wavelet para escalar los registros al espectro objetivo en todo su rango de periodos. El gráfico ADRS resultante para zona sísmica 3 y suelo tipo B según NCh2745 se muestra en Figura 7.21.

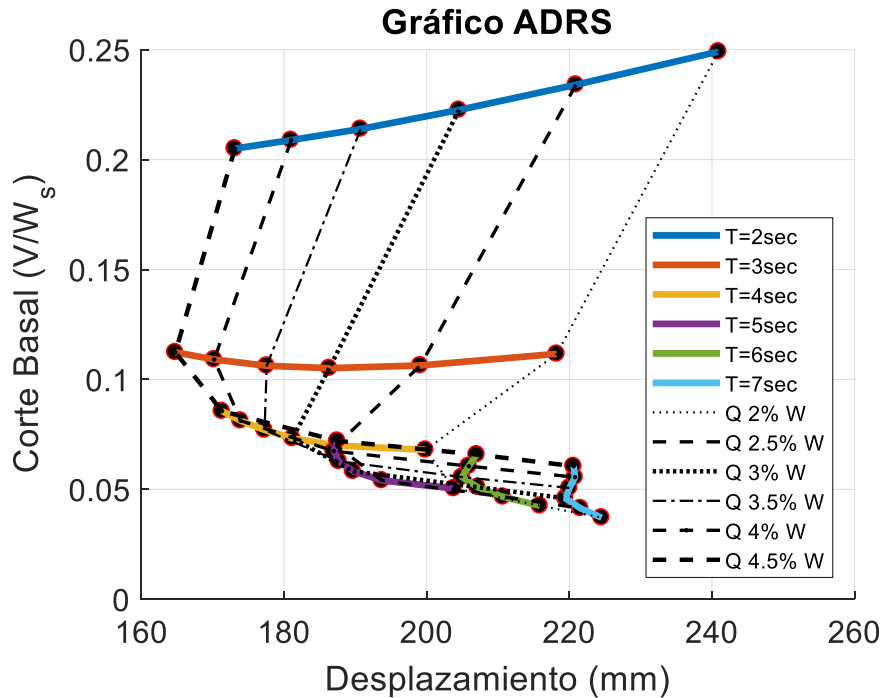


Figura 7.21 Gráfico ADRS resultante de los parámetros seleccionados.

Los gráficos ADRS resultantes de variar cada parámetro se encuentran en el Anexo E, para los registros escalados y sin escalar. También se presentan en el Anexo E los gráficos ADRS para los distintos tipos de suelos y zonas sísmicas especificadas en la norma NCh2745.

7.3. Diseño del sistema de aislamiento para los parámetros óptimos de la metodología ADRS

Para el diseño de los aisladores se realiza el análisis a partir del gráfico ADRS resultante de la sección anterior, a diferencia del análisis modal espectral empleado en el Capítulo 3. Se selecciona el periodo post fluencia a partir de la Tabla 4.3 que indica los valores máximos de periodo post fluencia para una zona sísmica 3 y tipo de suelo B, a partir de este dato se selecciona el periodo post fluencia $T_2 = 4.07$ seg. El valor de resistencia característica se selecciona de la Tabla 4.2 para el periodo post fluencia, zona sísmica y tipo de suelo descritos anteriormente, a partir de estos datos el valor de resistencia característica es $Q_d = 2.3 \%$ de W_s . Finalmente, de la Figura 7.21 se toma el valor de desplazamiento máximo $D_M = 185$ mm y un desplazamiento total máximo $D_{TM} = 204$ mm para los valores correspondientes de T_2 y Q_d . A continuación se mostrará el desarrollo del diseño y la geometría del aislador utilizando la metodología ADRS. Los datos del modelo desarrollado en el Capítulo 3 son los siguientes: peso sísmico de la estructura $W_s = 4492800$ Kgf, 28 aisladores ubicados en la base de la estructura y resistencia característica $Q_d = 4011$ Kgf/cm

Se calcula el valor de rigidez post-fluencia del sistema y del aislador (K_p)

$$K_p = \left(\frac{2\pi}{T_2}\right)^2 \frac{W_S}{g}; \quad \text{Calcular la rigidez post-fluencia del sistema}$$

$$K_p = \left(\frac{2\pi}{4.07}\right)^2 \frac{4492800}{981}; \quad \text{Reemplazar los datos de } T_2 \text{ y } W_S$$

$$\mathbf{K_p = 11298 \text{ Kgf/cm}}$$

$$\mathbf{K_{p,aislador} = 389 \text{ Kgf/cm}}$$

Calcular el valor del diámetro del núcleo de plomo (D_l) a partir del valor de resistencia característica (Q_d), a una tensión de fluencia del plomo de $F_l = 80 \text{ Kgf/cm}^2$.

$$Q_d = \left(\frac{\pi D_l^2}{4}\right) * F_l; \quad \text{Reemplazar los valores de } Q_d \text{ y } F_l$$

$$4011 = \left(\frac{\pi D_l^2}{4}\right) * 80; \quad \text{Resolver la ecuación y calcular } D_l$$

$$\mathbf{D_l \approx 8 \text{ cm}}$$

Calcular la altura de goma para un desplazamiento máximo $D_{TM} = 204 \text{ mm}$

$$H_r = \frac{D_{TM}}{1.5}; \quad \text{Reemplazar el valores de } D_{TM}.$$

$$\mathbf{H_r = 13.6 \text{ cm}}$$

Calcular el número de láminas de goma para una altura de goma de $H_r = 13.6 \text{ cm}$ y un espesor de lámina de 0.8 cm .

$$\#lam \text{ goma} = \frac{H_r}{0.8}; \quad \text{Reemplazar el valores de } H_r.$$

$$\mathbf{\# lam \text{ goma} = 17}$$

Calcular el área necesaria de goma a partir del módulo de corte de la goma $G_r = 4 \text{ Kgf/cm}^2$, la altura de goma y la rigidez post-fluencia:

$$A_r = \frac{K_p * H_r}{4}; \quad \text{Reemplazar el valores de } H_r \text{ y } K_p.$$

$$\mathbf{A_r = 1322 \text{ cm}}$$

Calcular el diámetro de la goma a partir del área de la goma A_r y el diámetro del núcleo de plomo D_l .

$$D_r = \sqrt{\frac{A_r \cdot 4}{\pi} + D_l^2}; \quad \text{Reemplazar el valores de } A_r \text{ y } D_l.$$

$$D_r \approx 45 \text{ cm}$$

Se realiza la verificación del aislador y para los parámetros descritos anteriormente, no cumple el requisito de tensión de compresión del aislador máxima por lo que se debe aumentar el diámetro de goma D_r . Un diseño óptimo debe cumplir los requisitos de estabilidad, resistencia y deformación del aislador, por lo que, para este diseño se deberá ajustar la geometría establecida anteriormente. La Tabla 7.15 muestra las propiedades y geometría del aislador para la segunda iteración y los parámetros actualizados.

Tabla 7.15 Propiedades y Geometría del aislador

Tensión de fluencia del plomo	Fl	80	kgf/cm ²
Tensión de compresión máxima admisible en el aislador	$\sigma_{c,max}$	150	Kgf/cm ²
Módulo de compresibilidad	K	20000	Kgf/cm ²
Elongación de ruptura de la goma	ϵ_u	6	cm/cm
Módulo de corte de la goma	G_r	4	Kgf/cm ²
Diámetro externo del aislador	D_r	60	cm
Diámetro interno	D_l	8	cm
Numero de láminas de goma	#lam goma	25	unid
Espesor de láminas de goma	t_r	0.8	cm
Espesor de placas de acero	t_s	0.3	cm
Altura de goma en el aislador	H_r	20	cm
Altura total del aislador	H_t	27.2	cm
Parámetros del aislador			
Sección del Núcleo de plomo	A_l	50.27	cm ²
Resistencia característica	Q_d	4021	Kgf
Área de goma	A_r	2777	cm ²
Rigidez post-fluencia	K_p	555	Kgf/cm
Rigidez inicial y restitutiva del dispositivo	K_u	5554	Kgf/cm
Deformación de fluencia	Δy	0.80	cm
Fuerza de fluencia	F_y	446	Kgf
Deformación máxima	Δ_{max}	30	cm

A partir de los parámetros del aislador, se determinan las propiedades efectivas que serán consideradas en el análisis lineal del modelo desarrollado en el programa de análisis estructural Etabs 14. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7.16 donde la rigidez efectiva (K_{eff}) por aislador es de 772.8 Kgf/cm, el periodo efectivo es de 2.89 seg y el amortiguamiento calculado es de 17.1%.

Tabla 7.16 Propiedades efectivas para el análisis lineal

Rigidez efectiva	K_{effM}	772.8	Kgf/cm
Energía disipada en un ciclo	EDC_M	2.85	Tonf.m
Amortiguamiento calculado	β_M	17.1	%
Periodo efectivo de diseño	T_{effM}	2.89	seg

Finalmente se comparan los resultados de desplazamiento total máximo $D_{TM} = 14.5$ cm obtenido del análisis modal espectral y se verifica que sea menor al desplazamiento total máximo entregado por el gráfico ADRS. Adicional se verifica el valor de la carga axial a corto plazo $P_{U,LP.} = 383.5$ Tonf entregada por el modelo y se verifica la estabilidad y propiedades del aislador cumpliendo con todos los requisitos normativos respectivos. La Tabla 7.17 muestra un resumen de esta verificación para las propiedades del aislador seleccionadas.

Tabla 7.17 Verificación del aislador

Tensión de compresión en el aislador	$\sigma_c = P_{U,LP}/A_r \leq 150$	σ_c	147	Kgf/cm ²
Factor de forma del aislador anular	$S = (d_e - d_i)/2t_r \geq 10$	S	33	cm/cm
Módulo de compresión	$1/E_c = 1/(4GS2) + 4/(3K)$	E_c	7946	Kgf/cm ²
Rigidez vertical del aislador	$K_v = E_c A_r / H_r$	K_v	1103467	Kgf/cm
Frecuencia vertical	$f_v = 1/2\pi \cdot (K_v g / W_s)^{1/2} \geq 10$ Hz	f_v	13	Hz
Tensión de fluencia en placas de acero		σ_y	2530	Kgf/cm ²
Tensión Admisible en Placas de Acero	$\sigma_{adm} = 0.75 \cdot \sigma_y$	σ_{adm}	1898	Kgf/cm ²
Tensión en el acero	$\sigma_s = 1.5 \cdot t_r / t_s \cdot \sigma_c \leq \sigma_{adm}$	σ_s	589	Kgf/cm ²
Capacidad de Restitución Mínima	$\Delta_{DTM} \geq W_s / 40 + F0.5DT \equiv k_d \geq W_s / (20 \cdot \Delta_{DTM})$	K_d	555	Kgf/cm
	$k_d \geq W_s / (20 \cdot \Delta_{DTM})$	$W / (20 \cdot \Delta_{DTM})$	394	Kgf/cm
Área efectiva de compresión (sombra proyectada)		A_{eff}	1580	cm ²
(Interacción Corte - Compresión)	$\gamma_{so} = D/H_r$	γ_{so}	1.0	cm/cm
	$\epsilon_c = P_{U,CP} / A_{eff} / (6GS2)$	ϵ_c	0.01	cm/cm
	$\gamma_{co} = 6 \cdot S \cdot \epsilon_c$	γ_{co}	1.0	cm/cm
	$\gamma_0 = \gamma_{so} + \gamma_{co}$	γ_0	2.0	cm/cm
	$F.S. = 0.85 \cdot \epsilon_u / \gamma_0 \geq 1.5$	F.S.	2.6	

Una vez realizadas todas las verificaciones correspondientes al aislador, se puede dar por finalizado su análisis obteniendo las características finales del aislador:

- Diámetro exterior igual a 60 cm y diámetro interior de plomo de 8 cm.
- Altura total igual a 27.2 cm, de los cuales 20 cm corresponden a goma (25 capas de 8 mm) y 7.2 cm de acero (24 láminas de 3 mm).
- Módulo de corte de 4 Kg/cm².
- Resistencia característica, Q_d , de 4021 Kgf.
- Fuerza de fluencia de 4468 Kgf.
- Rigidez post-fluencia igual a 555 Kgf/cm y una rigidez inicial igual a 5554 Kgf/cm, equivalente a 10 veces la rigidez post-fluencia.

La Figura 7.22 presenta un esquema del aislador a partir de las características definidas en el diseño, donde la reducción en el volumen tanto de la goma como el núcleo de plomo es de un 53%.

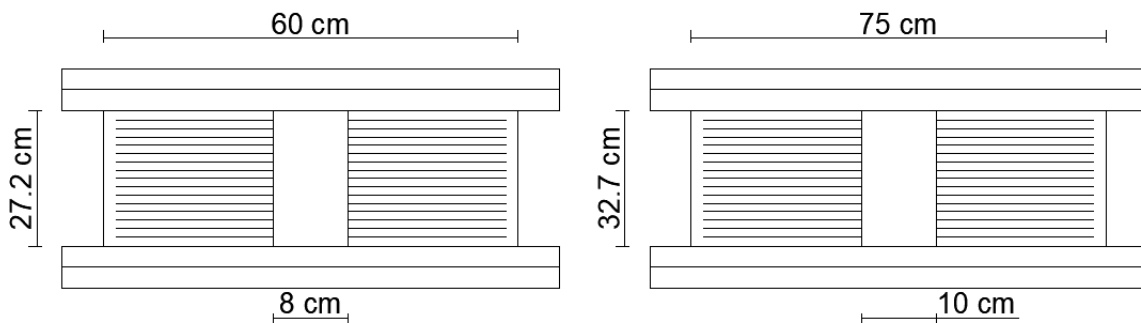


Figura 7.22 Izquierda: Dimensiones de aislador diseñado mediante metodología ADRS.
Derecha: Dimensiones de aislador diseñado mediante método convencional.

7.4. Análisis de desempeño

En la presente sección se utiliza el procedimiento descrito en el Capítulo 3 para el análisis del desempeño sísmico de la estructura aislada diseñada mediante la metodología ADRS. El análisis no lineal de respuesta en el tiempo se realiza utilizando el software académico Opensees y se utilizan los mismos registros de aceleraciones que analizaron el desempeño de la estructura de base fija y la estructura aislada (diseñada mediante el método convencional). A continuación se presenta el desempeño de la estructura aislada (metodología ADRS) a partir de gráficos que describen las aceleraciones máximas, desplazamientos máximos y derivas de entre piso para cada uno de los tres registros sísmicos descritos con anterioridad.

La Figura 7.23 muestra la diferencia de aceleraciones máximas, donde las aceleraciones para la estructura aislada diseñada mediante el método convencional se encuentran en rango máximo de 0.2-0.33 (g) siendo estas mayores que las de la estructura aislada diseñada por la metodología ADRS, las cuales se encuentran en un rango de 0.18-0.30 (g). El registro que muestra la mayor aceleración para ambos sistemas es el registro de México.

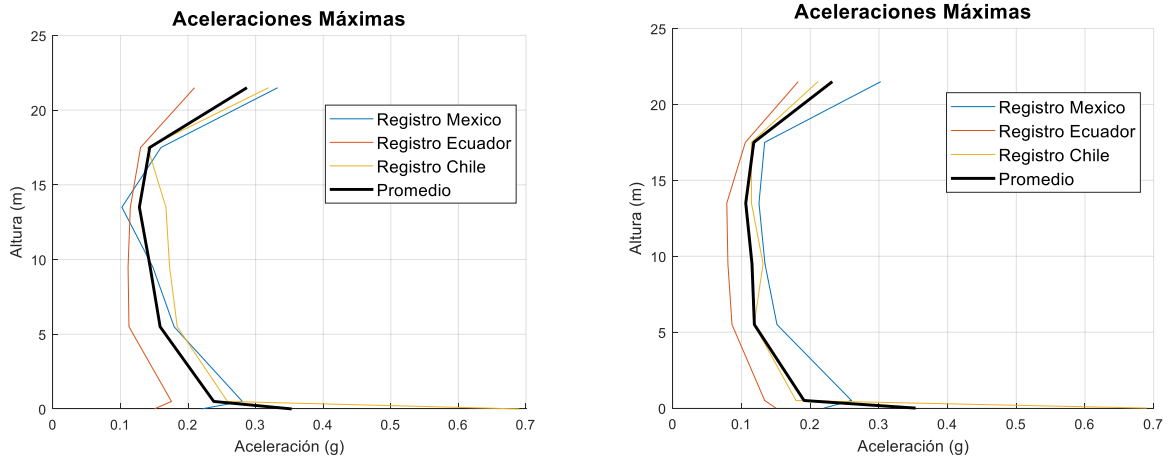


Figura 7.23 Izquierda: Aceleraciones máximas para la estructura aislada (método convencional). Derecha: Aceleraciones máximas para la estructura aislada (metodología ADRS).

La Figura 7.24 muestra los desplazamientos máximos para los dos tipos de estructuras aisladas analizadas, donde el registro de aceleraciones de Chile es el que presenta los mayores desplazamientos para ambos casos. Para el registro de Ecuador, el sistema aislado diseñada mediante el método convencional presenta un desplazamiento de base de 14 cm y un desplazamiento de techo (relativo a la base) de 5 cm y en el sistema aislada diseñada por la metodología ADRS el desplazamiento de base es de 17 cm y un desplazamiento de techo de 4 cm.

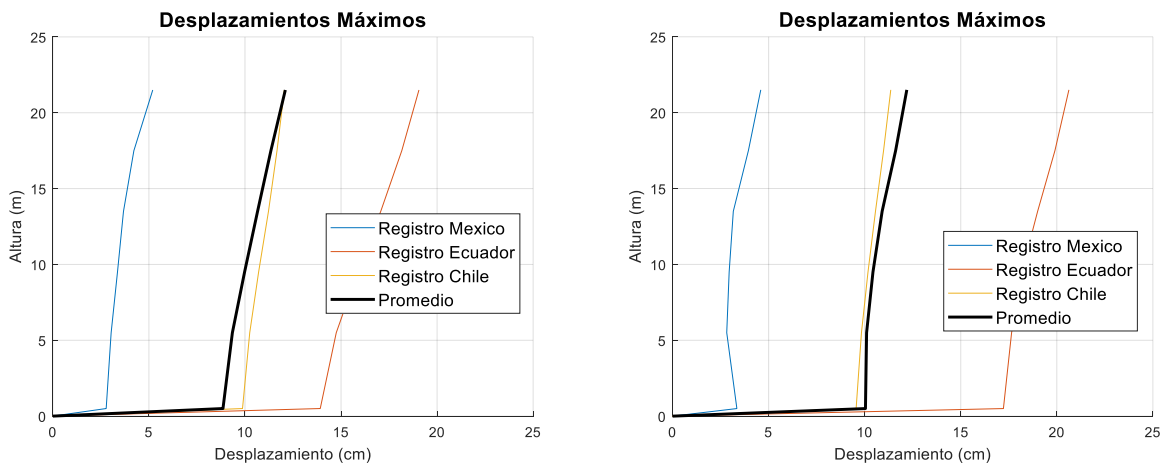


Figura 7.24 Izquierda: Desplazamientos máximos para la estructura aislada (método convencional). Derecha: Desplazamientos máximos para la estructura aislada (metodología ADRS).

En la Figura 7.25 se comparan las derivas de entrepiso para las dos estructuras con diferentes geometrías de aislador. El registro de México alcanza una deriva máxima de entrepiso del orden del 3.5‰ para la estructura aislada diseñada por el método convencional y el registro de Chile una deriva máxima del 3.2‰ para la estructura aislada diseñada con la metodología ADRS. Como

se ha observado hasta el momento el sistema aislado con la metodología ADRS presenta una reducción del 14% en el parámetros de aceleraciones y del 9% en la derivas de entrepiso analizados.

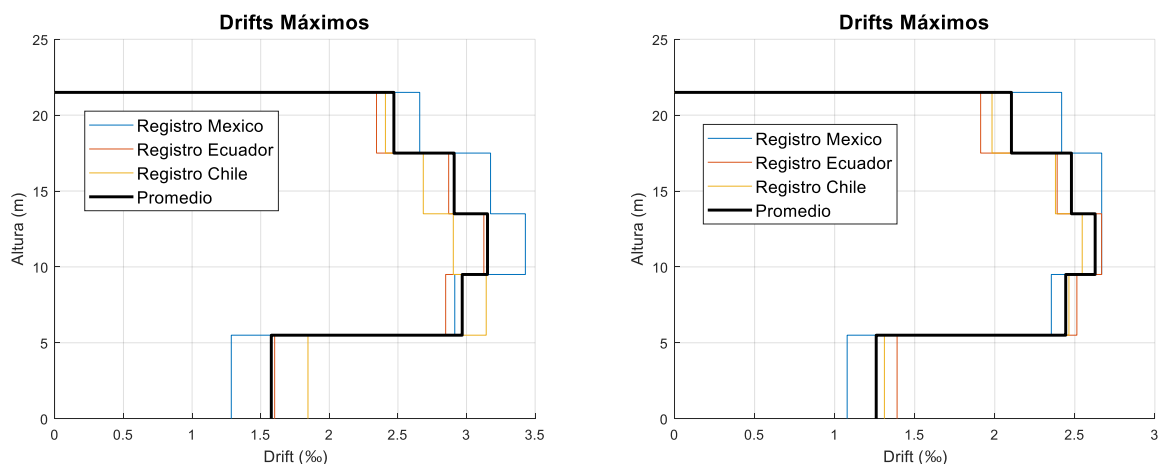


Figura 7.25 Izquierda: Derivas de entrepiso para la estructura aislada (método convencional).
Derecha: Derivas de entrepiso para la estructura aislada (metodología ADRS).

Finalmente se compara el desempeño de vigas y columnas para el sistema aislado diseñado mediante el método convencional y la estructura aislada diseñada con la metodología ADRS para el registro de aceleraciones de Chile. La Figura 7.26 muestra las incursiones inelásticas tanto de vigas como columnas. Se observa que para ambos diseños de sistema de aislación, tanto las vigas como las columnas no presentan incursiones inelásticas y alcanzan un desempeño de Ocupación Inmediata.

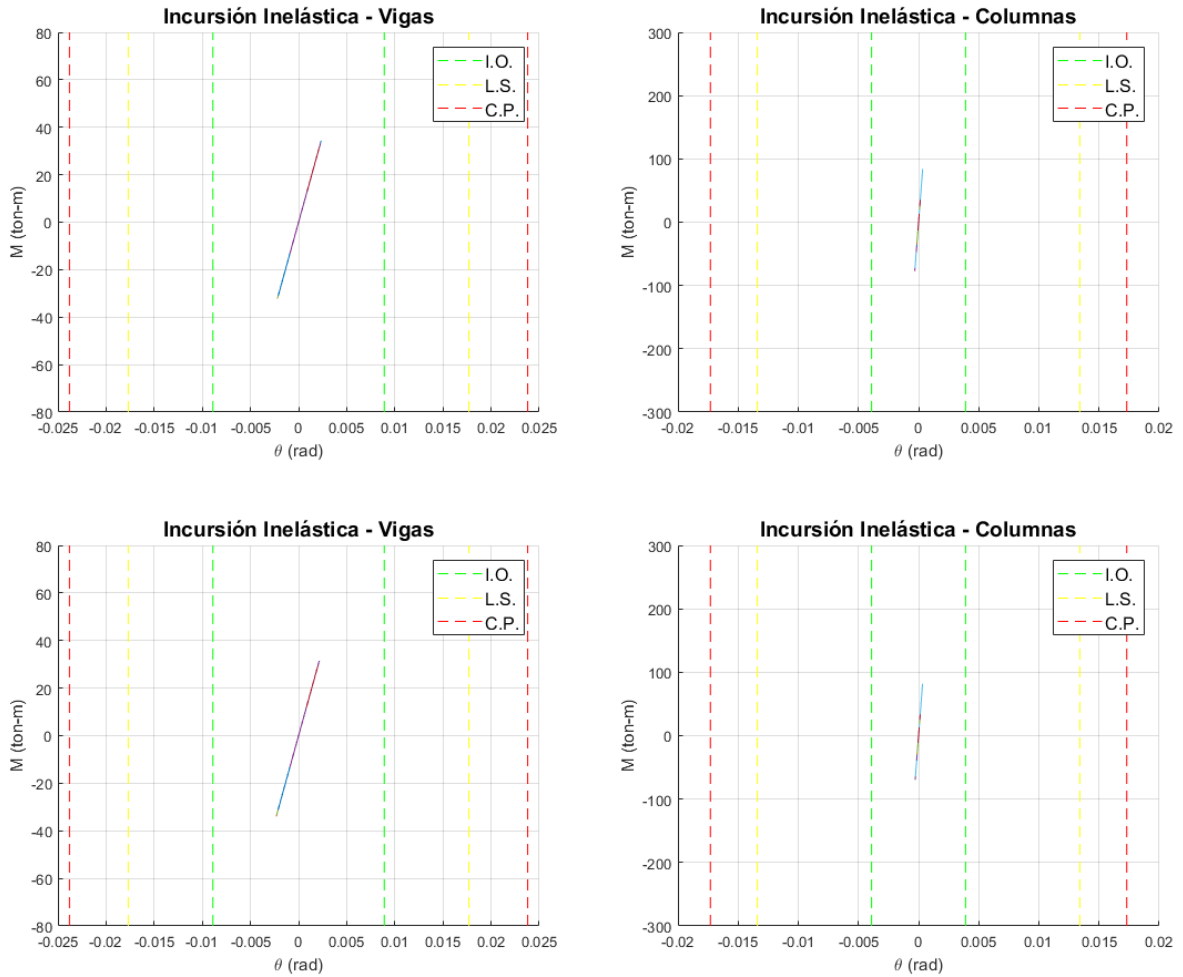


Figura 7.26 Superior: IncurSIONes inelásticas en vigas y columnas para la estructura la estructura aislada (método convencional). Inferior: IncurSIONes inelásticas en vigas y columnas para la estructura aislada (metodología ADRS).

La Tabla 7.18 y Tabla 7.19 muestran los valores de aceleración, desplazamiento y drifts para cada piso de la estructura aislada diseñada por el método convencional y por la metodología ADRS respectivamente. Al realizar la comparación se observa que al implementar un sistema de aislación sísmica diseñado mediante parámetros óptimos resulta favorable debido a las reducciones en los parámetros de análisis que cuantitativamente justifican el uso de la metodología ADRS.

Tabla 7.18 Parámetros de Aceleración, Desplazamiento y Drifts de la estructura aislada diseñada por el método convencional.

Estructura Aislada (método convencional)									
	Aceleraciones (g)			Desplazamientos (cm)			Drifts (‰)		
	México	Ecuador	Chile	México	Ecuador	Chile	México	Ecuador	Chile
Base	0.28	0.18	0.26	2.8	13.9	9.9	1.29	1.60	1.84
1	0.18	0.11	0.18	3.0	14.8	10.2	2.91	2.85	3.14
2	0.15	0.11	0.17	3.4	15.9	10.7	3.43	3.13	2.90
3	0.10	0.11	0.17	3.7	17.1	11.2	3.17	2.87	2.68
4	0.16	0.13	0.14	4.2	18.2	11.7	2.66	2.34	2.41
5	0.33	0.21	0.32	5.2	19.1	12.0	NA	NA	NA

Tabla 7.19 Parámetros de Aceleración, Desplazamiento y Drifts de la estructura aislada diseñada por la metodología ADRS.

Estructura de Base Fija (metodología ADRS)									
	Aceleraciones (g)			Desplazamientos (cm)			Drifts (‰)		
	México	Ecuador	Chile	México	Ecuador	Chile	México	Ecuador	Chile
Base	0.26	0.13	0.18	3.3	17.2	9.6	1.08	1.39	1.31
1	0.15	0.09	0.12	2.8	17.6	9.8	2.35	2.51	2.46
2	0.13	0.08	0.13	2.9	18.2	10.2	2.67	2.67	2.55
3	0.13	0.08	0.11	3.2	19.0	10.6	2.67	2.39	2.38
4	0.13	0.11	0.11	3.9	19.9	11.0	2.42	1.91	1.98
5	0.30	0.18	0.21	4.6	20.6	1.4	NA	NA	NA

La Figura 7.27 muestra el gráfico ADRS para 21 registros sísmicos sin escalar utilizando los mismos parámetros de la sección 7.2 a excepción del método de escalamiento y espectro objetivo. El gráfico se utiliza para estimar la respuesta del sistema de aislación sísmica ante un terremoto de magnitudes similares a los registros sísmicos utilizados. Se observa que el rango de desplazamientos fluctúa entre 6 y 10 cm, valores que coinciden aproximadamente con los desplazamientos observados en sistemas de aislación instalados en edificaciones ubicadas en distintos lugares de Chile.

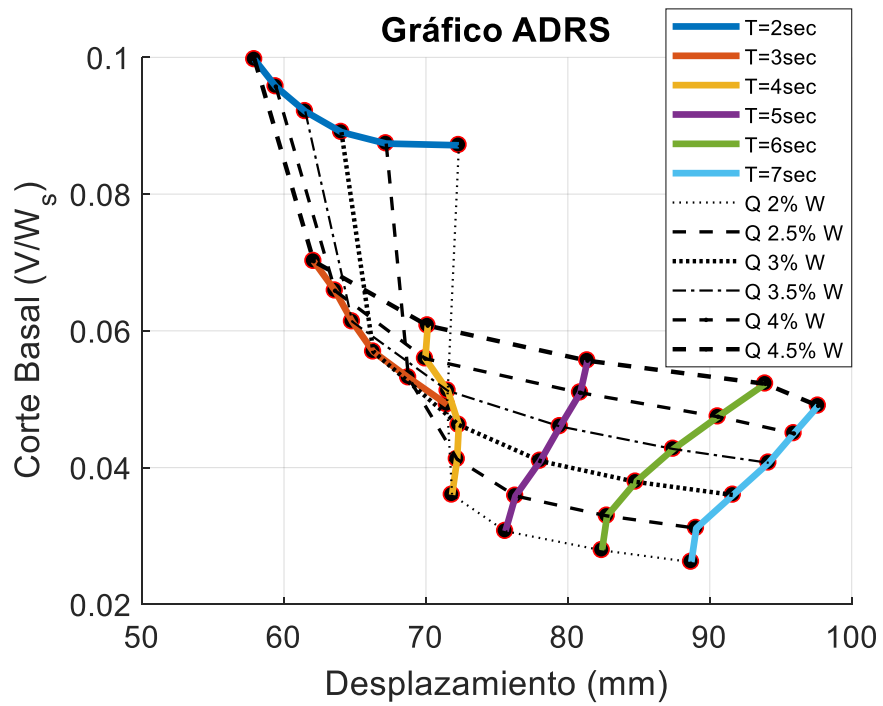


Figura 7.27 Gráfico ADRS para 21 registros sísmicos sin escalar.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presenta un resumen de la investigación realizada con los resultados obtenidos y las conclusiones más relevantes del proceso de la metodología ADRS. Adicional se proponen futuras líneas de investigación que aporten al desarrollo de la metodología.

8.1. Resumen y Conclusiones

Las estructuras con sistemas de aislación sísmica han evolucionado por varias décadas producto de la experiencia del sector de la construcción e investigaciones realizadas a estos dispositivos. El objetivo de esta investigación es presentar una metodología que permita identificar rápidamente los parámetros óptimos del sistema de aislación sísmica mediante el uso de espectros ADRS y comparar los resultados de diseño de dispositivos de aislación utilizando la metodología ADRS y el método normativo convencional modal espectral.

Para generar los espectros ADRS se realizan análisis no lineales de respuesta en el tiempo a un oscilador de un grado de libertad utilizando registros sísmicos reales de terremotos ocurridos en Chile en las últimas décadas, sin escalar y escalados a los espectros objetivos: Sismo Máximo Posible (SMP) y Espectro Medio Condicional (EMC). Se evalúa el efecto del procedimiento de modelación del amortiguamiento intrínseco de la estructura mediante al cálculo de la tasa de amortiguamiento teórica y empírica, el amortiguamiento empírico se determinó usando dos procedimientos: (1) analizando resultados de ensayos a bajas deformaciones de dispositivos de aislación sísmica, y (2) generando espectros de densidad de potencia de registros sísmicos obtenidos en estructuras con aislación sísmica, sobre y debajo el sistema de aislación durante eventos sísmicos. Se compara el efecto de emplear un modelo histerético Bi-Lineal o de Bouc-Wen y se analiza el resultado al variar el factor α que representa la relación entre la rigidez inicial y la rigidez post-fluencia. Se estudia la diferencia de utilizar los métodos de integración numéricos de Newmark, HHT y alpha generalizado, y se analiza la implicancia de utilizar los siguientes métodos de escalamiento: factor de escala constante, y escalamiento en los dominios del tiempo y de la frecuencia. Se comparan los resultados de generar los espectros ADRS al variar todos los parámetros mencionados anteriormente y se seleccionan los parámetros que optimicen los valores de corte basal y desplazamiento del sistema de aislación.

Esta metodología se aplica para el diseño de aisladores sísmicos de una estructura arquetipo y se compara su desempeño con el sistema de aislación sísmica diseñado mediante los métodos prescriptivos de la normativa vigente (NCh2745). Para cumplir con el objetivo de evaluación de desempeño se emplea la metodología de Vision 2000 (SEAOC, 1995) y para el desarrollo de los modelos no lineales se emplea la plataforma Open System for Earthquake Engineering Simulation

(OpenSEES). Finaliza la investigación, se presentan las siguientes conclusiones relevantes:

1. Mediante el uso de herramientas computacionales y numéricas, el desarrollo de los gráficos ADRS utilizando análisis no lineal de respuesta en el tiempo es muy factible para el diseño preliminar de proyectos que consideran el uso de sistemas de aislación sísmica.
2. Los datos que entrega la metodología ADRS basados en parámetros característicos de los sistemas de aislación, representan una mejora significativa sobre el enfoque de diseño convencional considerado hasta la fecha. Los gráficos resultantes proveen una importante e intuitiva herramienta visual que permite a los diseñadores identificar de manera inmediata los parámetros de diseño de sistemas de aislación sísmica que optimicen la respuesta del sistema para un sitio específico. La diferencia al utilizar diferentes composiciones de periodos post-fluencia (T_2) y resistencias características (Q_d) se pueden identificar claramente. Además, mediante los gráficos ADRS, se puede obtener un procedimiento racional para determinar variaciones aceptables de las propiedades (aplicables para el proceso de diseño, y también para los ensayos de los dispositivos).
3. Se evaluó el procedimiento de diseño de sistemas de aislación sísmica basado en la normativa NCh2745, usando parámetros de rigidez efectiva (K_{eff}) y amortiguamiento efectivo (β_{eff}), para la estructura en estudio, dispuesta con un sistema aporticado de hormigón armado ubicada en zona sísmica 3 y suelo tipo B según NCh2745. Se utilizó el Sismo Máximo Posible para diseñar el sistema de aislación, para un amortiguamiento efectivo del 20% y un periodo efectivo de 3 seg. A partir de estos datos se calculó una rigidez efectiva del aislador de 956 Kgf/cm y se obtuvo un desplazamiento total máximo de 29 cm. Se dimensiona el aislador dando como resultado una altura de 37.2 cm, un diámetro exterior de 75 cm. y un diámetro interior de 10 cm.

Se realizó la comparación del desempeño de la estructura aislada y la estructura de base fija para tres registros sísmicos (México de $M_w = 8.2$, Ecuador de $M_w = 7.8$ y Chile de $M_w = 8.8$) y se analizaron los resultados de aceleraciones máximas, desplazamientos máximos y drifts. Al comparar ambos tipos de estructuras, la reducción en aceleraciones esta entre 41 y 89 %, los desplazamientos entre 71 al 92 % y los drifts entre 13 al 85 %. La estructura de base fija incursiona inelásticamente en vigas y columnas. La incorporación del sistema de aislación sísmica mejoró el desempeño de la estructura y justifica la posible mayor inversión que involucra utilizar estos dispositivos.

4. Para el diseño del sistema de aislación se utilizaron parámetros acordes a la norma NCh2745 y criterios estándar de la profesión. Para la metodología ADRS se analizaron los parámetros óptimos de resistencia característica y periodo post fluencia que otorguen los menores valores de corte basal de la estructura. Primero se calculó el valor óptimo de amortiguamiento a partir del corte basal en función del periodo post fluencia y el amortiguamiento efectivo $V_s(T_2, \beta)$, donde el valor mínimo de corte basal se obtiene para un valor de amortiguamiento de 21% para un suelo tipo B y zona sísmica 3. Este resultado se verificó teóricamente. De igual manera se calcularon los valores óptimos de periodo post-fluencia (T_2) y resistencia característica (Q_d) que minimizan el corte basal, donde para cada valor de periodo existe un valor mínimo de corte basal a una resistencia característica específica.

Se calculó el rango de resistencias características para la metodología ADRS a partir de los requerimientos normativos de NCh2745 y como resultado se obtiene $Q_d = [2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5]\%$ de W_s . De la misma manera se calculan los valores de periodo post fluencia para la metodología ADRS, y se consideraron valores de T_2 entre 2 y 7 seg, aunque en general valores sobre 5 segundos no son prácticos.

5. El procedimiento de modelación del amortiguamiento intrínseco de la estructura y del sistema de aislación sísmica sobre los espectros ADRS fue analizado mediante la suma de un amortiguamiento viscoso y un amortiguamiento histérico. Para definir el amortiguamiento viscoso se utilizó amortiguamiento de Rayleigh, considerando que la matriz de amortiguamiento se determina en base a la rigidez tangente, por lo que la matriz de amortiguamiento se actualiza cada vez que la rigidez tangente cambia.

Para calcular la tasa de amortiguamiento se consideraron dos procedimientos: uno teórico y otro empírico. El teórico consistió en obtener el valor de β a partir de la normativa NCh2745, donde al disminuir el desplazamiento la tasa de amortiguamiento tiende a cero, debido a que el sistema de aislación no incursiona inelásticamente por lo que este método no se puede utilizar. Se analizaron dos métodos empíricos, el primero mediante resultados de ensayos de aisladores a bajas deformaciones y el segundo con registros sísmicos obtenidos en estructuras con sistemas de aislación sísmica. El primer enfoque mostraba resultados de amortiguamiento de un rango del 3% al 40% con un promedio del 20% y el segundo enfoque valores de 1.72% a 9% con un promedio de aproximadamente 5%. De todos los análisis realizados se escogió el valor de amortiguamiento del 5% porque este valor es similar a los valores empleados en la literatura. Sin embargo, se estima que este

aspecto requiere futura investigación.

6. Las demandas de corte basal y desplazamientos son determinadas a partir de un análisis no lineal de respuesta en el tiempo de dos modelos histeréticos, el Bi-lineal y el propuesto por Bouc-Wen. Los espectros ADRS resultantes son aproximadamente similares para todo el rango de periodos post fluencia y resistencias características. A partir de estos datos se concluye que el modelo histerético que se utilice en la metodología ADRS no tendría repercusión en los resultados finales.
7. El número de registros sísmicos a utilizar en la metodología ADRS es uno de los parámetros que genera mayor dispersión de datos en los resultados. La diferencia de utilizar 3, 7 o 21 pares de registros sísmicos radica en las características de los registros, como su magnitud de momento, distancia a la falla y mecanismo de falla, entre otros. Los resultados de los espectros ADRS se obtienen a partir del promedio de los valores máximos de cada registro, por lo que al utilizar la mínima cantidad de registros los resultados de desplazamientos y cortes basales tienden a ser mayores a diferencia de utilizar una muestra considerable de registros sísmicos con diferentes características que representen todos los posibles escenarios. Para el gráfico ADRS resultante se utilizaron 21 registros sísmicos y los desplazamientos y cortes basales resultantes están en un rango de 105 a 145 mm y 0.030 a 0.151 W_s respectivamente.

Otro de los parámetros que guarda relación con el número de registros sísmicos es la selección de estos de manera aleatoria o por su Intensidad de Arias (IA). Los gráficos ADRS basados en registros seleccionados por su IA muestran menores valores de desplazamientos y cortes basales siendo este parámetro el utilizado en el desarrollo de los gráficos ADRS.

8. Los gráficos ADRS muestran las siguientes tendencias: (1) a medida que el periodo post fluencia aumenta, los valores de corte basal disminuyen; (2) para los periodos post fluencia $T_2 = 2, 3$ y 4 seg, los valores de corte basal son aproximadamente iguales para todo el rango de resistencia característica, y los desplazamientos aumentan a medida que la resistencia característica disminuye. Sucede lo contrario para los periodos $T_2 = 5, 6$ y 7 seg, para los cuales los valores de desplazamiento son aproximadamente iguales para todas las resistencias características y el corte basal disminuye a medida que disminuye la resistencia característica. Esta variación de la respuesta se observa para periodos post-fluencia de 4 a 5 seg.

9. La variación del factor α , correspondiente al cociente entre la rigidez elástica y rigidez post-fluencia del sistema de aislación, considerado para el desarrollo de los gráficos ADRS, mostró que para el valor de $\alpha = 5$ los valores de desplazamiento y corte basal son máximos, y para $\alpha = 15$ los resultados eran los mínimos. El valor de $\alpha = 10$ se aproxima al promedio de los otros dos resultados, siendo este el seleccionado para el gráfico ADRS resultante. Los desplazamientos están en un rango de 165 a 241 mm y los cortes basales entre 0.037 y 0.249 W_S .
10. Se estudiaron tres métodos de integración numérica: el método de Newmark, Hilber Hughes y Taylor (HHT) y alpha generalizado. Se analizó la implicancia de utilizar cada uno de estos métodos para el análisis de los espectros ADRS. Los métodos de Newmark y HHT entregan respuestas similares de desplazamiento y corte basal, y los valores del método de alpha generalizado son los máximos valores de desplazamiento y corte basal. En consecuencia, se trabajó con el método de integración de Newmark, con el cual Los desplazamientos se encuentran en un rango de 165 a 241 mm y los cortes basales entre 0.037 y 0.249 W_S . Las desviaciones estándar guardan relación con los valores máximos de desplazamiento y corte basal, siendo el método de alpha la mayor dispersión de datos en ambos parámetros.

Los valores de los gráficos ADRS varían con respecto a los parámetros alpha (α , α_m y α_f), gamma (γ) y beta (β) de los métodos de integración numérica. En la presente investigación se indican los valores de estos parámetros que satisfacen la precisión de segundo orden en el análisis. Para el método de Newmark $\gamma = 0.5$ y $\beta = 0.25$, para el método de HHT $\alpha = -0.3$ y el método de alpha generalizado $\alpha_m = 0.5$ y $\alpha_f = 0.5$.

11. De los dos espectros objetivos que se estudiaron en la presente investigación se utilizó el Espectro Medio Condicional (EMC) para generar los gráficos ADRS. Este espectro objetivo, en comparación con el Sismo Máximo Posible de la norma NCh2745, otorga valores más realistas para todo el rango de periodos analizados siendo solo iguales en el periodo fundamental de la estructura (periodo inicial) $T^* = 0.9$ seg, el cual está mucho más relacionado con las aceleraciones espectrales de periodos cercanos, y que dicha relación o semejanza de valores decae a medida que se aleja el par de valores de periodo que se están comparando. La máxima dispersión de los valores de desplazamientos de los gráficos ADRS se da al comparar estos dos espectros objetivos. El EMC entrega los menores resultados y la diferencia es de 50 a 121 mm dependiendo del valor de periodo post-fluencia y resistencia característica que se esté comparando.

12. El último parámetro que se analizó para los espectros ADRS fue el método de escalamiento, donde los métodos de escalamiento en el dominio del tiempo y de la frecuencia entregaron resultados similares en el corte basal de los gráficos ADRS, siendo estos valores mayores a los obtenidos por el factor de escala constante. Para los desplazamientos el método de escalamiento en el dominio del tiempo fue el que resultó en los mayores desplazamientos y el de menores valores fue el del factor de escala. El método que se escogió para realizar los escalamientos de los registros sísmicos al espectro objetivo fue el del dominio del tiempo, porque realiza un ajuste a los registros de acelerogramas mediante wavelets, procedimiento que conduce a una corrección que introduce menos energía en el registro sísmico, conservando las características no estacionarias del registro sísmico original.

Los métodos de escalamiento en el dominio del tiempo y de la frecuencia se escalaron al espectro objetivo de manera individual, por lo que los valores de desviación estándar de los resultados son casi nulos. Otros valores se hubiesen obtenido si los escalamientos se hicieran de manera colectiva, los resultados presentarían una mayor dispersión. A partir de esto, se concluye que a mayor número de registros sísmicos que se utilicen, menor será la diferencia en los gráficos ADRS. Caso contrario ocurrirá si los registros son escalados de manera colectiva.

13. Una vez seleccionados todos los parámetros para construir el gráfico ADRS resultante, se continuó con el modelo del aislador. Se seleccionó un periodo post fluencia de $T_2 = 4.07$ seg y una resistencia característica $Q_d = 2.3\%$ de W_S , que corresponden a los valores óptimos obtenidos del análisis para una zona sísmica 3 y suelo tipo B. De estos datos se calculó una nueva geometría del aislador con las siguientes dimensiones: diámetro exterior de 60 cm, diámetro interior de 8 cm y una altura total de 27.2 cm, resultando en un aislador de dimensiones menores a las diseñadas por el método convencional, las cuales fueron de: diámetro exterior de 75 cm, diámetro interior de 10 cm y una altura de 37.2 cm. Adicional a una reducción en las dimensiones del aislador, el desempeño que mostró el nuevo sistema resultó más favorable para la estructura, obteniendo menores aceleraciones y derivas de entrepiso para los 3 registros de aceleraciones de referencia considerados.

Los resultados obtenidos a partir de la metodología ADRS resultaron ser de menor magnitud porque se utilizaron los parámetros óptimos que minimizan cortes basales; a diferencia de los resultados obtenidos del diseño convencional, en el cual se utilizaron

parámetros escogidos de acuerdo a procedimientos estándar de la profesión. El uso de la metodología ADRS resultó ser una herramienta muy útil para el diseño del sistema de aislación, y permitió identificar los valores óptimos de corte basal y desplazamiento del sistema de aislación a partir de un periodo post fluencia y una resistencia característica de manera rápida y fácil. Este mismo procedimiento se puede realizar al variar el tipo de suelo o zona sísmica en el territorio chileno, obteniendo un diseño preliminar del sistema de aislación.

14. Los parámetros óptimos calculados para realizar el diseño del sistema de aislación a partir de la metodología ADRS resultaron en un aislador que requirió una segunda iteración para ajustar la geometría del aislador, a fin de satisfacer los requisitos de diseño complementarios. En conclusión, los valores entregados por la metodología ADRS, si bien, serán los que menor corte basal transmitan a la estructura, pueden requerir ajustes que modifiquen la geometría del aislador como aumentar el diámetro de la goma o el núcleo de plomo, o colocar más láminas de goma para aumentar la altura.

8.2. Recomendaciones y líneas futuras de investigación

El tema desarrollado en esta investigación propone una continuación en futuras investigaciones relacionadas con el diseño de sistemas de aislación sísmica. Para esto sería de gran utilidad profundizar en ciertos temas que aporten al desarrollo de la metodología ADRS. A continuación se presentan recomendaciones y temas a desarrollar:

- Se requiere que se continúe con la investigación de los espectros ADRS considerando una mayor cantidad de registros sísmicos para diferentes sitios y niveles de amenaza sísmica, con el objetivo de obtener resultados más generales, y caracterizar los gráficos ADRS para los diseños y demandas de los sistemas de aislación sísmica.
- Se propone realizar los gráficos ADRS utilizando registros sísmicos combinados considerando una dirección resultante, obteniendo registros de aceleraciones representativos de los terremotos a analizar.
- En la presente investigación se utilizaron dos métodos de escalamiento espectral. En ambos casos el escalamiento se realiza para los registros de manera individual, por lo que sería importante incluir resultados de gráficos ADRS a partir de registros escalados espectralmente de manera colectiva.
- A medida que esta metodología ADRS sea investigada y aplicada en proyectos, y para

otros sitios con magnitudes sísmicas variadas, se puede alcanzar un “patrón” de respuesta general que defina directamente los espectros ADRS para una zona específica.

- Para los gráficos ADRS se utilizó el Espectro Medio Condicional a partir del Sismo Máximo Posible en lugar de un Espectro de Amenaza Uniforme. Se recomienda realizar los gráficos ADRS para distintas zonas sísmicas y tipos de suelo utilizando Espectros de Amenaza Uniforme que sean representativos del lugar de estudio.
- Evaluar en mayor detalle la tasa de amortiguamiento de los sistemas de aislación sísmica a bajas deformaciones, utilizando señales generadas por ruido ambiental o sismos que no posean ruido significativo.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Abrahamson, N., Gregor, N., & Addo, K. (2016). BC Hydro Ground Motion Prediction Equations for Subduction Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 32(1), 23–44. <https://doi.org/10.1193/051712EQS188MR>
- Alatik, L., & Abrahamson, N. (2010). An improved method for nonstationary spectral matching. *Earthquake Spectra*, 26(3), 601–617. <https://doi.org/10.1193/1.3459159>
- Almazán, J. (2010). Comportamiento de estructuras antisísmicas durante el terremoto del maule y su posible efecto en las normas de diseño sísmico en Chile. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, 7(2/3), 4–28.
- Baker, J. W. (2011). Conditional Mean Spectrum: Tool for Ground-Motion Selection. *Journal of Structural Engineering*, 137(3), 322–331. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000215](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000215)
- Baker, J. W., & Jayaram, N. (2008). Correlation of Spectral Acceleration Values from NGA Ground Motion Models. *Earthquake Spectra*, 24(1), 299–317. <https://doi.org/10.1193/1.2857544>
- Baker, J. W., & Lee, C. (2018). An Improved Algorithm for Selecting Ground Motions to Match a Conditional Spectrum. *Journal of Earthquake Engineering*, 22(4), 708–723. <https://doi.org/10.1080/13632469.2016.1264334>
- Bazzurro, P., & Luco, N. (2006). Do Scaled and Spectrum-Matched near-Source Records Produce Biased Nonlinear Structural Responses. En *8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*.
- Boore, D. M., Sisi, A. A., & Akkar, S. (2012). Using pad-stripped acausally filtered strong-motion data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2), 751–760. <https://doi.org/10.1785/0120110222>
- Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., & Atkinson, G. M. (2014). NGA-West2 Equations for Predicting PGA, PGV, and 5 % Damped PSA for Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1057–1085. <https://doi.org/10.1193/070113EQS184M>
- Boroschek, R., & Contreras, V. (2012). Strong Ground Motion from 2010 Mw 8.8 Maule Chile Earthquake and Attenuation Relations for Chilean Subduction Zone Interface Earthquake. En *International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake* (pp. 1722–1733).
- Boroschek, R. L., Contreras, V., Kwak, D. Y., & Stewart, J. P. (2012). Strong Ground Motion Attributes of the 2010 Mw 8.8 Maule, Chile, Earthquake. *Earthquake Spectra*, 28(S1), s19–s38. <https://doi.org/10.1193/1.4000045>
- Centro sísmológico nacional. Universidad de Chile. Sismos Importantes y/o Destructivos (1570 a la fecha). [En línea]. <<http://www.sismologia.cl/>>.
- Charney, F. A. (2008). Unintended Consequences of Modeling Damping in Structures. *Journal of Structural Engineering*, 134(4), 581–592. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:4\(581\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:4(581))
- Chiou, B., Darragh, R., Gregor, N., & Silva, W. (2008). NGA project strong-motion database.

Earthquake Spectra, 24(1), 23–44. <https://doi.org/10.1193/1.2894831>

- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de Estructuras*. Cuarta Edición. Pearson Education. Mexico
- Chopra, A. K., & McKenna, F. (2016). Modeling viscous damping in nonlinear response history analysis of buildings for earthquake excitation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 45(2), 193–211. <https://doi.org/10.1002/eqe.2622>
- Chung, J., & Hulbert, G. M. (1993). A Time Integration Algorithm for Structural Dynamics With Improved Numerical Dissipation : The Generalized- Method. *Journal of Applied Mechanics*, 60, 371–375.
- Constantinou, M C, Whittaker, A. S., Kalpakidis, Y., Fenz, D. M., & Warn, G. P. (2007). *Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading, Report MCEER07-0012*, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.
- Constantinou, Michael C., Kalpakidis, I., Filiatrault, A., & Ecker Lay, R. A. (2011). *LRFD-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators* (Vol. MCEER-11-0).
- Converse, A. M., & Brady, A. G. (1992). *BAP: Basic Strong-Motion Accelerogram Processing Software*, version 1.0. Open-File Report 92-296A, Mar. US Geological Survey
- Corporación de desarrollo tecnológico, & Cámara chilena de la Construcción. (2011). *Protección Sísmica de Estructuras. Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía*. Santiago de Chile: Area de Comunicación CDT.
- CSI. (2015). *ETABS 2014, Software Manual*. Computers and Structures, Inc.
- Fahjan, Y., & Ozdemir, Z. (2008). Scaling of earthquake accelerograms for non-linear dynamic analyses to match the earthquake design spectra. En *The 14 World Conference on Earthquake Engineering*.
- Flores, F. A. (2015). Time-History Modification and Spectral Matching Oriented to Dynamic Geotechnical Analysis. En *15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (pp. 1033–1040). <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-603-3-1033>
- Genatios, C., & Lafuente, M. (2016). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*, Banco de desarrollo de América Latina, Perú.
- Hall, J. F. (2006). Problems encountered from the use (or misuse) of Rayleigh damping. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(5), 525–545. <https://doi.org/10.1002/eqe.541>
- Hall, J. F., & Ryan, K. L. (2000). Isolated Buildings and 1997 UBC Near-Source Factors. *Earthquake Spectras*, 16, 393–411.
- Hancock, J., Watson-lamprey, J., Abrahamson, N. A., Bommer, J. J., Markatis, A., Mccoy, E., & Mendis, R. (2006). An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets. *Journal of Earthquake Engineering*, 10(1), 67–89.
- Haselton, C., Whittaker, A., Hortacsu, A., Baker, J., Bray, J., & Grant, D. (2012). Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-History Analyses. En *15th*

World Conference on Earthquake Engineering.

- Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Groholski, D. R., Phillips, C. A., & Park, D. (2016). Deepsoil Version 6.1, User Manual.
- Heo, Y., Kunnath, S. K., & Abrahamson, N. (2011). Amplitude-Scaled versus Spectrum-Matched Ground Motions for Seismic Performance Assessment. *Journal of Structural Engineering*, 137(3), 278–288. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000340](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000340)
- Hilber, H., Hughes, T., & Taylor, R. (1977). Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 5, 283–292.
- Ikhouane, F., Mañosa, V., & Rodellar, J. (2007). Dynamic properties of the hysteretic Bouc-Wen model. *Systems and Control Letters*, 56(3), 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2006.09.001>
- Instituto Nacional de Normalización, «Diseño sísmico de edificios NCh433 Of. 96,» Santiago de Chile, 2012.
- Instituto Nacional de Normalización, «Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica NCh2745:2013,» Santiago de Chile, 2013.
- International conference of building officials. Uniform Building Code, 2 ICBO § (1991).
- Islam, A. B. M. S., Jameel, M., & Jumaat, M. Z. (2011). Seismic Isolation in buildings to be a practical reality : Behavior of structure and installation technique. *Journal of Engineering and Technology Research Vol.3*, 3.
- Ismail, M., Ikhouane, F., & Rodellar, J. (2009). The hysteresis Bouc-Wen model, a survey. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 16(2), 161–188. <https://doi.org/10.1007/s11831-009-9031-8>
- Jayamon, J. R., & Charney, F. A. (2015). Multiple ground motion response spectrum match tool for use in response history analysis. En *Structures Congress 2015* (pp. 2497–2509). <https://doi.org/10.1061/9780784479117.216>
- Jia, G., Gidaris, I., Taflanidis, A. A., & Mavroeidis, G. P. (2014). Reliability-based assessment/design of floor isolation systems. *Engineering Structures*, 78, 41–56. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.031>
- Jones, L, Aiken, I., Black, C., Whittaker, D., Retamales, R., & Boroschek, R. (2017). An Improved Design Methodology for Seismic Isolation Systems Using Nonlinear Response Spectra. En *16th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 1–11).
- Jones, Lindsay, Aiken, I., Black, C., Whittaker, D., & Şadan, B. (2015). Nonlinear Response Spectra for Isolation System Design: Case Studies in Turkey, California and New Zealand. En *3rd Turkish Conference on Earthquake Engineering and Seismology*.
- Jones, Lindsay, Aiken, I., Whittaker, D., & Black, C. (2015). Design Displacement and Acceleration Spectra for Seismic Isolation Systems : New Zealand , San Francisco and Vancouver. En *14th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures* (pp. 1–14).

- Kani, N., Takayama, M., & Wada, A. (2006). Performance of Seismically Isolated Buildings in Japan. En *8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering* (pp. 1–10).
- Kazantzi, A. K., & Vamvatsikos, D. (2019). Prescriptive Approaches in Performance-Based Design ? A Case- Study on Base Isolation. En *13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering* (pp. 1–8).
- Kelly, J. M. (1999). The role of damping in seismic isolation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 3–20.
- Kikuchi, M., & Aiken, I. D. (1997). An Analytical Hysteresis Model for Elastomeric Seismic Isolation Bearings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26, 215–231. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199702\)26:2<215::AID-EQE640>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199702)26:2<215::AID-EQE640>3.0.CO;2-9)
- Lagos, R., Kupfer, M., Lindenberg, J., Bonelli, P., Saragoni, R., Guendelman, T., ... Yanez, F. (2012). Authors : Seismic Performance of High-rise Concrete Buildings in Chile Seismic Performance of High-rise Concrete Buildings in Chile. *International Journal of High-Rise Buildings*, 1(3), 181–194.
- Llera, J., Boroschek, R., Vial, I., & Retamales, R. (2017). Protection in Chile : 25 years of evolution. En *16th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 1–24).
- López, A. (2016). *Estudio de la generación de espectros medios condicionales utilizando la base de datos de sismos con magnitud de momento igual o superior a 6.5 en Chile. Memoria para optar al título de ingeniero civil.* Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Ma, F., Zhang, H., Bockstedte, A., Foliente, G. C., & Paevere, P. (2004). Parameter analysis of the differential model of hysteresis. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 71(3), 342–349. <https://doi.org/10.1115/1.1668082>
- Madariaga, R. (1998). Sismicidad de Chile. *Física de la Tierra*, 10, 221–258.
- Makris, N., & Chang, S. P. (2000). Effect of viscous, viscoplastic and friction damping on the response of seismic isolated structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29(1), 85–107. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(200001\)29:1<85::AID-EQE902>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(200001)29:1<85::AID-EQE902>3.0.CO;2-N)
- Martínez, M. (2018). *Identificación en marcos equipados con diagonales de pandeo restringido sometidos a daño sísmico. Memoria para optar al título de ingeniero civil.* Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- McGuire, R. (1995). Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(5), 1275–1284. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(96\)83355-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(96)83355-9)
- Medina, R., & Music, J. (2018). Determinación del nivel de desempeño de un edificio habitacional estructurado en base a muros de hormigón armado y diseñado según normativa chilena. *Obras y Proyectos*, 23, 63–77.
- Naeim, F., & Lew, M. (1995). On the use of Design Spectrum Compatible Time Histories.pdf. *Earthquake Spectra*, 11(1), 111–127.

- National Research Council. (1988). *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (Vol. 91). Washington, D.C.: National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/19108>
- Pacific Earthquake Engineering Research Center. (2006). OpenSees.
- Park, D., & Hashash, Y. M. A. (2004). Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(2), 249–274.
- Petersen, M. D., Harmsen, S. C., Jaiswal, K. S., Rukstales, K. S., Luco, N., Haller, K. M., ... Shumway, A. M. (2018). Seismic Hazard, Risk, and Design for South America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(2), 781–800. <https://doi.org/10.1785/0120170002>
- Petrini, L., Maggi, C., Priestley, M. J. N., & Calvi, G. M. (2008). Experimental Verification of Viscous Damping Modeling for Inelastic Time History Analyzes. *Journal of Earthquake Engineering*, 12(sup1), 125–145. <https://doi.org/10.1080/13632460801925822>
- Phillips, C., & Hashash, Y. M. A. (2009). Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(7), 1143–1158. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.01.004>
- Platt, S. (2012). *Reconstruction in New Zealand post 2010-11 Christchurch earthquakes*. <http://www.carltd.com/article/Reconstruction-in-Christchurch-and-Concepción>
- Rauld, R., Medina, F., Leyton, F., & Ruiz, S. (2015). Mapa de microzonificación sismo-geológica para Chile. En *XIV Congreso Geológico Chileno* (pp. 106–109).
- Roeder, C. W., Stanton, J. F., & Taylor, A. W. (1987), "Performance of elastomeric bearings", Report No. 298, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- SEAO-C Vision 2000 Committee. (1995). *Performance Based Seismic Engineering of Buildings*. Sacramento, CA: Structural Engineers Association of California.
- Structural Engineering Institute. (2017). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784414248>
- Taflanidis, A. A., & Jia, G. (2011). A simulation-based framework for risk assessment and probabilistic sensitivity analysis of base-isolated structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40(14), 1629–1651. <https://doi.org/10.1002/eqe.1113>
- Takayama, M. (2013). Can Seismically Isolated Buildings Survive Large Tsunami Waves? En *13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures* (pp. 1–12).
- Takayama, M., & Morita, K. (2012). Seismic Response Analysis of Seismically Isolated Buildings using Observed Records due to 2011 Tohoku Earthquake. En *15th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Universidad de Chile. (2014). Centro Sismológico Nacional. Recuperado de <http://www.sismologia.cl>
- Venegas, B. (2013). *Análisis del comportamiento dinámico del puente marga marga sometido al terremoto del 27 de febrero de 2010*.

- Whittaker, A. S., Atkinson, G. M., Baker, J. ., Bray, J. D., Grant, D. N., Hamburger, R. O., & Haselton, C.B., & Somerville, P. (2011). *Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response - Hisotry Analyses*.
- Whittaker, D., & Jones, L. (2014). Displacement and acceleration design spectra for seismic isolation systems in Christchurch. En *2014 NZSEE Conference* (pp. 1–8).
- Wilson, E. (s. f.). *Análisis Estático y Dinámico de Estructuras*.
- Yansiku, S. I. (2017). Journal of King Saud University – Engineering Sciences Impact of artificially seismic loading on the response of building structure in various site classifications. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 3, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.06.002>
- Zhu, X., & Lu, X. (2011). Parametric Identification of Bouc-Wen Model and Its Application in Mild Steel Damper Modeling. *Procedia Engineering*, 14, 318–324. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.039>

10. ANEXOS

10.1. Anexo A. Valores de frecuencias f_i , f_p , f_{eff} obtenidas a partir de las rigideces inicial, post-fluencia y efectiva respectivamente para la Transformada de Fourier de los registros de Angol, Constitución y Talca.

Datos Angol

$K_i/K_p=5$

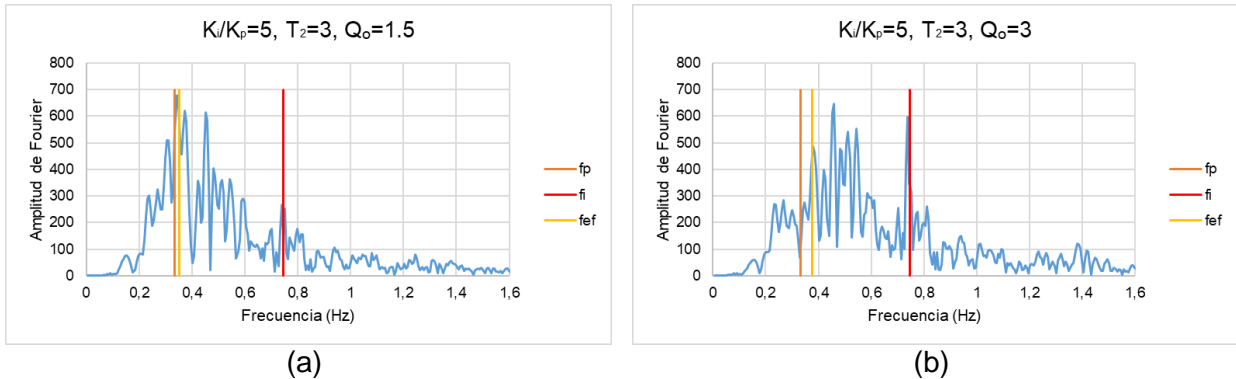


Figura A.1. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=3$ seg, $Q_0=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=3$ seg, $Q_0=3.0\%$ de W_s

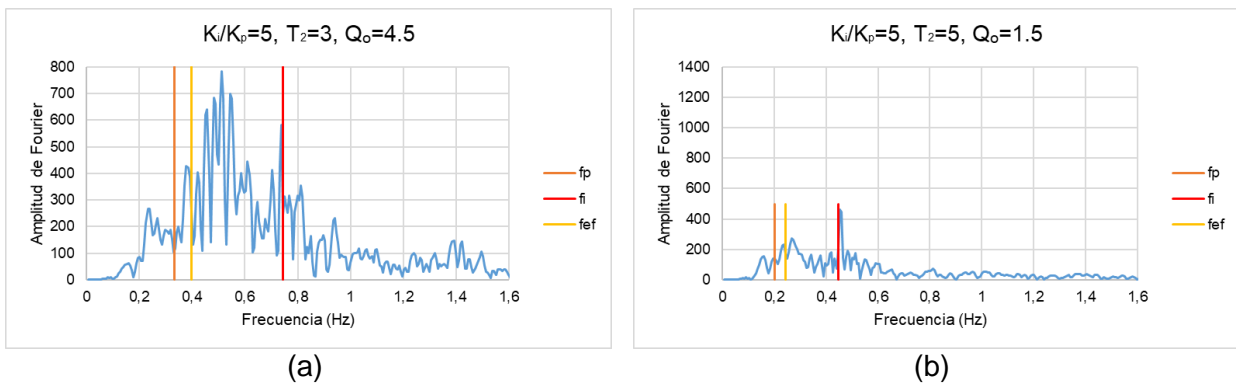


Figura A.2. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=3$ seg, $Q_0=4.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=5$ seg, $Q_0=1.5\%$ de W_s

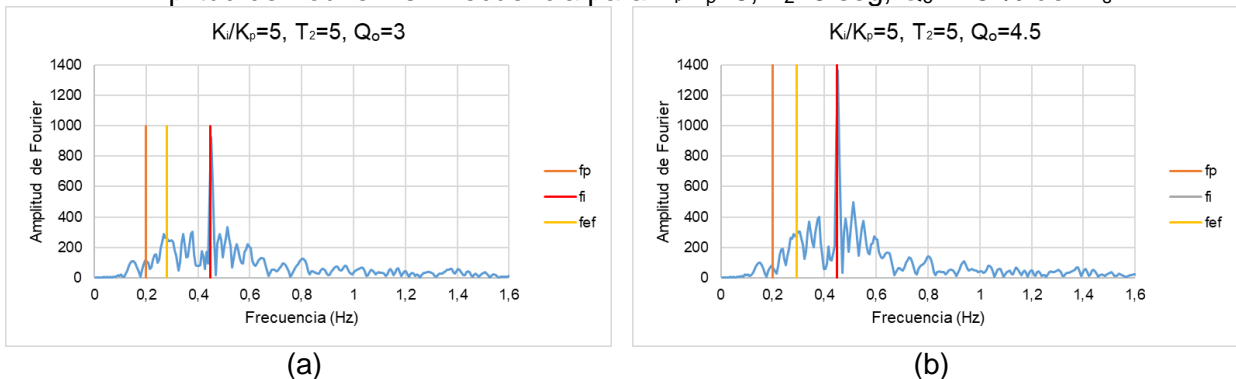
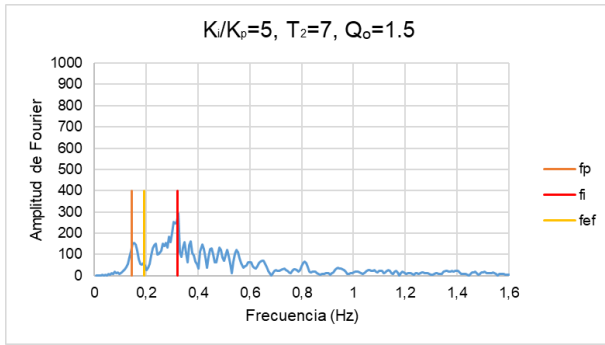
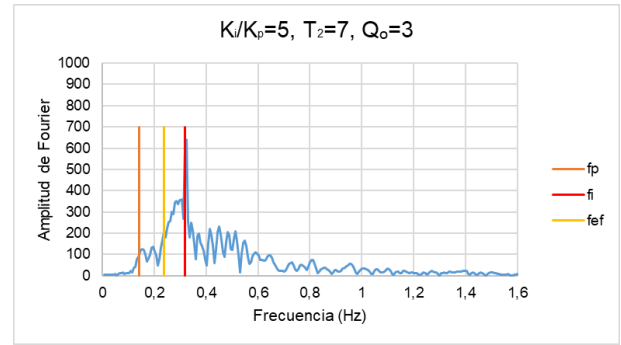


Figura A.3. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=5$ seg, $Q_0=3\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=5$ seg, $Q_0=4.5\%$ de W_s



(a)



(b)

Figura A.4. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5, T_2=7$ seg, $Q_o=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5, T_2=7$ seg, $Q_o=3\%$ de W_s

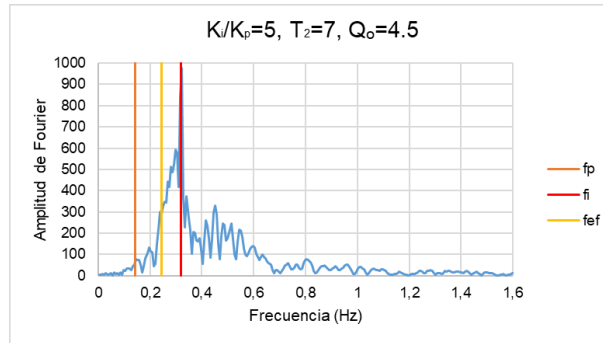
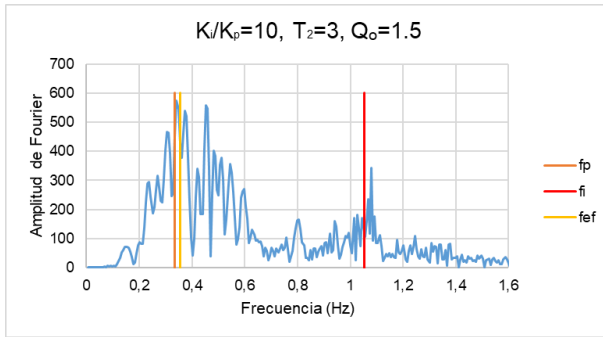
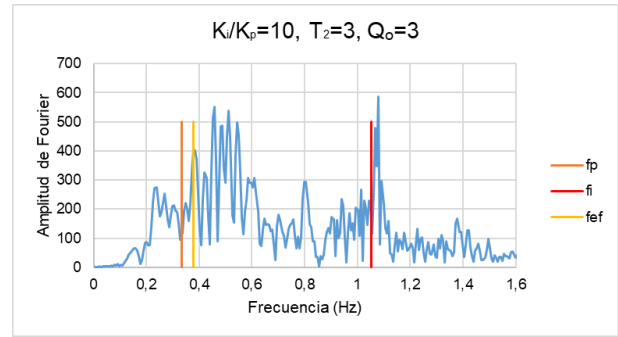


Figura A.5. Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5, T_2=7$ seg, $Q_o=4.5\%$ de W_s .

$K_i/K_p=10$

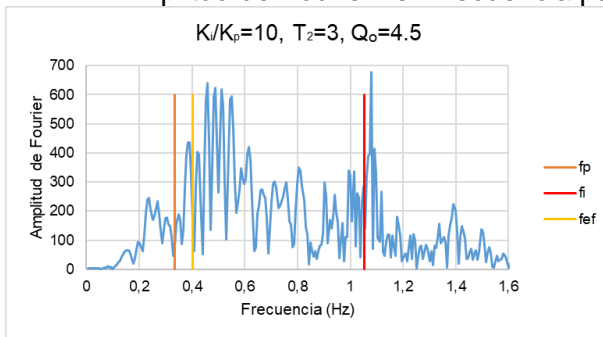


(a)

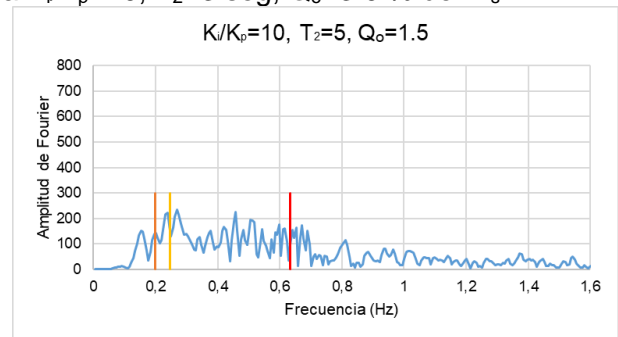


(b)

Figura A.6. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=3$ seg, $Q_0=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=3$ seg, $Q_0=3.0\%$ de W_s

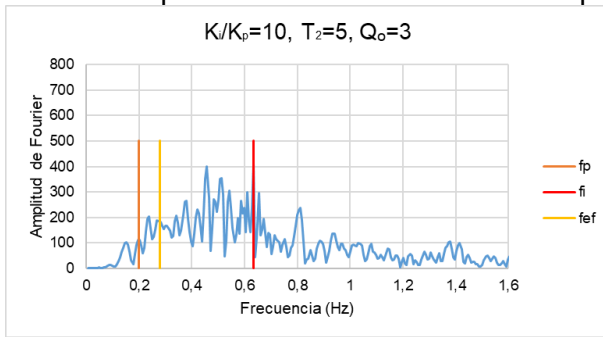


(a)

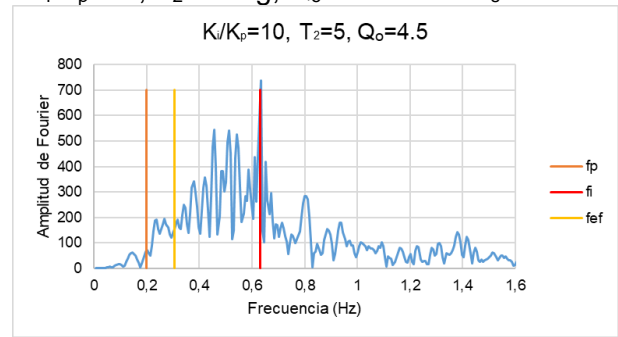


(b)

Figura A.7. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=3$ seg, $Q_0=4.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=5$ seg, $Q_0=1.5\%$ de W_s

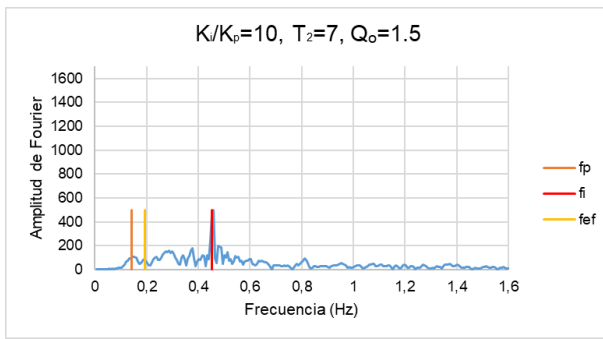


(a)

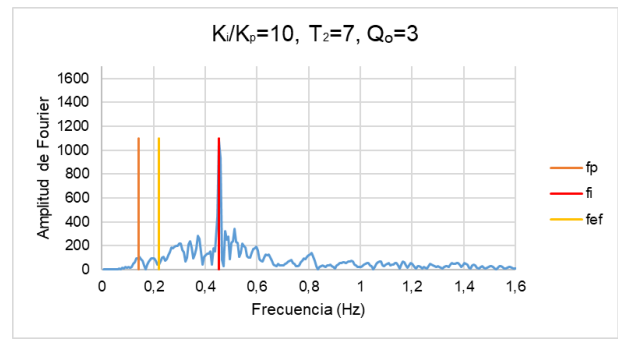


(b)

Figura A.8. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=5$ seg, $Q_0=3\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=5$ seg, $Q_0=4.5\%$ de W_s



(a)



(b)

Figura A.9. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=7$ seg, $Q_o=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=7$ seg, $Q_o=3\%$ de W_s

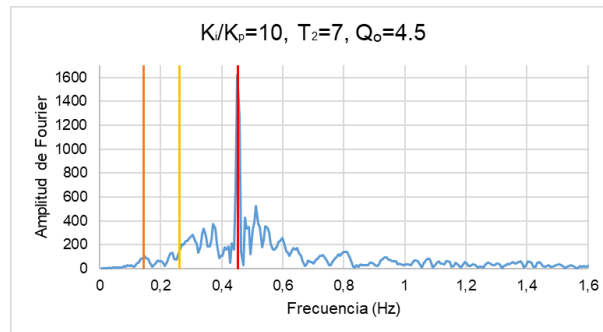


Figura A.10. Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=7$ seg, $Q_o=4.5\%$ de W_s .

$K_i/K_p=15$

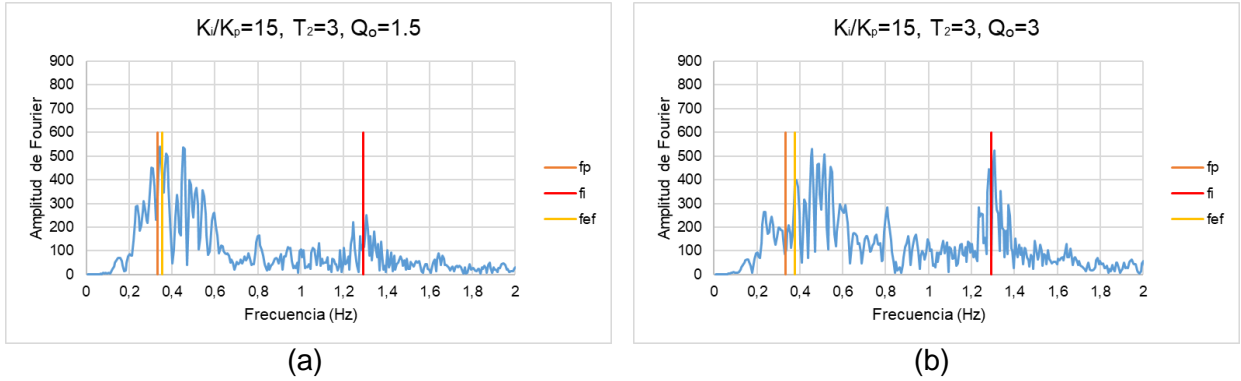


Figura A.11. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15, T_2=3$ seg, $Q_o=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15, T_2=3$ seg, $Q_o=3.0\%$ de W_s

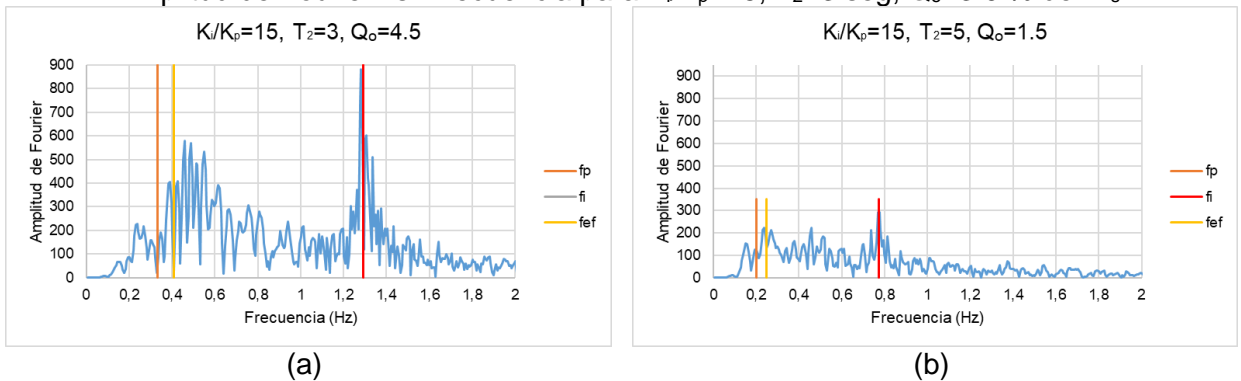


Figura A.12. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15, T_2=3$ seg, $Q_o=4.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15, T_2=5$ seg, $Q_o=1.5\%$ de W_s

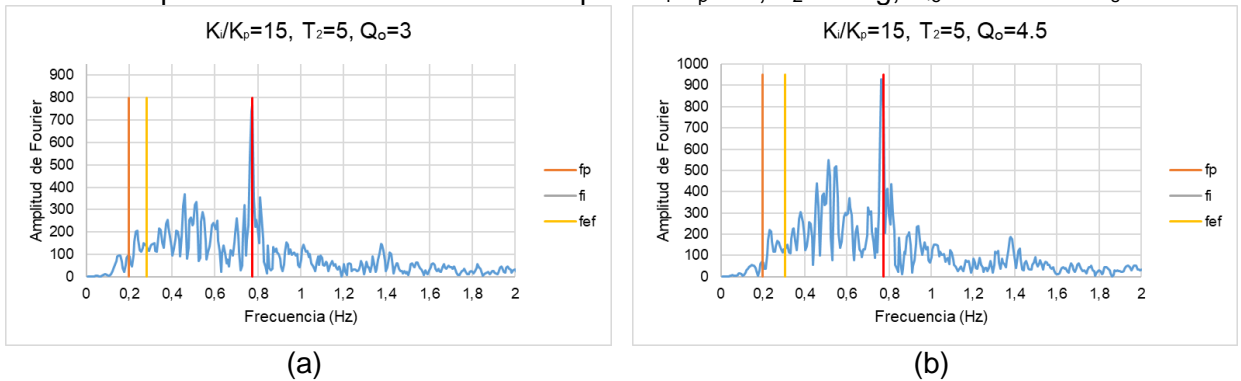
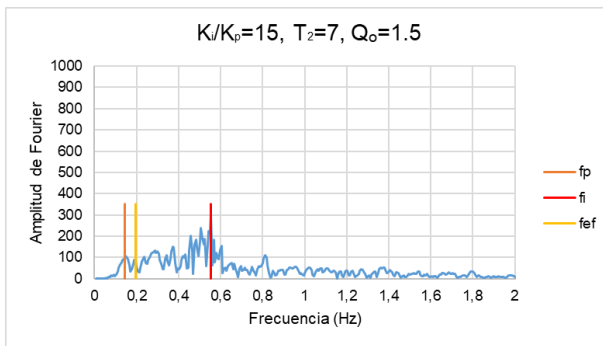
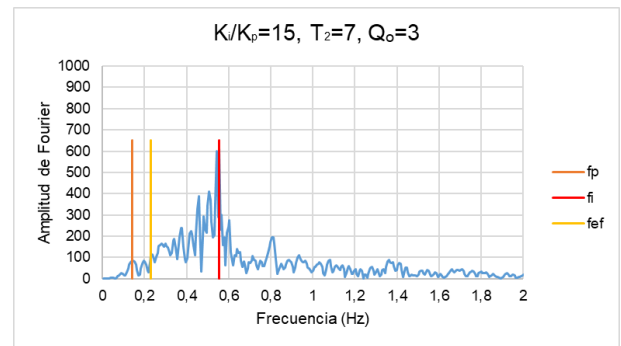


Figura A.13. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15, T_2=5$ seg, $Q_o=3\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15, T_2=5$ seg, $Q_o=4.5\%$ de W_s



(a)



(b)

Figura A.14. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=7$ seg, $Q_0=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=7$ seg, $Q_0=3\%$ de W_s

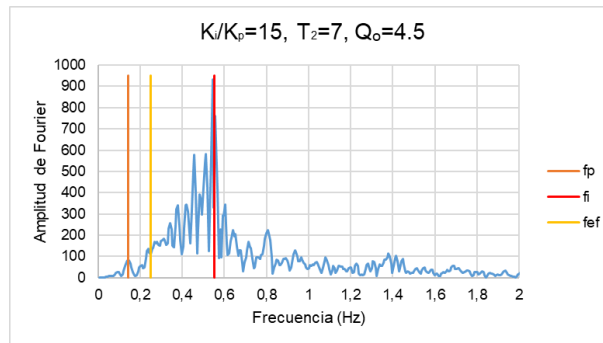
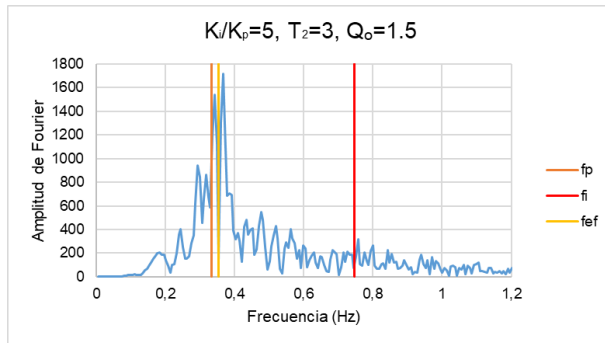


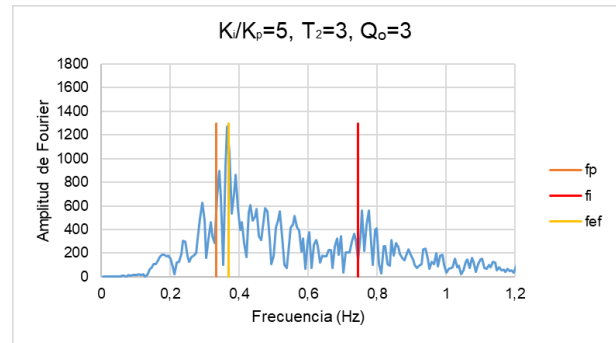
Figura A.15. Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=7$ seg, $Q_0=4.5\%$ de W_s .

Datos Constitución

$K_i/K_p=5$

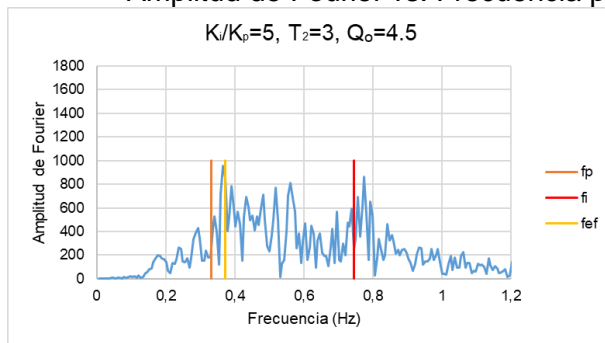


(a)

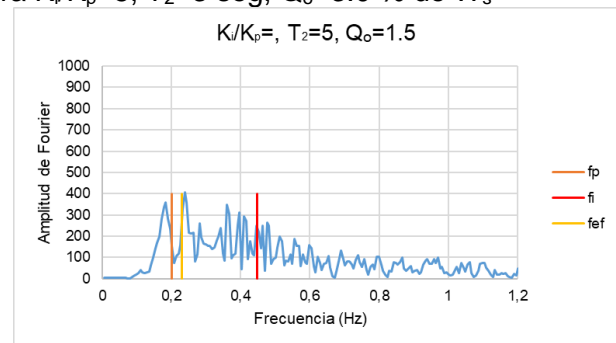


(b)

Figura A.16. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=3$ seg, $Q_o=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=3$ seg, $Q_o=3.0\%$ de W_s

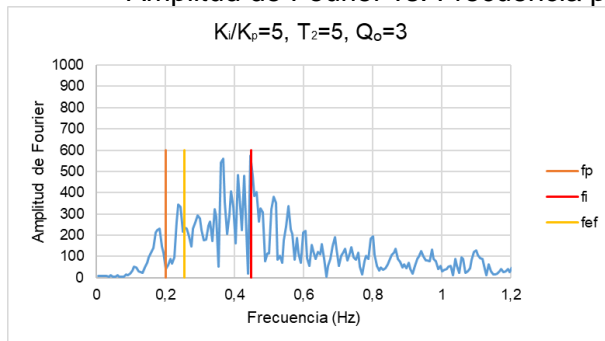


(a)

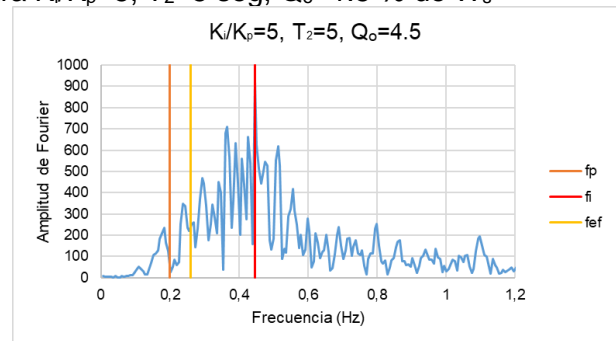


(b)

Figura A.17. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=3$ seg, $Q_o=4.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=5$ seg, $Q_o=1.5\%$ de W_s

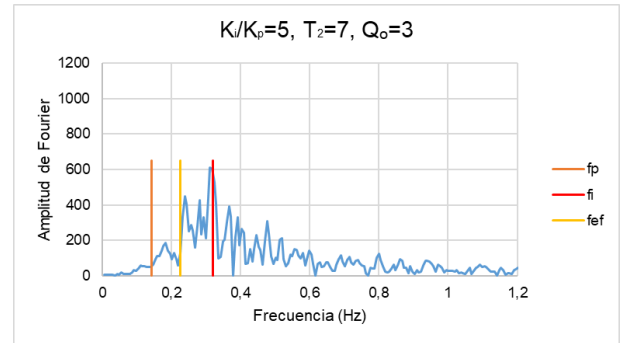
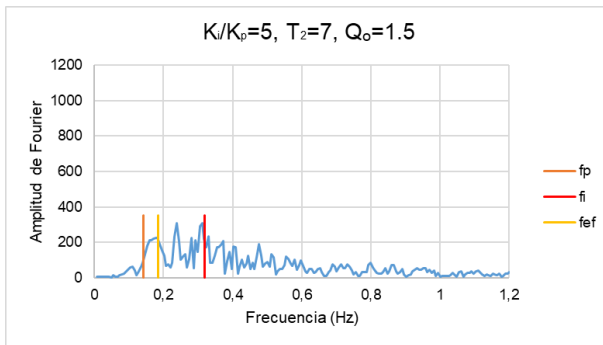


(a)



(b)

Figura A.18. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=5$ seg, $Q_o=3\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=5$ seg, $Q_o=4.5\%$ de W_s



(a)

(b)

Figura A.19. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=7$ seg, $Q_o=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=7$ seg, $Q_o=3\%$ de W_s

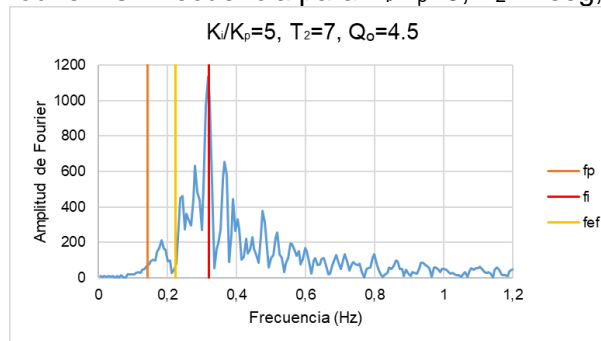
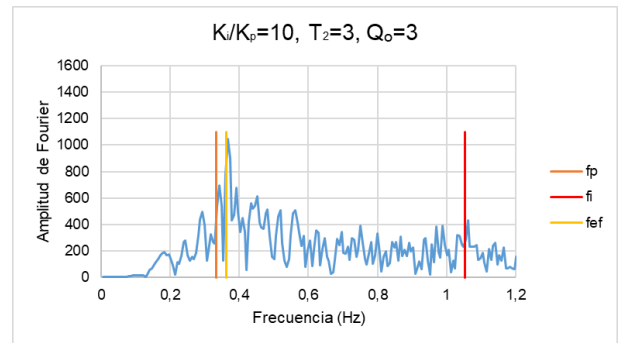
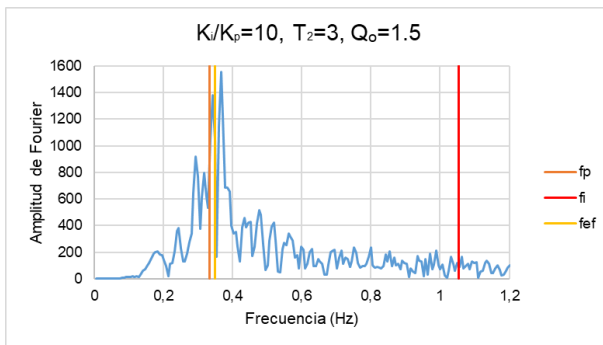


Figura A.20. Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=7$ seg, $Q_o=4.5\%$ de W_s .

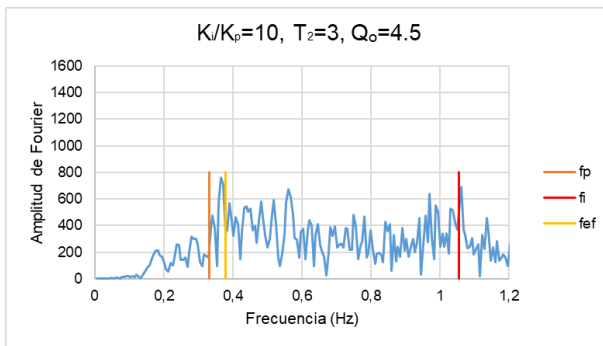
$K_i/K_p=10$



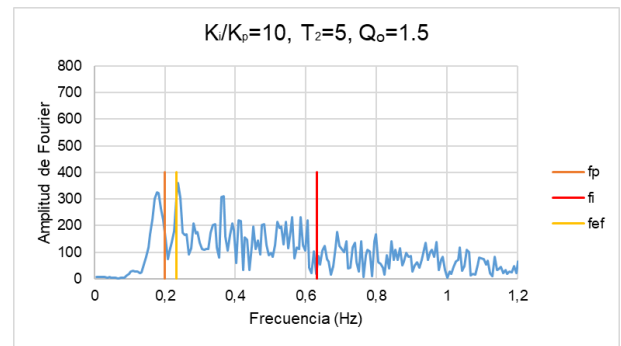
(a)

(b)

Figura A.21. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=3$ seg, $Q_o=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=3$ seg, $Q_o=3.0\%$ de W_s

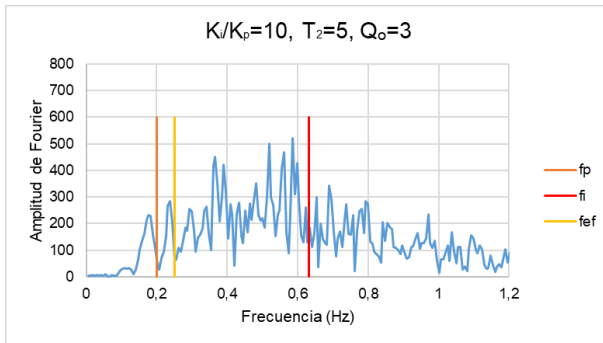


(a)

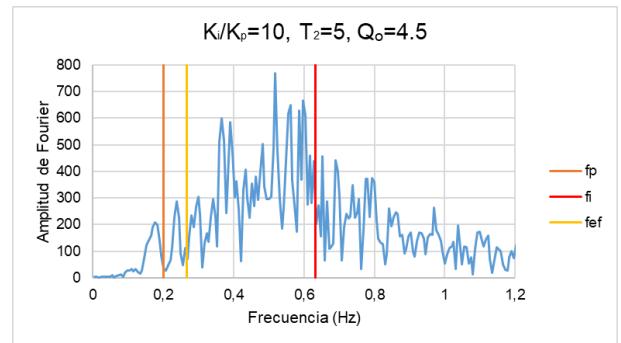


(b)

Figura A.22. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=3$ seg, $Q_0=4.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=5$ seg, $Q_0=1.5\%$ de W_s

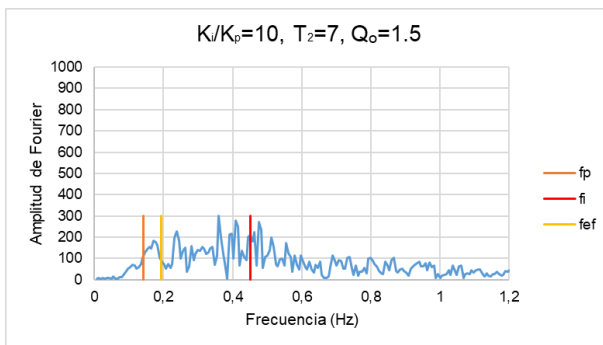


(a)

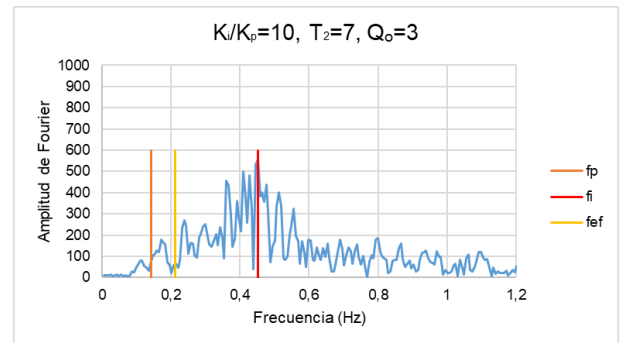


(b)

Figura A.23. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=5$ seg, $Q_0=3\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=5$ seg, $Q_0=4.5\%$ de W_s



(a)



(b)

Figura A.24. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=7$ seg, $Q_0=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=7$ seg, $Q_0=3\%$ de W_s

Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=7$ seg, $Q_0=3\%$ de W_s

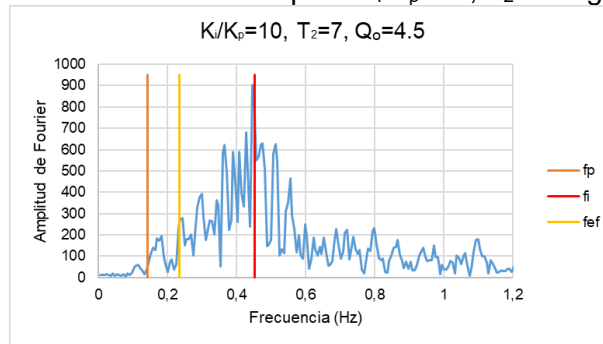


Figura A. 25. Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=7$ seg, $Q_0=4.5\%$ de W_s .

$K_i/K_p=15$

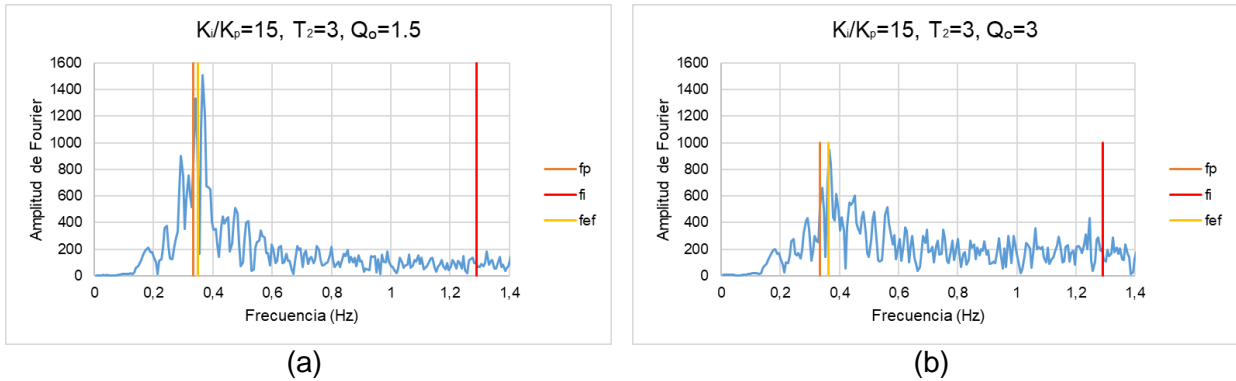


Figura A.26. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15, T_2=3$ seg, $Q_0=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15, T_2=3$ seg, $Q_0=3.0\%$ de W_s

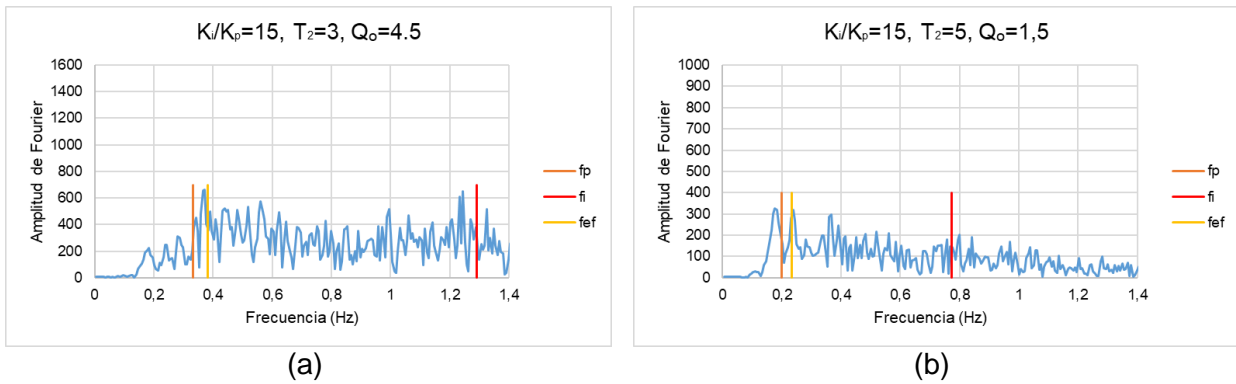


Figura A.27. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15, T_2=3$ seg, $Q_0=4.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15, T_2=5$ seg, $Q_0=1.5\%$ de W_s

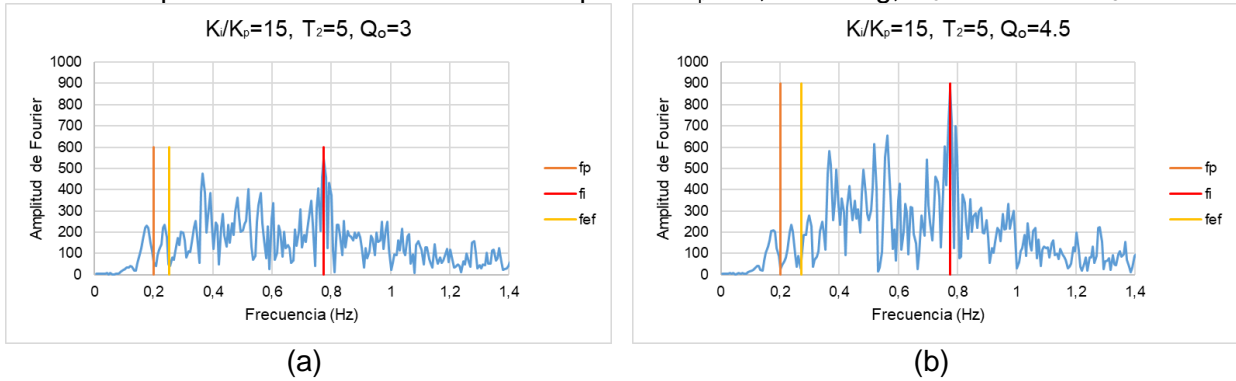


Figura A. 28. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15, T_2=5$ seg, $Q_0=3\%$ de W_s . (b)

Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=5$ seg, $Q_0=4.5\%$ de W_s

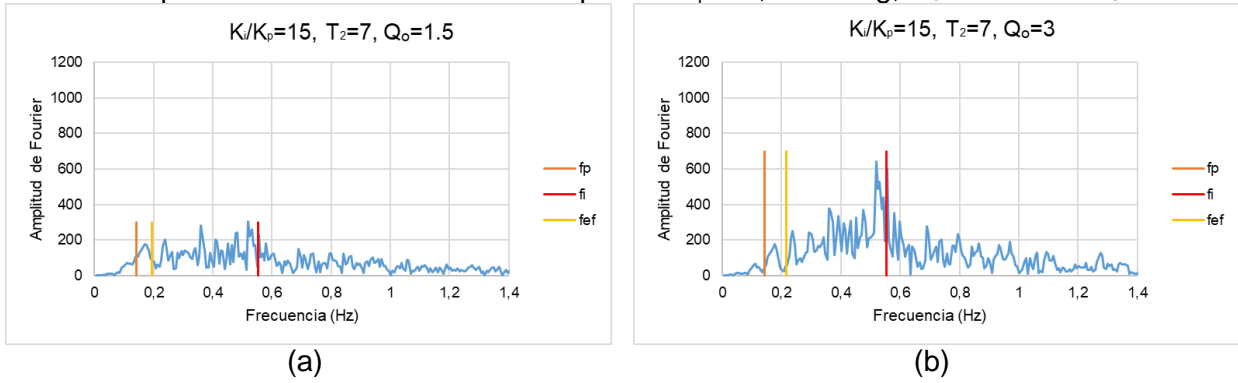


Figura A.29. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=7$ seg, $Q_0=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=7$ seg, $Q_0=3\%$ de W_s

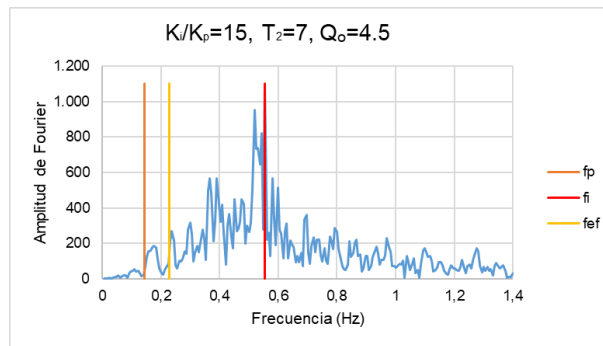
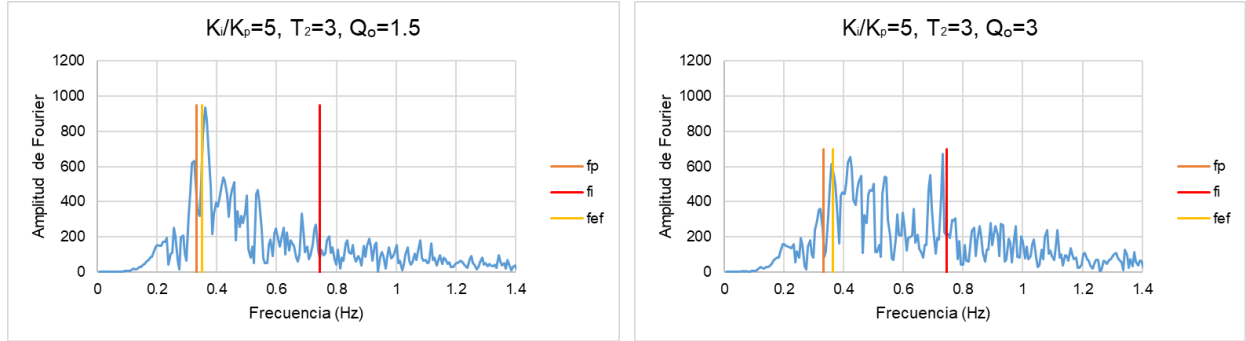


Figura A.30. Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=7$ seg, $Q_0=4.5\%$ de W_s .

Datos Talca

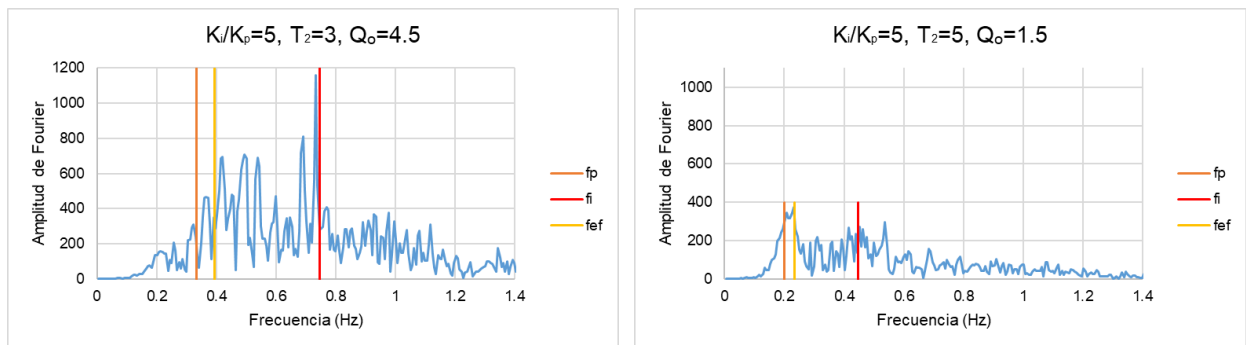
$K_i/K_p=5$



(a)

(b)

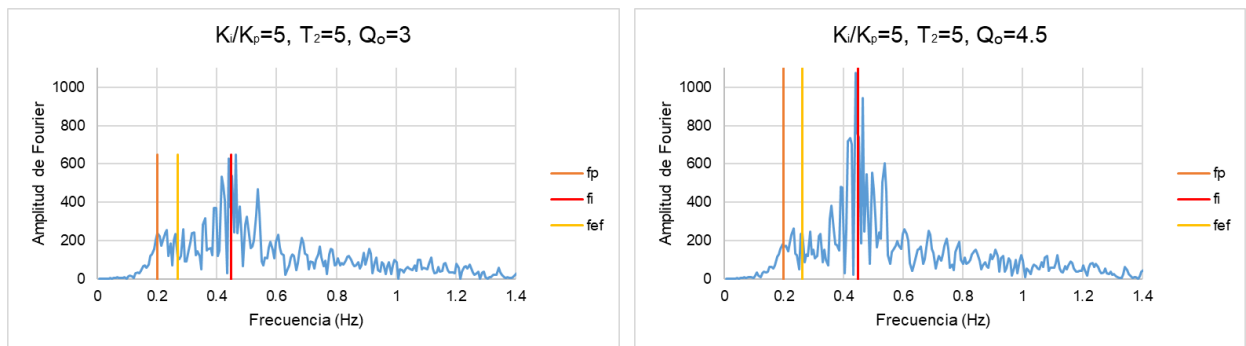
Figura A.31. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=3$ seg, $Q_0=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=3$ seg, $Q_0=3.0\%$ de W_s



(a)

(b)

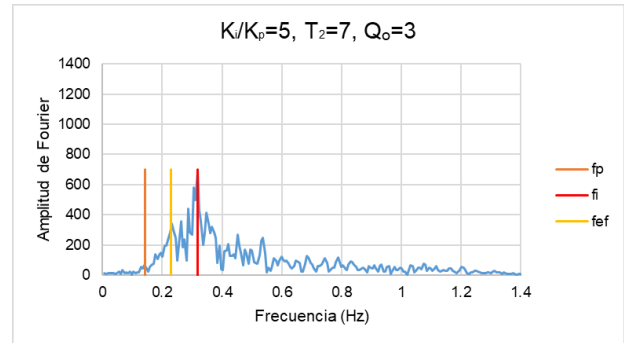
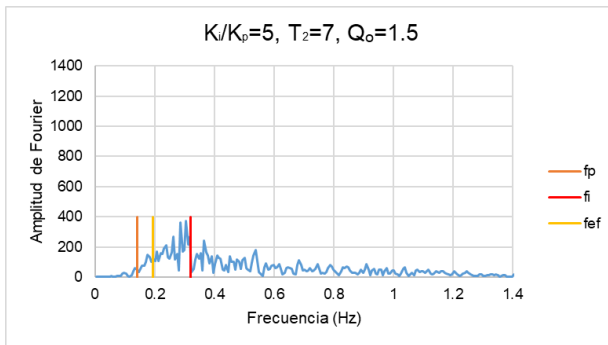
Figura A.32. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=3$ seg, $Q_0=4.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=5$ seg, $Q_0=1.5\%$ de W_s



(a)

(b)

Figura A.33. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=5$ seg, $Q_0=3\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=5$ seg, $Q_0=4.5\%$ de W_s



(a)

(b)

Figura A.34. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=7$ seg, $Q_o=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=7$ seg, $Q_o=3\%$ de W_s

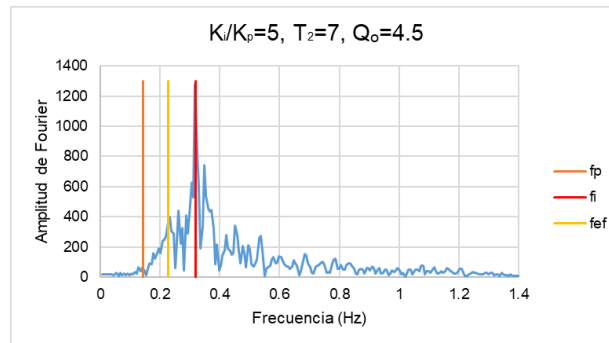
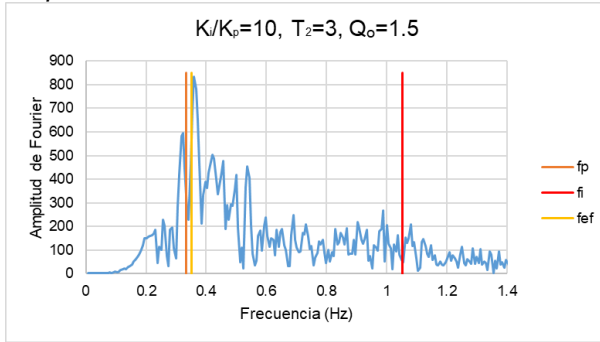
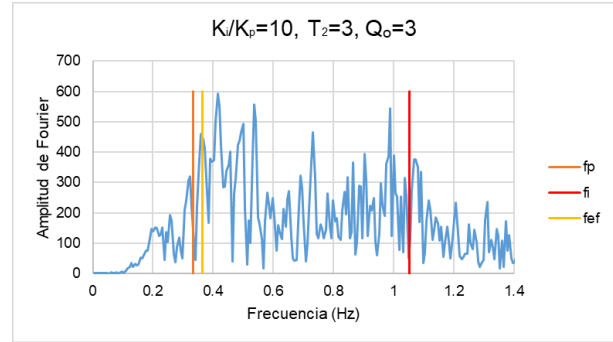


Figura A. 35. Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=5$, $T_2=7$ seg, $Q_o=4.5\%$ de W_s .

$K_i/K_p=10$

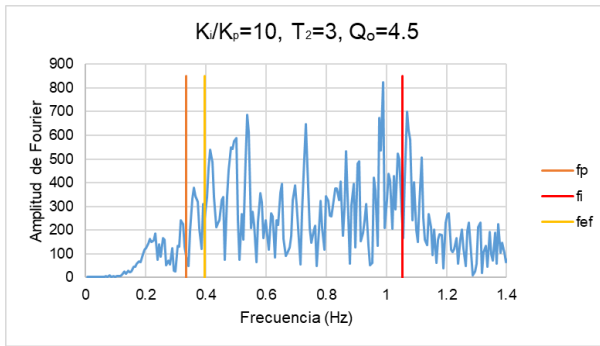


(a)

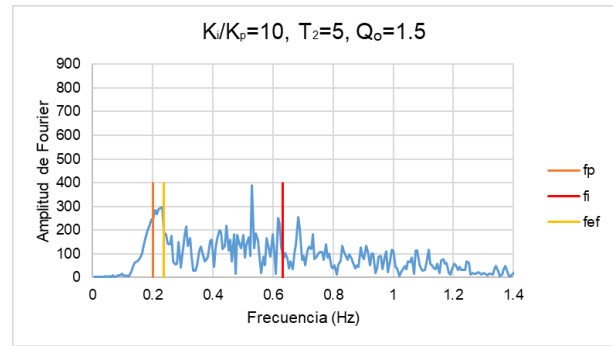


(b)

Figura A.36. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=3$ seg, $Q_o=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=3$ seg, $Q_o=3.0\%$ de W_s

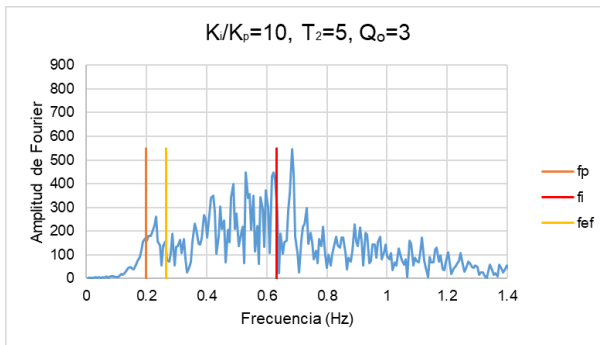


(a)

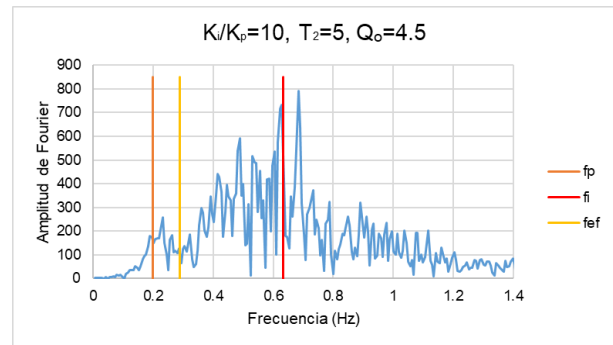


(b)

Figura A.37. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=3$ seg, $Q_o=4.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=5$ seg, $Q_o=1.5\%$ de W_s

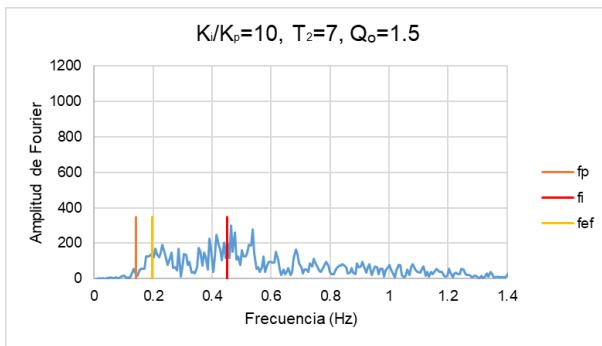


(a)

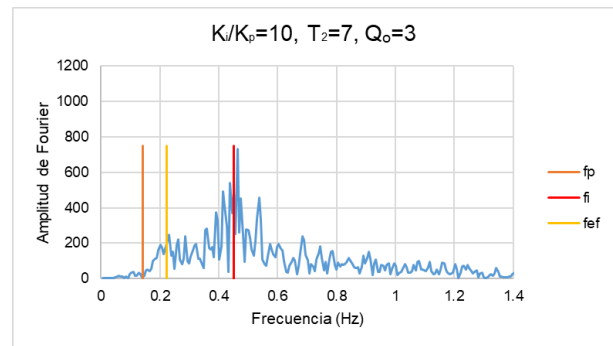


(b)

Figura A.38. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=5$ seg, $Q_o=3\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=5$ seg, $Q_o=4.5\%$ de W_s



(a)



(b)

Figura A.39. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=7$ seg, $Q_o=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=7$ seg, $Q_o=3\%$ de W_s

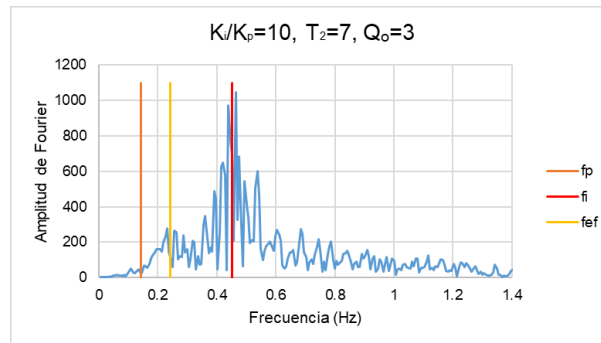
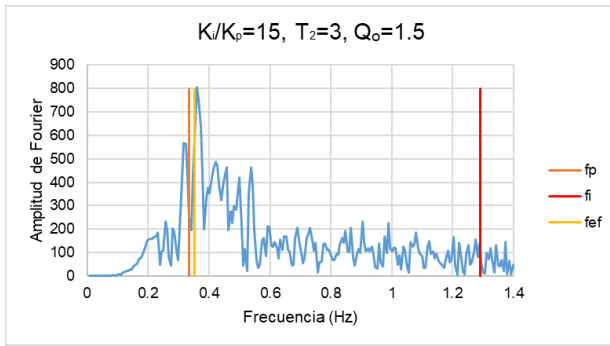
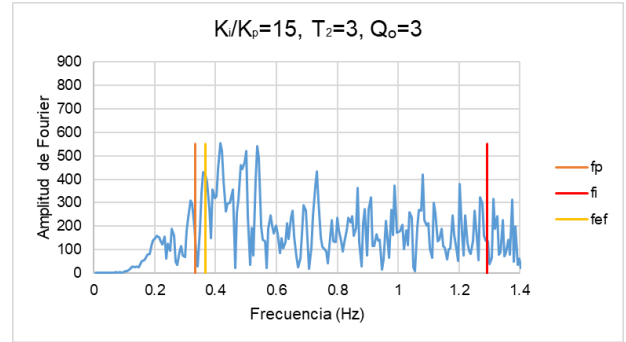


Figura A.40. Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=10$, $T_2=7$ seg, $Q_o=4.5\%$ de W_s .

$K_i/K_p=15$

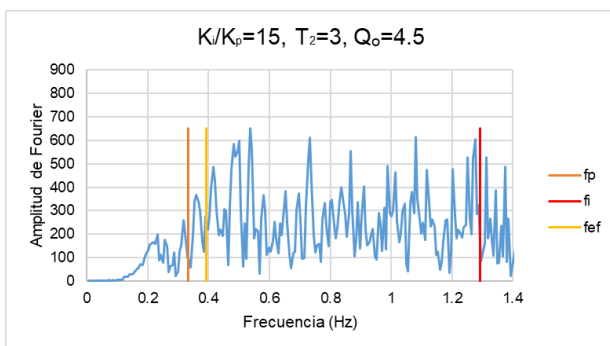


(a)

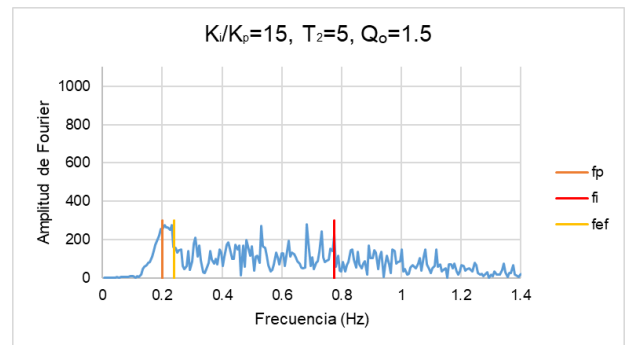


(b)

Figura A.41. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=3$ seg, $Q_o=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=3$ seg, $Q_o=3.0\%$ de W_s

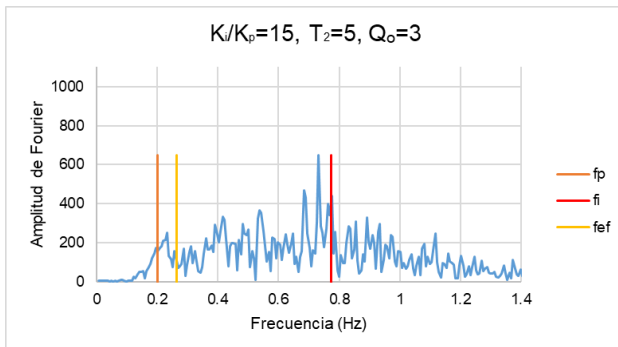


(a)

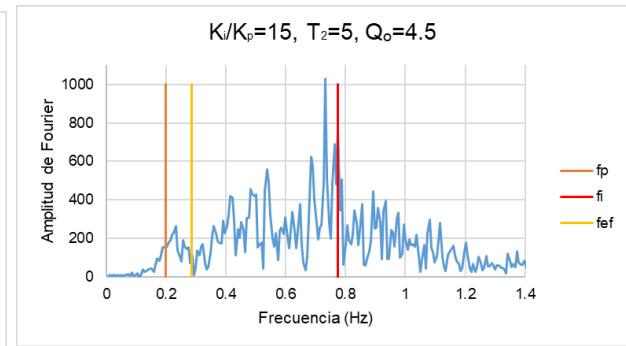


(b)

Figura A.42. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=3$ seg, $Q_o=4.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=5$ seg, $Q_o=1.5\%$ de W_s

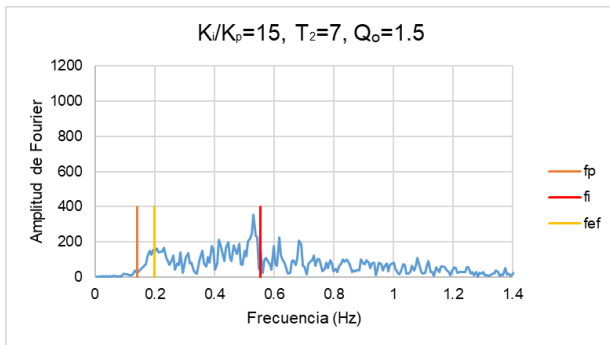


(a)

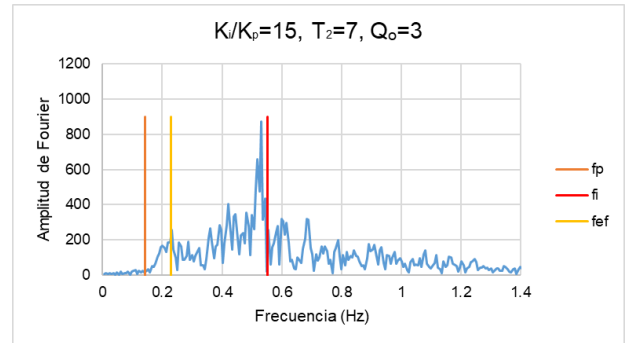


(b)

Figura A.43. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=5$ seg, $Q_o=3\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=5$ seg, $Q_o=4.5\%$ de W_s



(a)



(b)

Figura A.44. (a) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=7$ seg, $Q_o=1.5\%$ de W_s . (b) Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=7$ seg, $Q_o=3\%$ de W_s

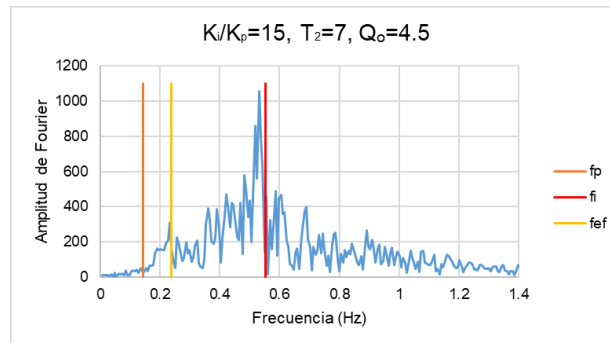


Figura A.45. Amplitud de Fourier vs. Frecuencia para $K_i/K_p=15$, $T_2=7$ seg, $Q_o=4.5\%$ de W_s .

10.2. Anexo B. Tasa de amortiguamiento de aisladores sísmicos obtenidos a partir de ensayos de laboratorio a bajas deformaciones.

Tabla B.1 Valores de tasa de amortiguamiento para Aislador 1

Aislador 1					
Cycle	Dmax(cm)	Keff(Ton/cm)	Q (Ton)	EDC(Ton*cm)	beta()
1	2.15	3.15	3.17	17.50	0.191
2	2.18	3.49	2.37	19.80	0.190
3	2.18	3.51	2.18	18.20	0.174
4	2.18	3.53	2.05	17.70	0.168
5	2.21	3.51	2.03	17.80	0.165
6	2.17	3.50	1.90	16.60	0.160
7	2.20	3.49	1.96	17.10	0.161
8	2.21	3.49	1.95	17.30	0.162
9	2.27	3.43	2.01	17.90	0.161
10	2.16	3.42	1.82	15.70	0.157
11	2.20	3.44	1.89	16.40	0.157
12	2.17	3.45	1.83	15.70	0.154
13	2.27	3.42	2.02	17.60	0.159
14	2.20	3.45	1.87	16.60	0.158
15	2.28	3.40	2.00	17.50	0.158
16	2.23	3.42	1.92	16.80	0.157
17	2.21	3.39	1.88	16.30	0.157
18	2.28	3.35	2.00	17.40	0.159
19	2.27	3.38	1.97	17.40	0.159
20	2.24	3.40	1.92	17.00	0.159
21	2.22	3.39	1.82	16.30	0.155
Prom.	2.21	3.43	2.03	17.17	0.163

Tabla B.2 Valores de tasa de amortiguamiento para Aislador 2

Aislador 2					
Cycle	Dmax(cm)	Keff(Ton/cm)	Q (Ton)	EDC(Ton*cm)	beta()
1	1.72	21.4	33.32	153.8	0.387
2	1.77	25.65	38.68	205.7	0.408
3	1.81	26.42	40.53	219.2	0.403
4	1.8	27.18	41.46	223.2	0.404
5	1.8	27.57	41.97	228.3	0.407
6	1.81	27.78	42.25	229.8	0.402
7	1.8	28.06	42.36	226.7	0.397
8	1.79	28.14	42.39	226.5	0.400
9	1.8	28.04	42.42	229.1	0.402
10	1.81	27.92	42.3	228.9	0.398
11	1.8	27.9	42.05	227.5	0.401
12	1.8	27.82	41.76	225.6	0.399
13	1.81	27.52	41.5	226.7	0.400
14	1.74	28.05	40.73	213.5	0.400
15	1.75	27.75	40.37	212.8	0.399
16	1.76	27.35	40.11	213.9	0.402
17	1.75	27.29	39.63	210.6	0.401
18	1.76	26.87	39.33	211.5	0.405
19	1.75	26.83	38.85	207.5	0.402
20	1.76	26.47	38.52	207.9	0.404
21	1.77	26.15	38.02	207.8	0.404
Prom.	1.78	27.06	40.41	216.0	0.401

Tabla B.3 Valores de tasa de amortiguamiento para Aislador 3

Aislador 3					
Cycle	Dmax(cm)	Keff(Ton/cm)	Q (Ton)	EDC(Ton*cm)	beta()
1	1.81	1.28	0.29	1.1	0.042
2	1.87	1.28	0.3	1.1	0.039
3	1.81	1.27	0.3	1	0.038
4	1.81	1.28	0.3	1	0.038
5	1.81	1.27	0.3	1	0.038
6	1.81	1.27	0.3	1	0.038
7	1.88	1.27	0.31	1.1	0.039
8	1.8	1.27	0.3	1	0.039
9	1.81	1.27	0.3	1	0.038
10	1.88	1.27	0.3	1.1	0.039
11	1.81	1.27	0.3	1	0.038
12	1.81	1.27	0.3	1	0.038
13	1.82	1.26	0.3	1	0.038
14	1.82	1.27	0.29	1	0.038
15	1.82	1.27	0.3	1	0.038
16	1.88	1.27	0.3	1.1	0.039
17	1.81	1.27	0.29	1	0.038
18	1.81	1.27	0.29	1	0.038
19	1.81	1.27	0.3	1	0.038
20	1.88	1.27	0.3	1.1	0.039
21	1.82	1.27	0.3	1	0.038
Prom.	1.83	1.27	0.30	1.0	0.039

Tabla B.4 Valores de tasa de amortiguamiento para Aislador 4

Aislador 4					
Cycle	Dmax(cm)	Keff(Ton/cm)	Q (Ton)	EDC(Ton*cm)	beta()
1	1.86	2.41	1.79	1.8	0.034
2	1.8	2.4	1.76	1.7	0.035
3	1.8	2.4	1.75	1.6	0.033
4	1.8	2.4	1.75	1.7	0.035
5	1.8	2.39	1.75	1.7	0.035
6	1.8	2.39	1.75	1.7	0.035
7	1.8	2.39	1.74	1.7	0.035
8	1.8	2.39	1.74	1.7	0.035
9	1.8	2.38	1.75	1.7	0.035
10	1.8	2.39	1.74	1.7	0.035
11	1.8	2.39	1.74	1.6	0.033
12	1.8	2.39	1.74	1.6	0.033
13	1.8	2.39	1.74	1.6	0.033
14	1.87	2.4	1.75	1.8	0.034
15	1.86	2.4	1.75	1.8	0.035
16	1.86	2.4	1.75	1.8	0.035
17	1.86	2.4	1.75	1.8	0.035
18	1.86	2.39	1.75	1.8	0.035
19	1.86	2.39	1.75	1.7	0.033
20	1.8	2.4	1.75	1.6	0.033
21	1.79	2.4	1.77	1.6	0.033
Prom.	1.82	2.39	1.75	1.7	0.034

Tabla B.5 Valores de tasa de amortiguamiento para Aislador 5

Aislador 5					
Cycle	Dmax(cm)	Keff(kN/cm)	Q (kN)	EDC(kN*cm)	beta)
1	0.95	91.98	65.51	153.2	0.294
2	1.11	105.49	79.73	262.5	0.322
3	1.12	109.87	82.95	279.7	0.323
4	1.11	112.2	84.11	282.5	0.325
5	1.11	113.34	84.67	284.4	0.324
6	1.05	118.75	82.28	260.4	0.317
7	1.05	118.76	82.33	257.6	0.313
8	1.04	119.07	82.23	257.1	0.318
9	1.11	115.23	85.57	286.2	0.321
10	1.11	115.63	85.72	286.6	0.320
11	1.11	115.71	85.74	285.7	0.319
12	1.11	115.66	85.84	286.6	0.320
13	1.11	115.78	85.68	286.4	0.320
14	1.11	115.8	85.54	286	0.319
15	1.05	120.51	82.59	261.2	0.313
16	1.04	120.16	82.27	257.4	0.315
17	1.04	119.65	81.99	256.5	0.316
18	1.04	119.6	81.87	256.9	0.316
19	1.11	114.91	84.88	286.9	0.323
20	1.1	115.54	84.57	278.2	0.317
Prom.	1.08	114.68	82.80	267.60	0.318

Tabla B.6 Valores de tasa de amortiguamiento para Aislador 6

Aislador 6					
Cycle	Dmax(cm)	Keff(kN/cm)	Q (kN)	EDC(kN*cm)	beta()
1	1.5	166.61	210.43	767.8	0.326
2	1.56	191.74	231.63	1028	0.351
3	1.55	197.81	234.38	1029.7	0.345
4	1.55	200.96	235.41	1030.4	0.340
5	1.56	201.08	236.69	1037.4	0.338
6	1.56	201.49	236.68	1036.1	0.336
7	1.56	202.67	236.28	1031.3	0.333
8	1.56	202.72	237.11	1033.7	0.334
9	1.55	203.95	236.68	1030.3	0.335
10	1.56	203.75	236.83	1021.1	0.328
11	1.55	204.31	236.48	1016.4	0.330
12	1.61	199.45	243.75	1107.9	0.341
13	1.61	199.44	243.16	1105	0.340
14	1.56	205.18	238.51	1052.4	0.336
15	1.55	204.61	237.56	1040.4	0.337
16	1.55	203.89	237.02	1034.3	0.336
17	1.55	203.83	237.07	1036.4	0.337
18	1.55	202.97	237.11	1037.3	0.339
19	1.56	201.4	237.53	1047.2	0.340
20	1.56	201.09	237.15	1045.6	0.340
21	1.56	200.69	236.18	1030.5	0.336
Prom.	1.56	199.98	235.89	1028.5	0.337

Tabla B.7 Valores de tasa de amortiguamiento para Aislador 7

Aislador 7					
Cycle	Dmax(cm)	Keff(kN/cm)	Q (kN)	EDC(kN*cm)	beta()
1	1.58	11.06	8.72	8.9	0.051
2	1.59	11.01	8.77	9.3	0.053
3	1.6	10.94	8.84	8.9	0.051
4	1.66	10.97	8.79	9.2	0.048
5	1.6	10.92	8.76	8.7	0.050
6	1.59	10.93	8.83	9	0.052
7	1.6	10.93	8.9	8.6	0.049
8	1.59	10.89	8.77	8.8	0.051
9	1.58	10.91	8.75	8.6	0.050
10	1.59	10.93	8.79	9	0.052
11	1.66	10.97	8.74	9.3	0.049
12	1.6	10.85	8.74	8.9	0.051
13	1.59	10.92	8.73	9.2	0.053
14	1.59	10.94	8.79	8.6	0.050
15	1.66	10.92	8.75	9.2	0.049
16	1.59	10.93	8.75	8.6	0.050
17	1.59	10.91	8.79	9	0.052
18	1.66	10.92	8.79	9.8	0.052
19	1.59	10.87	8.76	8.9	0.052
20	1.59	10.95	8.75	9.2	0.053
21	1.6	10.9	8.73	8.8	0.050
Prom.	1.60	10.93	8.77	9.0	0.051

Tabla B.8 Valores de tasa de amortiguamiento para Aislador 8

Aislador 8					
Cycle	Dmax(cm)	Keff(kN/cm)	Q (kN)	EDC(kN*cm)	beta()
1	1.57	41.01	32.36	141.3	0.223
2	1.58	41.38	32.28	155.1	0.239
3	1.64	40.87	33.39	167.1	0.242
4	1.57	41.99	32.35	153.6	0.236
5	1.57	41.86	32.27	154.1	0.238
6	1.64	41.14	33.34	166.4	0.239
7	1.64	41.19	33.36	164.3	0.236
8	1.57	42.15	32.35	155.2	0.238
9	1.57	41.98	32.05	153.4	0.236
10	1.63	41.4	33.15	164.1	0.238
11	1.58	42.16	32.24	153.1	0.232
12	1.57	42.03	32.05	153.3	0.236
13	1.65	41.18	33.17	165.8	0.235
14	1.58	42.1	32.2	153.4	0.232
15	1.57	41.93	31.99	153.5	0.236
16	1.65	41.15	33.2	165.1	0.235
17	1.58	42.06	32.08	153	0.232
18	1.57	41.83	32.03	153.9	0.238
19	1.64	41.11	33.08	165.8	0.239
20	1.57	42.09	32.03	153.1	0.235
21	1.57	41.79	31.97	153.9	0.238
Prom.	1.60	41.64	32.52	157.1	0.236

Tabla B.9 Valores de tasa de amortiguamiento para Aislador 9

Aislador 9					
Cycle	Dmax(cm)	Keff(kN/cm)	Q (kN)	EDC(kN*cm)	beta()
1	1.71	56.09	35.61	185.2	0.180
2	1.78	58.97	28.87	206.5	0.176
3	1.76	59.71	26.16	190.4	0.164
4	1.71	60.53	23.25	168.1	0.151
5	1.7	60.38	22.71	163.5	0.149
6	1.71	60.34	22.36	164.7	0.149
7	1.7	60.26	22.43	162.4	0.148
8	1.7	60.35	21.99	163.7	0.149
9	1.7	60.03	22.08	161.7	0.148
10	1.71	30.21	21.91	160.1	0.289
11	1.77	59.05	24.21	172.6	0.149
12	1.77	59.34	24.26	179.5	0.154
13	1.78	59.34	23.75	179.3	0.152
14	1.77	59.51	23.99	178.7	0.153
15	1.79	59.29	23.97	179.9	0.151
16	1.76	59.6	23.61	175.7	0.152
17	1.7	60.49	21.91	160	0.146
18	1.7	60.4	21.53	158	0.144
19	1.7	60.52	21.3	157	0.143
20	1.7	60.18	21.37	160	0.146
21	1.71	60.26	21.26	159	0.144
Prom.	1.73	58.33	23.74	170.8	0.159

Tabla B.10 Valores de tasa de amortiguamiento para Aislador 10

Aislador 10					
Cycle	Dmax(cm)	Keff(kN/cm)	Q (kN)	EDC(kN*cm)	beta()
1	0.94	106.7	43.91	116	0.196
2	1.08	102.58	55.29	182.7	0.243
3	1.02	107.47	49.67	161.9	0.231
4	1.01	107.22	49.77	156.7	0.228
5	1.07	104.67	54.85	181.7	0.241
6	1.02	109.38	49.93	162.7	0.228
7	1.02	107.91	50.25	157.9	0.224
8	1.01	108.24	50.39	158.5	0.229
9	1.02	107.74	51.01	162.9	0.231
10	1.08	105.07	56.57	186	0.242
11	1.01	109.67	50.59	163.9	0.233
12	1.02	108.51	51.14	160.1	0.226
13	1.01	108.43	51.33	163.3	0.235
14	1.08	105.15	57.2	184.6	0.240
15	1.01	109.94	51.24	165.8	0.235
16	1.02	108.51	51.97	164.1	0.231
17	1.08	105.26	57.6	184.5	0.239
18	1.02	109.7	51.76	166.1	0.232
19	1.02	108.44	53.21	167.9	0.237
20	1.08	105.55	58.27	190.4	0.246
21	1.02	109.76	52.23	167	0.233
Prom.	1.03	107.42	52.29	166.9	0.232

Tabla B.11 Valores de tasa de amortiguamiento para Aislador 11

Aislador 11					
Cycle	Dmax(cm)	Keff(kN/cm)	Q (kN)	EDC(kN*cm)	beta()
1	2.12	118.55	185.98	1099.9	0.329
2	2.13	131.95	198.36	1303.4	0.347
3	2.12	136.22	202.44	1345.9	0.350
4	2.06	141.47	200.64	1301.6	0.345
5	2.06	141.91	202.05	1304.1	0.345
6	2.05	142.61	202	1292.5	0.343
7	2.12	140.12	205.31	1355.5	0.343
8	2.13	140.13	205.65	1373.7	0.344
9	2.05	144.25	202.04	1309.9	0.344
10	2.06	143.53	202.5	1307.5	0.342
11	2.06	143.28	201.88	1295	0.339
12	2.12	140.69	204.45	1365.6	0.344
13	2.12	140.98	203.94	1361.9	0.342
14	2.06	143.96	200.15	1307.9	0.341
15	2.06	143.26	200.26	1288.3	0.337
16	2.05	143.17	199.03	1278.2	0.338
17	2.12	139.9	201.42	1339.7	0.339
18	2.13	139.54	200.9	1349.6	0.339
19	2.06	142.95	196.82	1287.4	0.338
20	2.06	141.95	196.3	1267.1	0.335
21	2.07	141.03	194.05	1275.1	0.336
Prom.	2.09	140.07	200.29	1305.2	0.341

Tabla B.12 Valores de tasa de amortiguamiento para Aislador 12

Aislador 12					
Cycle	Dmax(cm)	Keff(kN/cm)	Q (kN)	EDC(kN*cm)	beta()
1	1.06	14.35	1.23	13.49	0.133
2	1.08	13.82	1.08	13.1	0.129
3	1.12	13.68	1.09	12.96	0.120
4	1.1	13.69	1.14	12.97	0.125
5	1.1	13.7	1.12	13	0.125
6	1.1	13.62	1.12	12.91	0.125
7	1.1	13.59	1.14	12.89	0.125
8	1.11	13.63	1.17	12.93	0.123
9	1.12	13.62	1.13	12.93	0.121
10	1.11	13.62	1.13	12.93	0.123
11	1.13	13.64	1.17	12.95	0.118
12	1.11	13.67	1.14	12.99	0.123
13	1.12	13.72	1.13	13.03	0.121
14	1.13	13.7	1.21	13.01	0.118
15	1.12	13.7	1.19	13.02	0.121
16	1.13	13.67	1.18	12.99	0.119
17	1.13	13.41	1.21	12.71	0.118
18	1.14	13.54	1.21	12.86	0.116
19	1.11	13.6	1.21	12.92	0.123
20	1.13	13.6	1.23	12.92	0.118
21	1.1	13.34	1.21	12.64	0.125
Prom.	1.11	13.66	1.16	13.0	0.122

Tabla B.13 Valores de tasa de amortiguamiento para Aislador 13

Aislador 13					
Cycle	Dmax(cm)	Keff(kN/cm)	Q (kN)	EDC(kN*cm)	beta()
1	1.11	164.1	127.59	351.9	0.277
2	1.18	177.07	139.92	475.8	0.307
3	1.24	175.8	146.3	522.4	0.308
4	1.24	177.47	146.97	529.8	0.309
5	1.18	185.41	142.53	488.7	0.301
6	1.17	186.13	141.83	470.1	0.294
7	1.17	186.6	141.52	471.3	0.294
8	1.25	179.42	147.81	518.6	0.295
9	1.24	180.82	147.71	526.2	0.301
10	1.18	186.92	142.51	478.7	0.293
11	1.17	186.66	141.71	468.7	0.292
12	1.25	178.74	148.12	520.5	0.297
13	1.24	179.74	147.47	518.7	0.299
14	1.18	185.84	142.9	479.3	0.295
15	1.17	185.07	142.28	473.7	0.298
16	1.25	178.13	147.54	522.1	0.299
17	1.25	177.74	148.11	531.4	0.305
18	1.18	184.44	142.84	480.6	0.298
19	1.18	183	142.41	478.2	0.299
20	1.17	182.66	142.08	476.2	0.303
21	1.24	176.33	147.46	523	0.307
Prom.	1.20	180.86	143.70	490.8	0.299

Tabla B.14 Valores de tasa de amortiguamiento para Aislador 14

Aislador 14					
Cycle	Dmax(cm)	Keff(kN/cm)	Q (kN)	EDC(kN*cm)	beta()
1	1.21	194.76	173.58	561	0.313
2	1.21	227.84	186.31	684.4	0.327
3	1.2	239.63	194.51	712	0.329
4	1.25	241.34	205.28	779.6	0.329
5	1.19	257.32	203.68	729.8	0.319
6	1.19	259.85	207.83	722.5	0.313
7	1.19	262.76	209.77	726.2	0.311
8	1.19	264.55	211.52	732.1	0.311
9	1.18	266.75	212.48	743.6	0.319
10	1.19	267.9	213.48	746.6	0.313
11	1.18	269.43	214.05	744.9	0.316
12	1.18	270.6	214.31	747.9	0.316
13	1.25	262.77	221.76	811.3	0.315
14	1.18	273.58	215.36	738.7	0.309
15	1.18	272.21	216.21	737.7	0.310
16	1.18	271.08	215.94	749.4	0.316
17	1.18	271.08	215.45	746	0.315
18	1.18	271.37	215.59	746.2	0.314
19	1.18	270.38	215.7	749.3	0.317
20	1.18	270.11	215.22	746.3	0.316
21	1.18	271.96	214.72	751.9	0.316
Prom.	1.19	259.87	209.18	733.7	0.316

Tabla B.15 Valores de tasa de amortiguamiento para Aislador 15

Aislador 15					
Cycle	Dmax(cm)	Keff(Ton/cm)	Q (Ton)	EDC(Ton*cm)	beta()
1	2.27	15.5	24	150.5	0.300
2	2.26	18.23	25.15	183.1	0.313
3	2.31	18.74	26.55	195.9	0.312
4	2.24	19.61	27.01	191.1	0.309
5	2.3	19.69	27.92	202.3	0.309
6	2.29	20.07	28.42	204.7	0.310
7	2.23	20.57	28.51	196.7	0.306
8	2.29	20.42	29.03	206.8	0.308
9	2.29	20.61	29.27	207.1	0.305
10	2.28	20.66	29.45	208.7	0.309
11	2.29	20.79	29.54	209.7	0.306
12	2.28	20.84	29.56	208.1	0.306
13	2.28	20.82	29.64	209.4	0.308
14	2.28	20.84	29.6	210.2	0.309
15	2.23	21.07	29.24	200.6	0.305
16	2.28	20.75	29.46	209.5	0.309
17	2.29	20.75	29.37	209.7	0.307
18	2.23	20.99	29.17	200.5	0.306
19	2.28	20.63	29.21	209.2	0.311
20	2.29	20.55	29.05	209	0.309
21	2.23	20.74	28.64	199.6	0.308
Prom.	2.27	20.14	28.47	201.1	0.308

10.3. Anexo C. Tasa de amortiguamiento aisladores sísmicos obtenidos a partir de registros sísmicos

Tasa de amortiguamiento mediante el uso de espectros de potencia para registros sísmicos obtenidos en estructuras con aislación sísmica, sobre y debajo el sistema de aislación en la zona central de Chile, las cuales son permanentemente monitoreadas por sensores ubicados en diferentes puntos de los edificios y que captan diariamente las señales generadas por ruido ambiental o sismos. Para el edificio #1 se considera la información registrada por 4 sensores ubicados en dos puntos diferentes (Oriente y Poniente) para las direcciones X e Y. Para el edificio #2 se considera la información registrada por 2 sensor, ubicados sobre y debajo el sistema de aislación sísmica para las direcciones X e Y.

Tabla C.1. Tabla de amortiguamiento para Edificio 1

Registro	Dirección	β (%)	Registro	Dirección	β (%)
20160209	Oriente-Arriba X	3.75	20161208	Oriente-Arriba X	3.45
	Oriente-Abajo X			Oriente-Abajo X	
	Oriente-Arriba Y	4.37		Oriente-Arriba Y	3.33
	Oriente-Abajo Y			Oriente-Abajo Y	
	Poniente-Arriba X	3.93		Poniente-Arriba X	2.71
	Poniente-Abajo X			Poniente-Abajo X	
	Poniente-Arriba Y	3.77		Poniente-Arriba Y	5.82
	Poniente-Abajo Y			Poniente-Abajo Y	
20160414	Oriente-Arriba X	1.72	20170331	Oriente-Arriba X	8.90
	Oriente-Abajo X			Oriente-Abajo X	
	Oriente-Arriba Y	3.86		Oriente-Arriba Y	8.65
	Oriente-Abajo Y			Oriente-Abajo Y	
	Poniente-Arriba X	6.90		Poniente-Arriba X	7.73
	Poniente-Abajo X			Poniente-Abajo X	
	Poniente-Arriba Y	4.38		Poniente-Arriba Y	5.18
	Poniente-Abajo Y			Poniente-Abajo Y	
20160810	Oriente-Arriba X	5.01	20170422_ 233457	Oriente-Arriba X	6.81
	Oriente-Abajo X			Oriente-Abajo X	
	Oriente-Arriba Y	3.16		Oriente-Arriba Y	6.91
	Oriente-Abajo Y			Oriente-Abajo Y	
	Poniente-Arriba X	5.81		Poniente-Arriba X	6.20
	Poniente-Abajo X			Poniente-Abajo X	
	Poniente-Arriba Y	3.04		Poniente-Arriba Y	7.54
	Poniente-Abajo Y			Poniente-Abajo Y	

Tabla C.2. Tabla de amortiguamiento para Edificio 1

Registro	Dirección	β (%)	Registro	Dirección	β (%)
20170422_234225	Oriente-Arriba X	6.04	20170424_205425	Oriente-Arriba X	4.62
	Oriente-Abajo X			Oriente-Abajo X	
	Oriente-Arriba Y	6.59		Oriente-Arriba Y	5.87
	Oriente-Abajo Y			Oriente-Abajo Y	
	Poniente-Arriba X	8.39		Poniente-Arriba X	7.44
	Poniente-Abajo X			Poniente-Abajo X	
	Poniente-Arriba Y	5.88		Poniente-Arriba Y	5.66
Poniente-Abajo Y	Poniente-Abajo Y				
20170423	Oriente-Arriba X	2.95	20170424_224238	Oriente-Arriba X	9.10
	Oriente-Abajo X			Oriente-Abajo X	
	Oriente-Arriba Y	3.58		Oriente-Arriba Y	8.51
	Oriente-Abajo Y			Oriente-Abajo Y	
	Poniente-Arriba X	8.46		Poniente-Arriba X	9.40
	Poniente-Abajo X			Poniente-Abajo X	
	Poniente-Arriba Y	8.16		Poniente-Arriba Y	6.40
Poniente-Abajo Y	Poniente-Abajo Y				
20170424_005424	Oriente-Arriba X	5.09	20170425	Oriente-Arriba X	5.34
	Oriente-Abajo X			Oriente-Abajo X	
	Oriente-Arriba Y	8.19		Oriente-Arriba Y	6.76
	Oriente-Abajo Y			Oriente-Abajo Y	
	Poniente-Arriba X	4.46		Poniente-Arriba X	8.46
	Poniente-Abajo X			Poniente-Abajo X	
	Poniente-Arriba Y	5.16		Poniente-Arriba Y	6.60
Poniente-Abajo Y	Poniente-Abajo Y				
20170424_184606	Oriente-Arriba X	6.05	20170427_052459	Oriente-Arriba X	4.93
	Oriente-Abajo X			Oriente-Abajo X	
	Oriente-Arriba Y	6.02		Oriente-Arriba Y	6.15
	Oriente-Abajo Y			Oriente-Abajo Y	
	Poniente-Arriba X	8.52		Poniente-Arriba X	4.53
	Poniente-Abajo X			Poniente-Abajo X	
	Poniente-Arriba Y	7.28		Poniente-Arriba Y	3.43
Poniente-Abajo Y	Poniente-Abajo Y				
20170424_185811	Oriente-Arriba X	4.74	20170428_122947	Oriente-Arriba X	6.54
	Oriente-Abajo X			Oriente-Abajo X	
	Oriente-Arriba Y	5.63		Oriente-Arriba Y	3.62
	Oriente-Abajo Y			Oriente-Abajo Y	
	Poniente-Arriba X	6.23		Poniente-Arriba X	8.82
	Poniente-Abajo X			Poniente-Abajo X	
	Poniente-Arriba Y	9.42		Poniente-Arriba Y	6.09
Poniente-Abajo Y	Poniente-Abajo Y				
20170424_195013	Oriente-Arriba X	6.06	20170428_124945	Oriente-Arriba X	5.97
	Oriente-Abajo X			Oriente-Abajo X	
	Oriente-Arriba Y	8.39		Oriente-Arriba Y	3.58
	Oriente-Abajo Y			Oriente-Abajo Y	
	Poniente-Arriba X	6.15		Poniente-Arriba X	4.47
	Poniente-Abajo X			Poniente-Abajo X	
	Poniente-Arriba Y	6.33		Poniente-Arriba Y	6.11
Poniente-Abajo Y	Poniente-Abajo Y				

Tabla C.3. Tabla de amortiguamiento para Edificio 1

Registro	Dirección	β (%)	Registro	Dirección	β (%)
20170428_125831	Oriente-Arriba X	3.88	20170707	Oriente-Arriba X	5.88
	Oriente-Abajo X			Oriente-Abajo X	
	Oriente-Arriba Y	5.47		Oriente-Arriba Y	4.67
	Oriente-Abajo Y			Oriente-Abajo Y	
	Poniente-Arriba X	5.59		Poniente-Arriba X	5.50
	Poniente-Abajo X			Poniente-Abajo X	
	Poniente-Arriba Y	6.34		Poniente-Arriba Y	5.04
	Poniente-Abajo Y			Poniente-Abajo Y	
20170428_130533	Oriente-Arriba X	5.93	20170802	Oriente-Arriba X	6.19
	Oriente-Abajo X			Oriente-Abajo X	
	Oriente-Arriba Y	5.48		Oriente-Arriba Y	2.72
	Oriente-Abajo Y			Oriente-Abajo Y	
	Poniente-Arriba X	5.82		Poniente-Arriba X	5.20
	Poniente-Abajo X			Poniente-Abajo X	
	Poniente-Arriba Y	6.37		Poniente-Arriba Y	4.60
	Poniente-Abajo Y			Poniente-Abajo Y	
20170428_144218	Oriente-Arriba X	3.80	20170821	Oriente-Arriba X	6.11
	Oriente-Abajo X			Oriente-Abajo X	
	Oriente-Arriba Y	6.43		Oriente-Arriba Y	5.53
	Oriente-Abajo Y			Oriente-Abajo Y	
	Poniente-Arriba X	4.24		Poniente-Arriba X	2.70
	Poniente-Abajo X			Poniente-Abajo X	
	Poniente-Arriba Y	5.71		Poniente-Arriba Y	5.40
	Poniente-Abajo Y			Poniente-Abajo Y	
20170428_224636	Oriente-Arriba X	2.29	20170513	Oriente-Arriba X	5.18
	Oriente-Abajo X			Oriente-Abajo X	
	Oriente-Arriba Y	4.00		Oriente-Arriba Y	5.63
	Oriente-Abajo Y			Oriente-Abajo Y	
	Poniente-Arriba X	6.12		Poniente-Arriba X	4.32
	Poniente-Abajo X			Poniente-Abajo X	
	Poniente-Arriba Y	6.15		Poniente-Arriba Y	7.60
	Poniente-Abajo Y			Poniente-Abajo Y	
20170611	Oriente-Arriba X	4.11	20170611	Oriente-Arriba X	2.99
	Oriente-Abajo X			Oriente-Abajo X	
	Oriente-Arriba Y	2.99		Poniente-Arriba X	3.60
	Oriente-Abajo Y			Poniente-Abajo X	
	Poniente-Arriba X	3.60		Poniente-Arriba Y	7.30
	Poniente-Abajo X			Poniente-Abajo Y	
	Poniente-Arriba Y	7.30			
	Poniente-Abajo Y				

Tabla C.4. Tabla de amortiguamiento para Edificio 2

Registro	Dirección	β (%)	Registro	Dirección	β (%)
20190609_ 192829	Oeste-Arriba X	5.47	20180910_ 052147	Oeste-Arriba X	3.97
	Oeste-Abajo X			Oeste-Abajo X	
	Oeste-Arriba Y	5.49		Oeste-Arriba Y	5.46
	Oeste-Abajo Y			Oeste-Abajo Y	
20190609_ 192221	Oeste-Arriba X	4.62	20180906_ 223633	Oeste-Arriba X	7.60
	Oeste-Abajo X			Oeste-Abajo X	
	Oeste-Arriba Y	3.10		Oeste-Arriba Y	2.48
	Oeste-Abajo Y			Oeste-Abajo Y	
20190418_ 013536	Oeste-Arriba X	2.49	20180902_ 140948	Oeste-Arriba X	4.00
	Oeste-Abajo X			Oeste-Abajo X	
	Oeste-Arriba Y	5.90		Oeste-Arriba Y	2.71
	Oeste-Abajo Y			Oeste-Abajo Y	
20190415_ 222300	Oeste-Arriba X	4.03	20180215_ 061518	Oeste-Arriba X	3.13
	Oeste-Abajo X			Oeste-Abajo X	
	Oeste-Arriba Y	3.66		Oeste-Arriba Y	4.29
	Oeste-Abajo Y			Oeste-Abajo Y	
20181101_ 202331	Oeste-Arriba X	3.42			
	Oeste-Abajo X		Oeste-Abajo X		
	Oeste-Arriba Y	4.15			
	Oeste-Abajo Y		Oeste-Abajo Y		
20181101_ 202213	Oeste-Arriba X	1.01			
	Oeste-Abajo X		Oeste-Abajo X		
	Oeste-Arriba Y	1.95			
	Oeste-Abajo Y		Oeste-Abajo Y		
20181031_ 043426	Oeste-Arriba X	2.83			
	Oeste-Abajo X		Oeste-Abajo X		
	Oeste-Arriba Y	4.05			
	Oeste-Abajo Y		Oeste-Abajo Y		
20181031_ 042251	Oeste-Arriba X	4.50			
	Oeste-Abajo X		Oeste-Abajo X		
	Oeste-Arriba Y	3.42			
	Oeste-Abajo Y		Oeste-Abajo Y		
20181028_ 134239	Oeste-Arriba X	4.60			
	Oeste-Abajo X		Oeste-Abajo X		
	Oeste-Arriba Y	4.91			
	Oeste-Abajo Y		Oeste-Abajo Y		
20180922_ 101042	Oeste-Arriba X	1.66			
	Oeste-Abajo X		Oeste-Abajo X		
	Oeste-Arriba Y	4.70			
	Oeste-Abajo Y		Oeste-Abajo Y		

10.4. Anexo D. Análisis de sensibilidad

Análisis de sensibilidad para los parámetros de la metodología ADRS descritos a continuación:

- Selección de registros sísmicos aleatoriamente o de acuerdo a su Intensidad de Arias (IA).
- Modelo histérico utilizado: Bi-lineal o Bouc-Wen.
- Método de escalamiento de los registros sísmicos: Factor de escala constante, escalamiento en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo.
- Espectro objetivo para el escalamiento de registros sísmicos: Sismo Máximo Posible (SMP) de la norma NCh2745 y el Espectro Medio Condicional (EMC).
- Factor α que corresponde al cociente entre la rigidez inicial (k_i) y la rigidez post-fluencia (k_p), siendo los valores de α considerados iguales a 5, 10 y 15.
- Método de integración numérico: Método de Newmark, Método de Hilber, Hughes y Taylor, y el Método Alpha Generalizado.

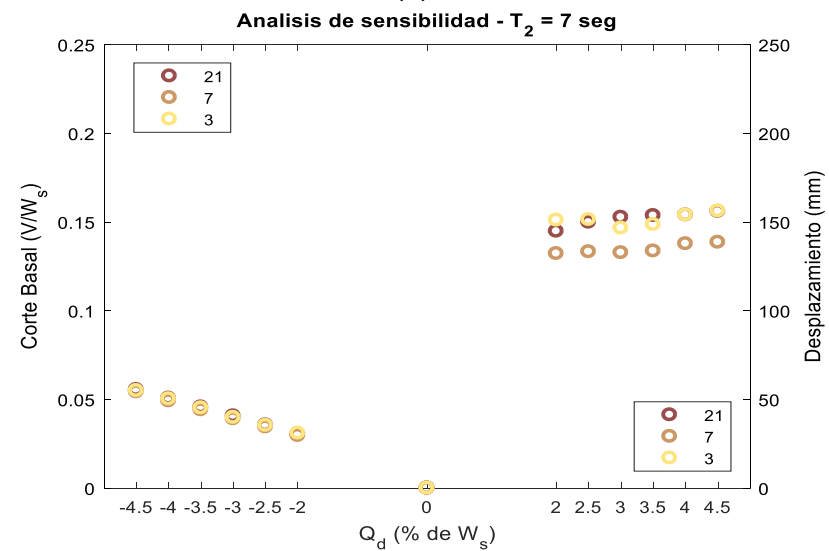
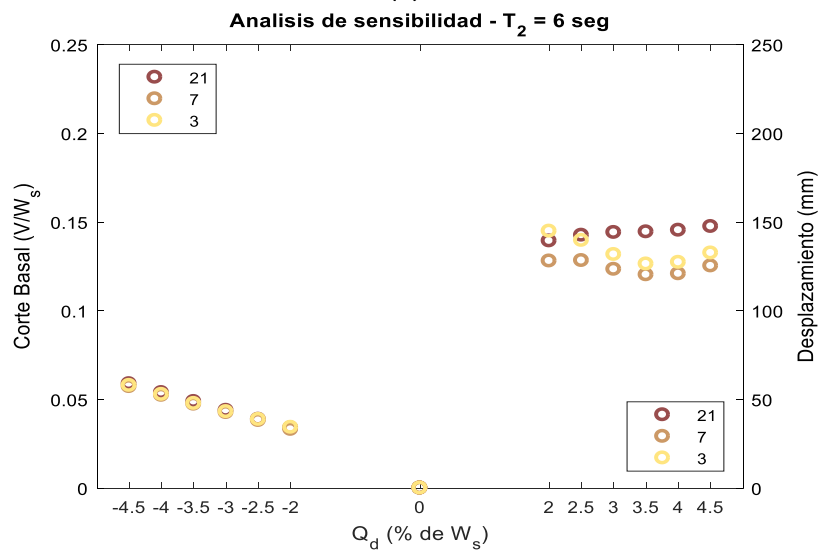
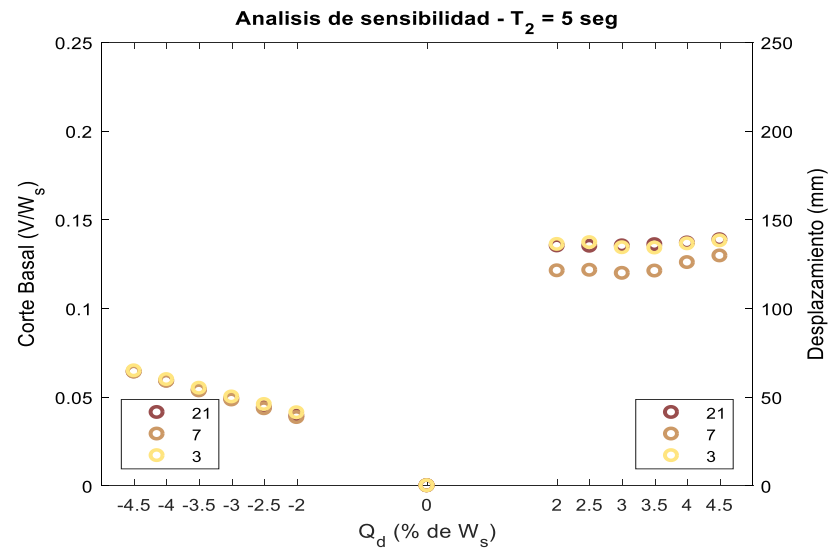
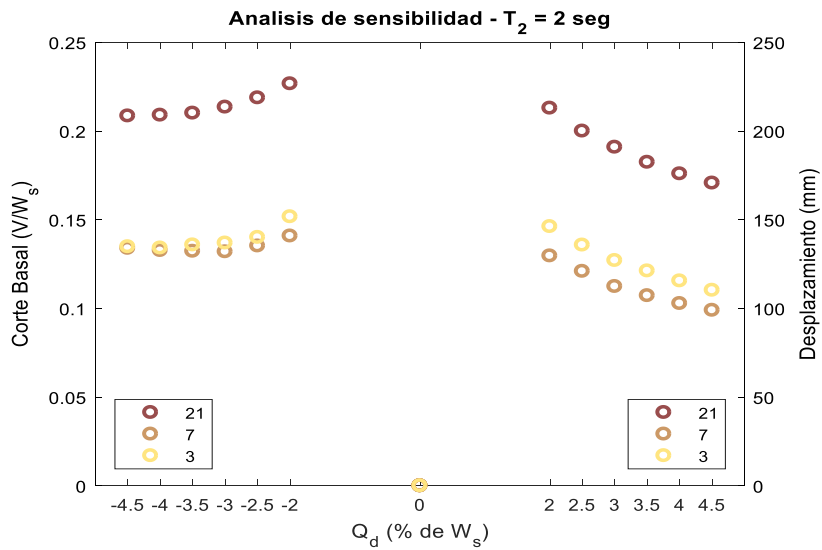
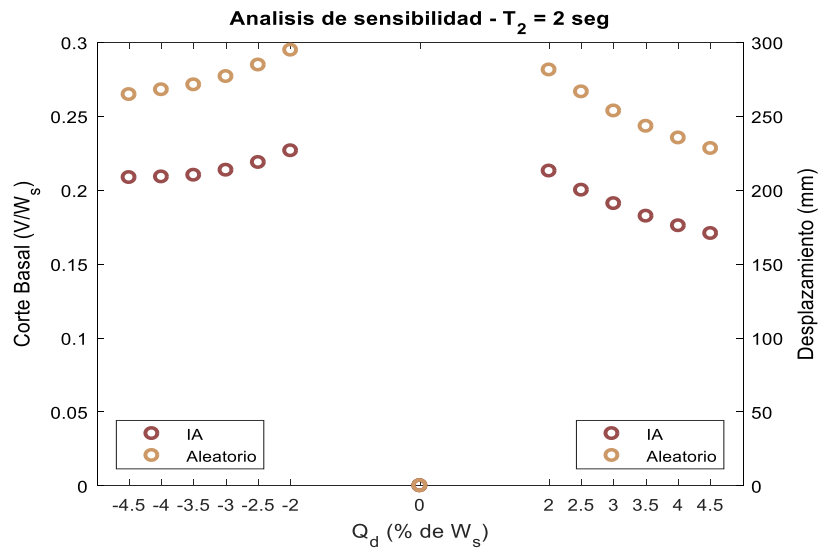
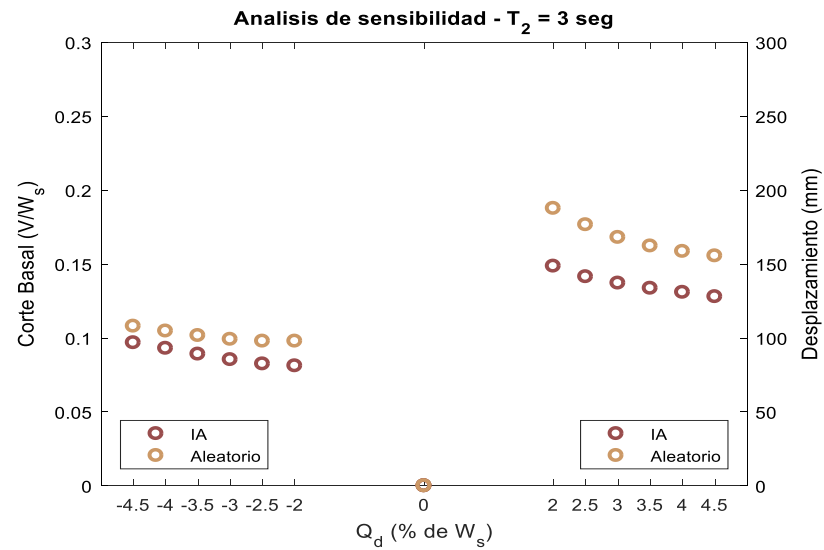


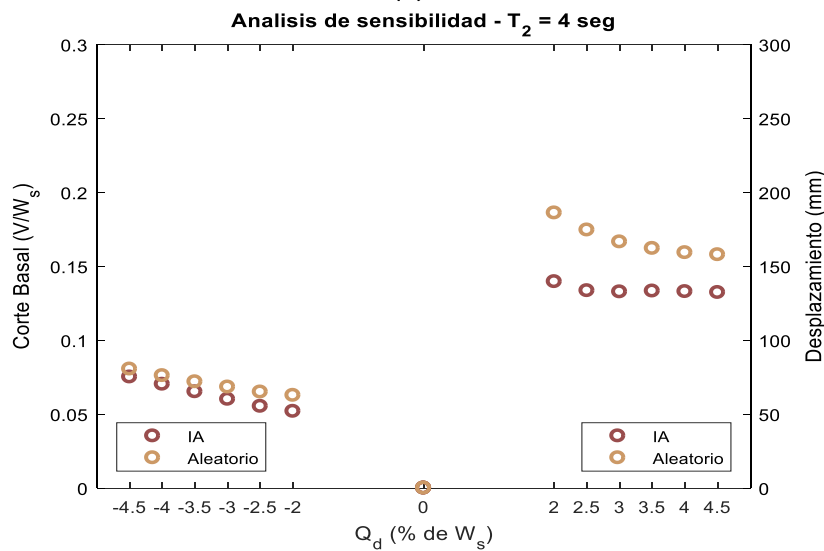
Figura D.1 Análisis de sensibilidad para número de registros: (a) $T_2= 2$ seg, (b) $T_2= 5$ seg, (c) $T_2= 6$ seg, (d) $T_2= 7$ seg.



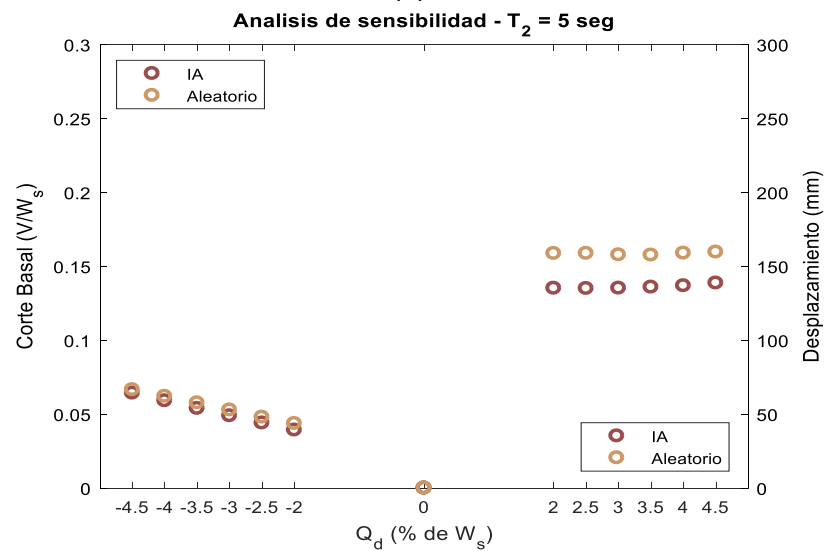
(a)



(b)

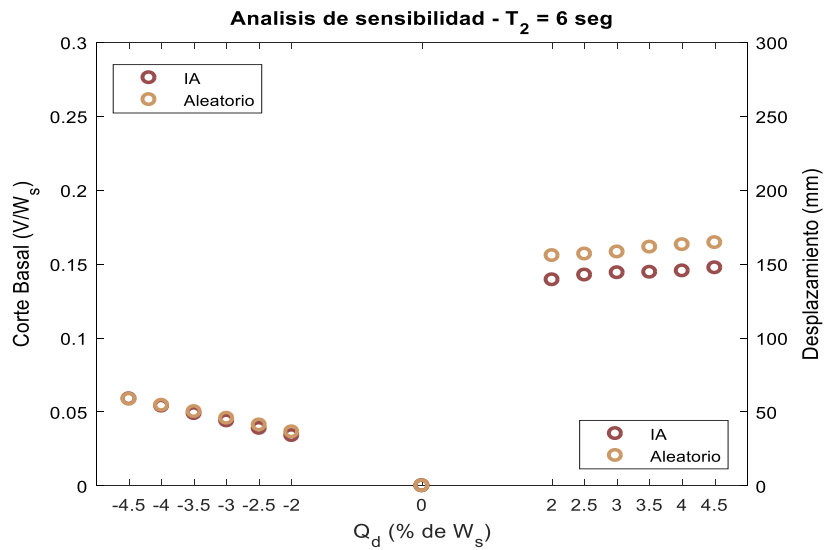


(c)

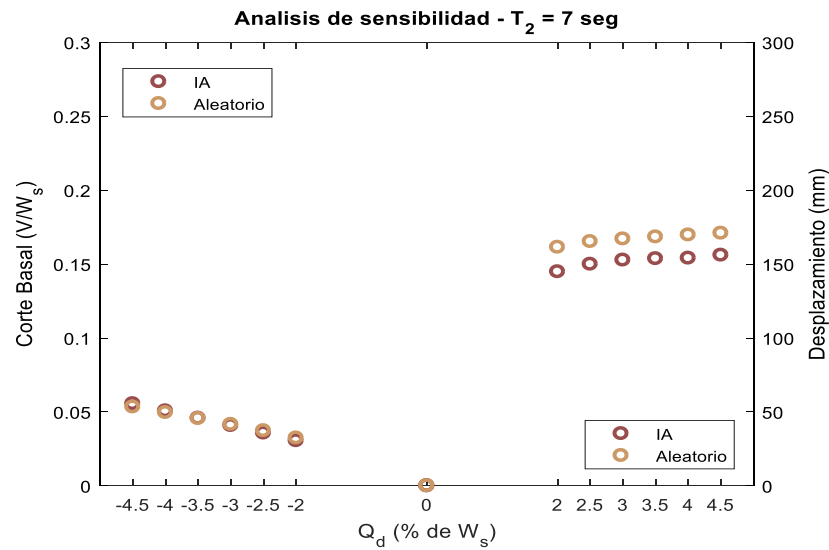


(d)

Figura D.2 Análisis de sensibilidad para selección de registros: (a) $T_2 = 2$ seg, (b) $T_2 = 3$ seg, (c) $T_2 = 4$ seg, (d) $T_2 = 5$ seg.

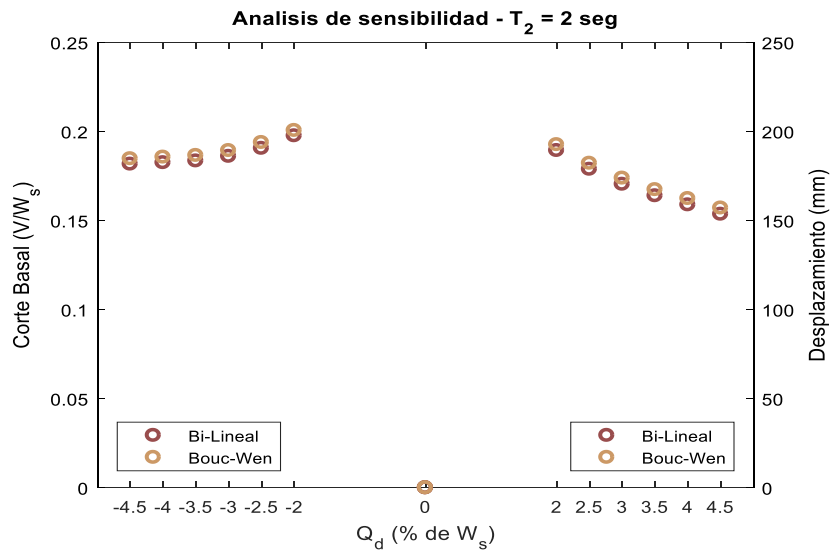


(e)

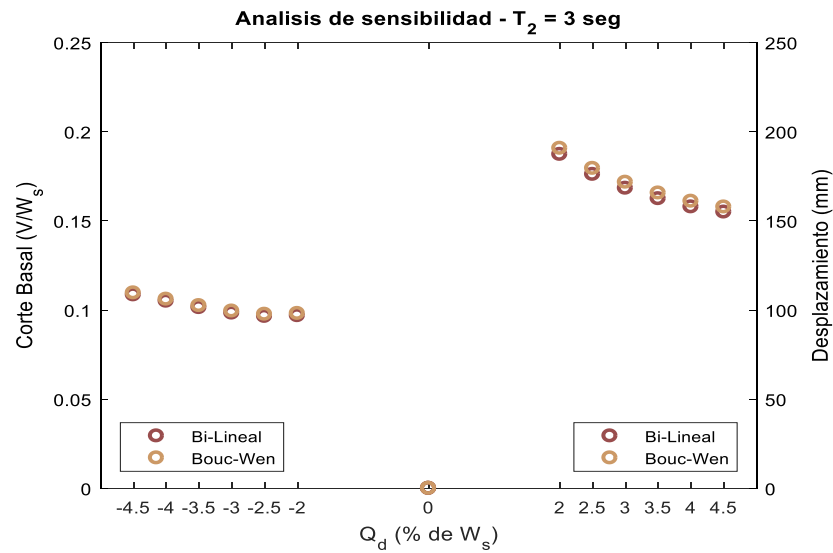


(f)

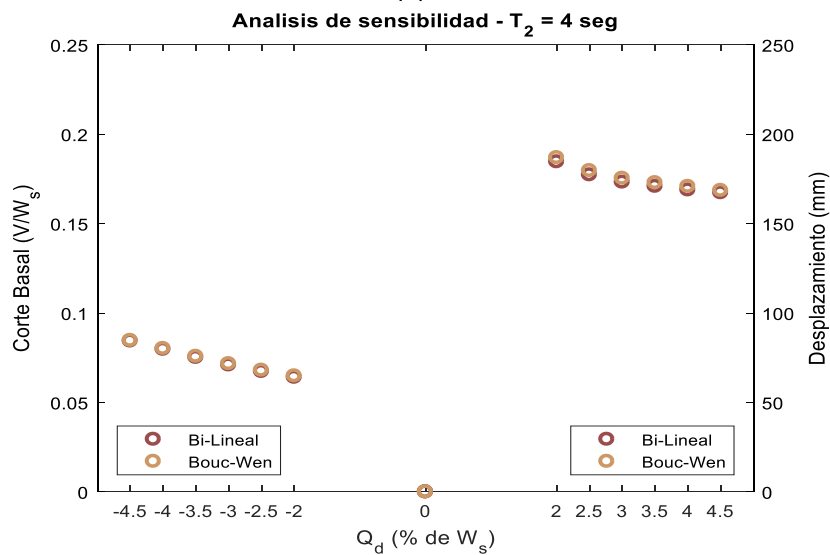
Figura D.3 Análisis de sensibilidad para selección de registros: (e) $T_2= 6$ seg, (f) $T_2= 7$ seg



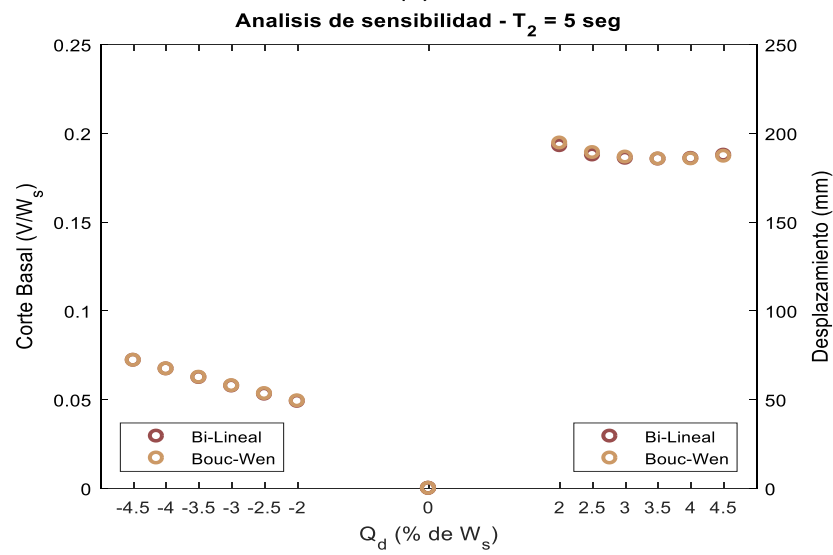
(a)



(b)

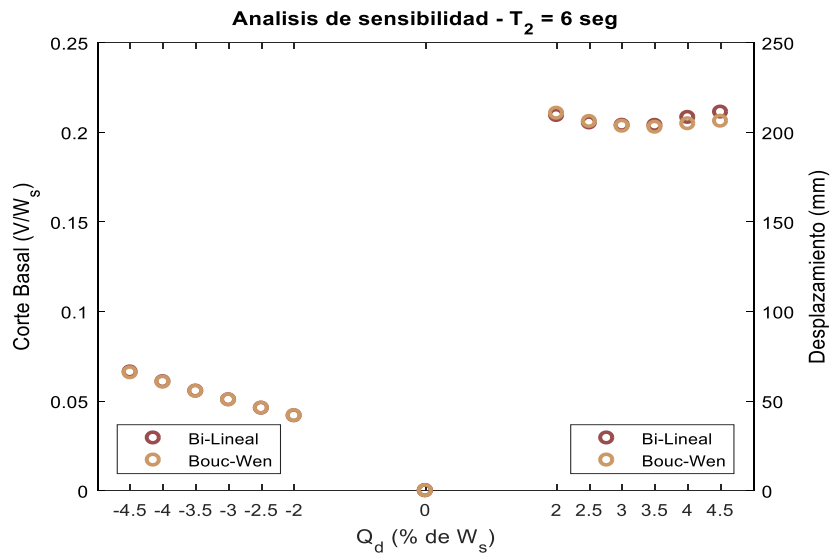


(c)

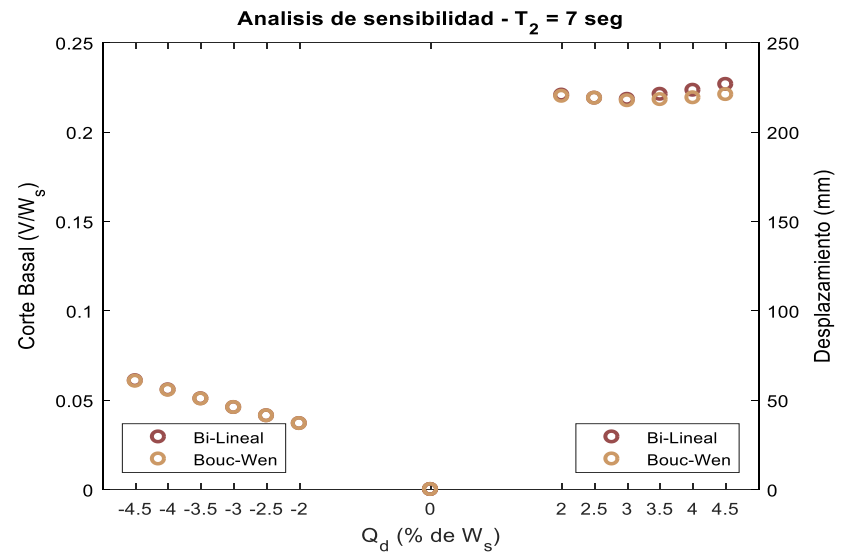


(d)

Figura D.4 Análisis de sensibilidad para modelo histerético: (a) $T_2= 2$ seg, (b) $T_2= 3$ seg, (c) $T_2= 4$ seg, (d) $T_2= 5$ seg.

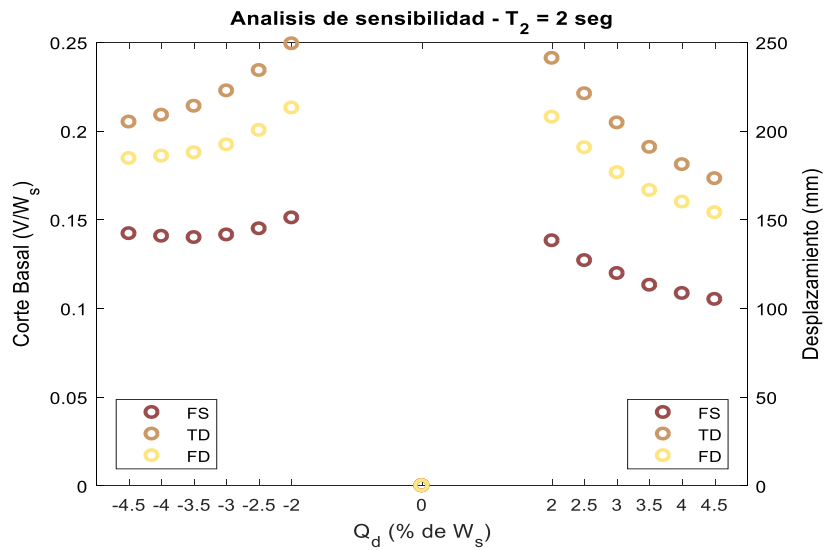


(e)

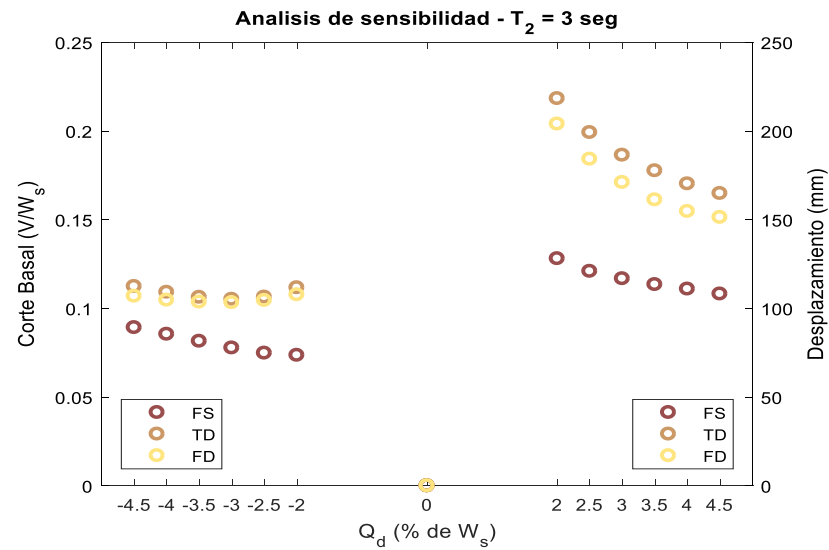


(f)

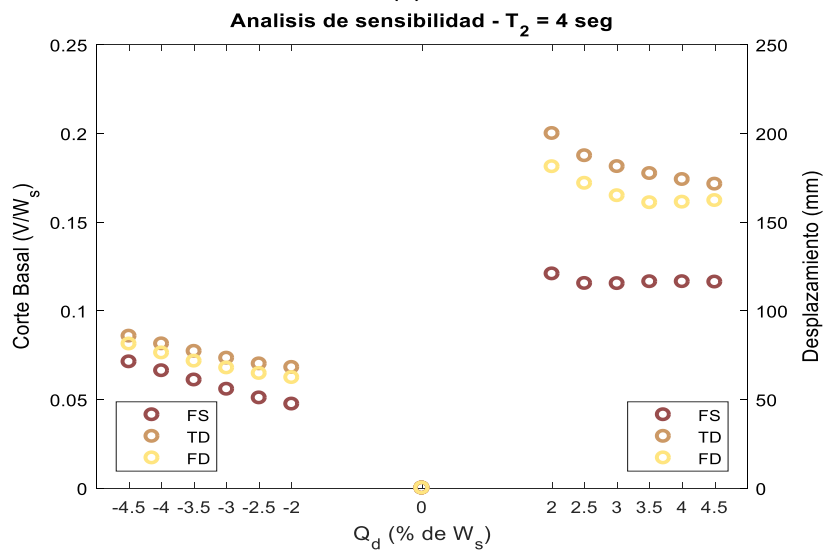
Figura D.5 Análisis de sensibilidad para modelo histerético: (e) $T_2= 6$ seg, (f) $T_2= 7$ seg



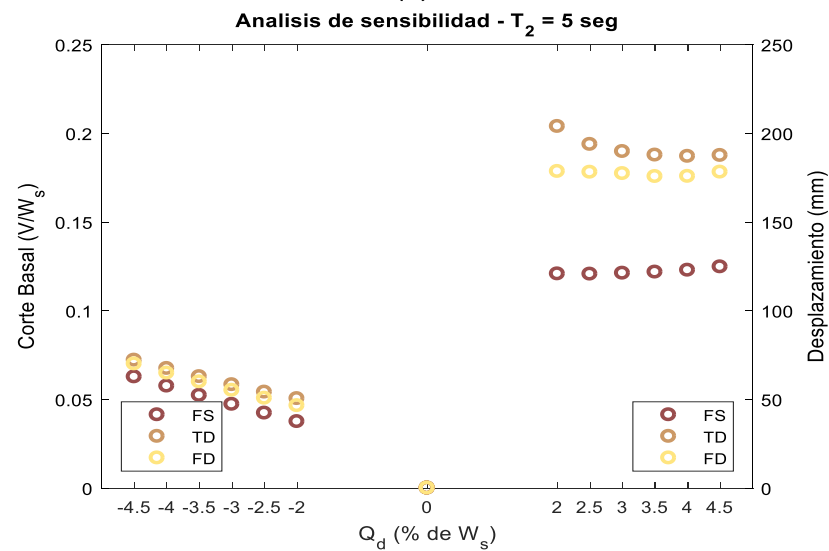
(a)



(b)

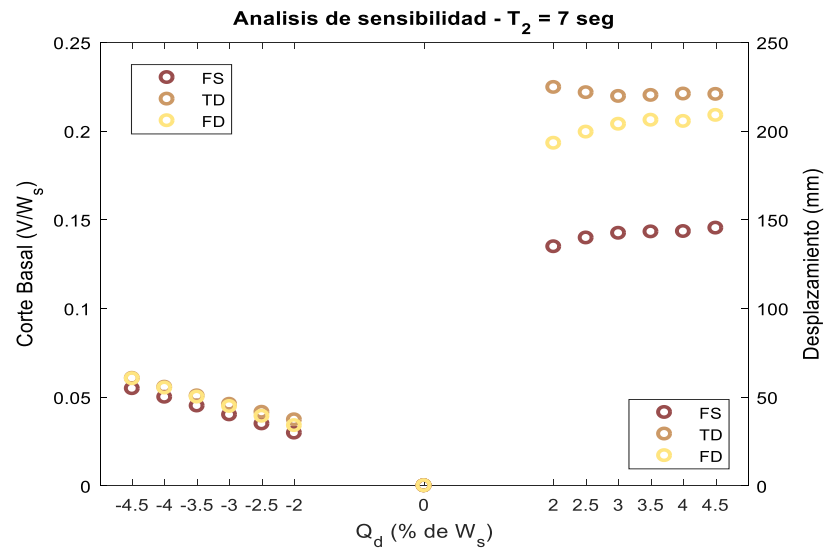
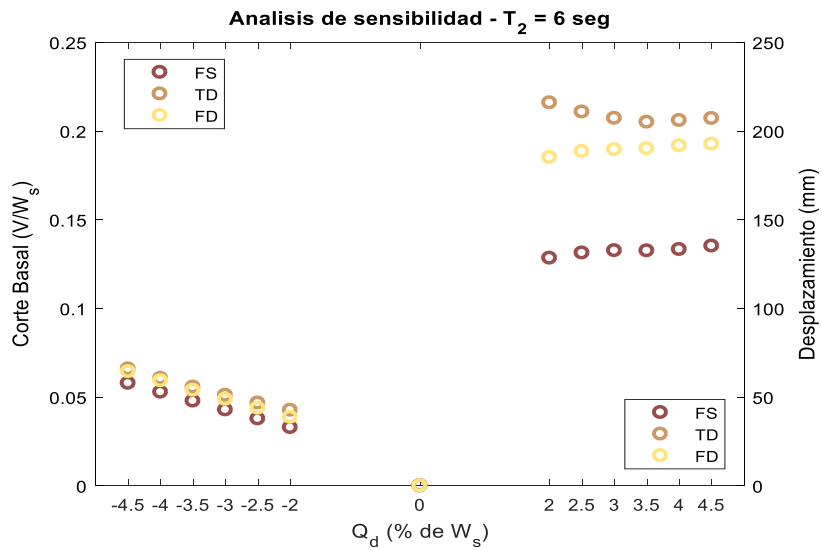


(c)

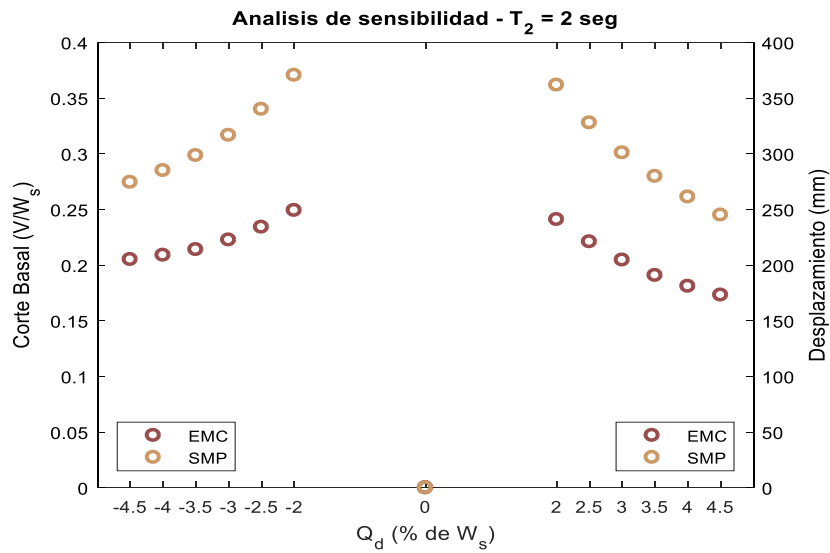


(d)

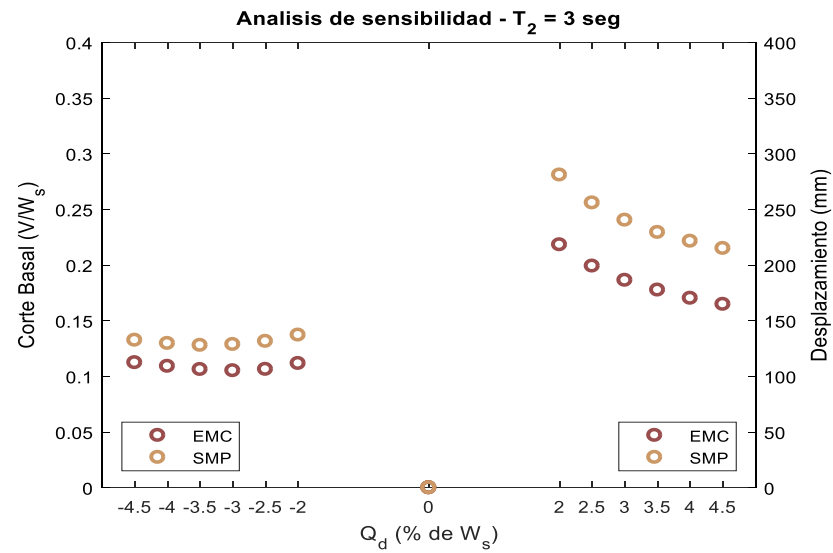
Figura D.6 Análisis de sensibilidad para método de escalamiento: (a) $T_2 = 2$ seg, (b) $T_2 = 3$ seg, (c) $T_2 = 4$ seg, (d) $T_2 = 5$ seg.



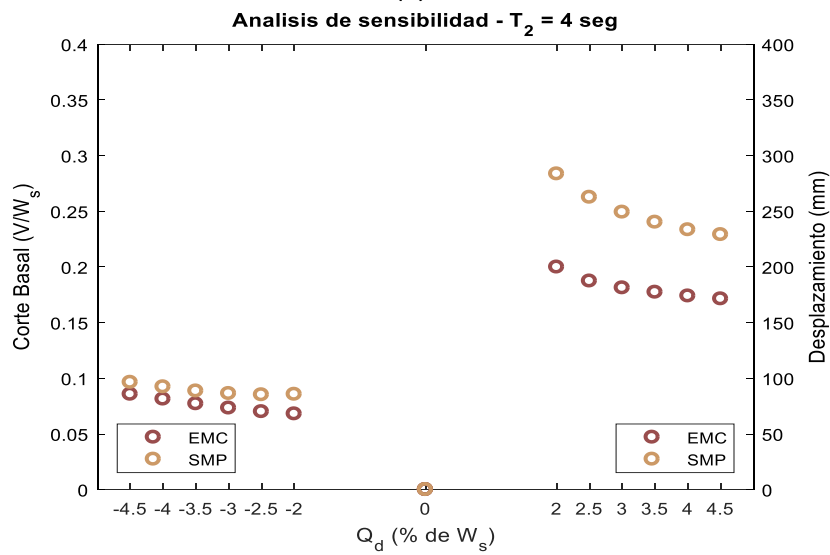
(e) (f)
 Figura D.7 Análisis de sensibilidad para método de escalamiento: (e) $T_2 = 6$ seg, (f) $T_2 = 7$ seg



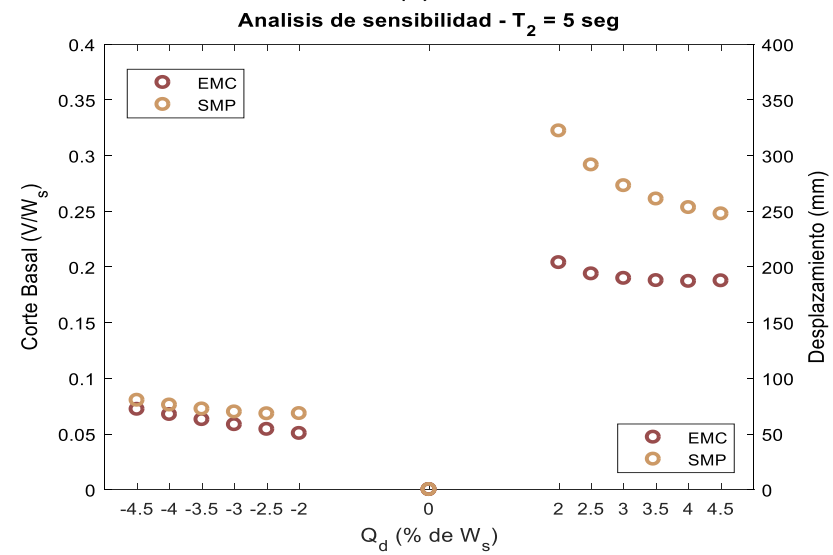
(a)



(b)

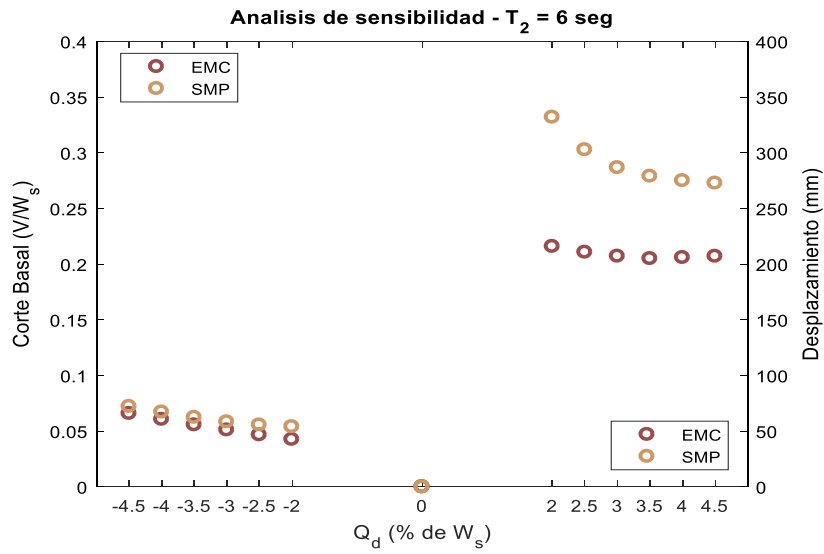


(c)

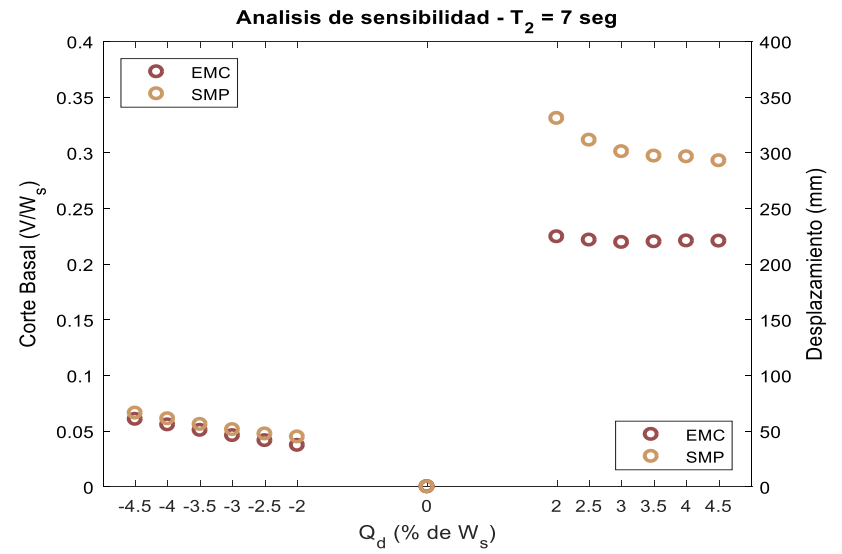


(d)

Figura D.8 Análisis de sensibilidad para espectro objetivo: (a) $T_2= 2$ seg, (b) $T_2= 3$ seg, (c) $T_2= 4$ seg, (d) $T_2= 5$ seg.

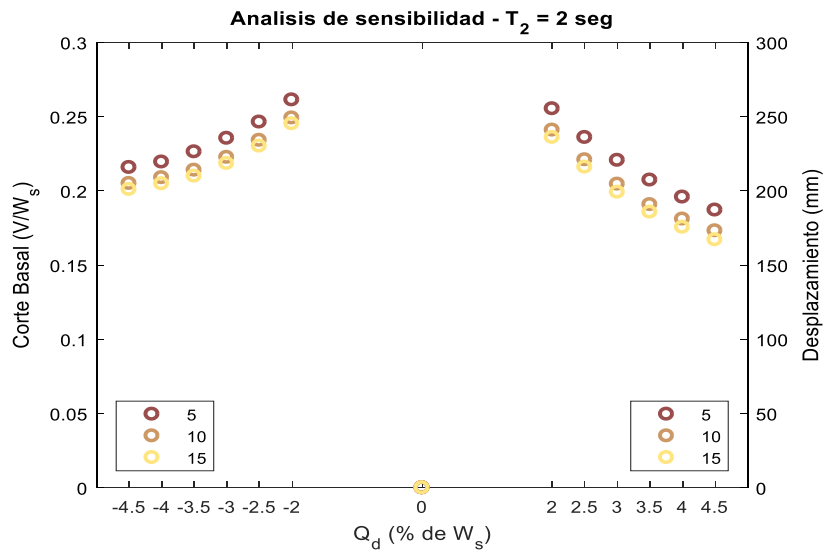


(e)

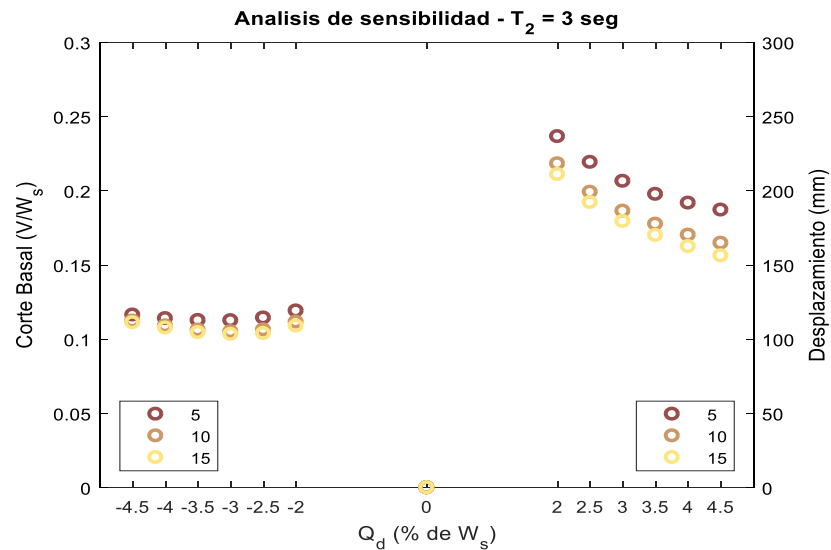


(f)

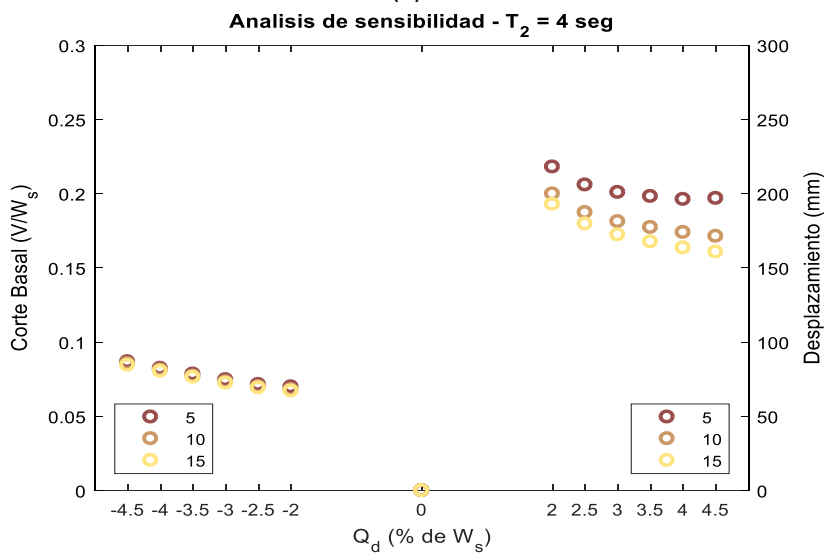
Figura D.9 Análisis de sensibilidad para espectro objetivo: (e) $T_2= 6$ seg, (f) $T_2= 7$ seg



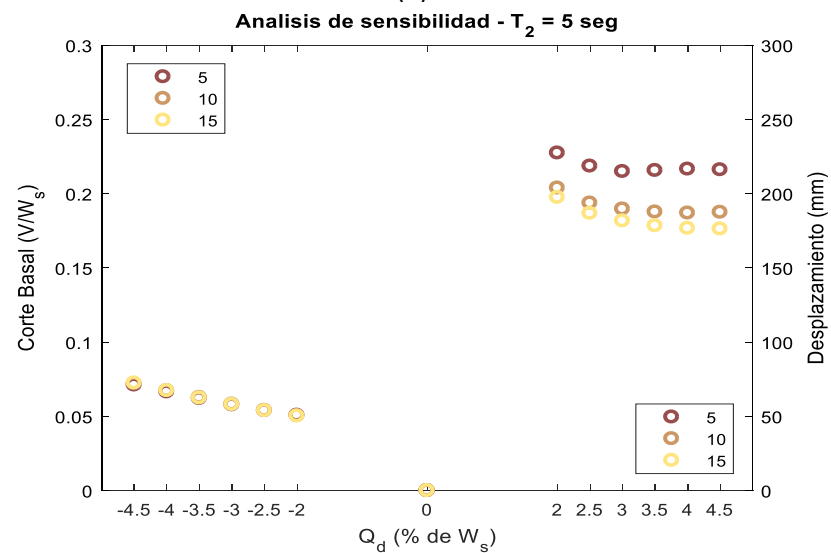
(a)



(b)

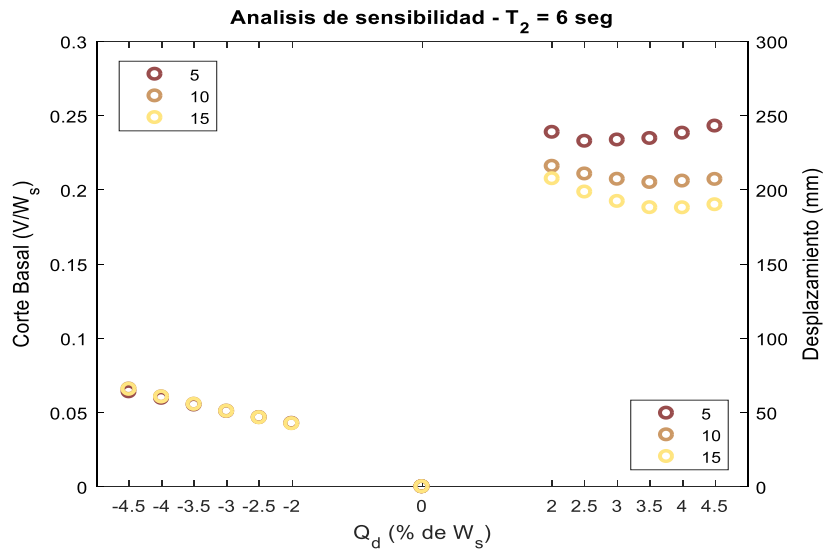


(c)

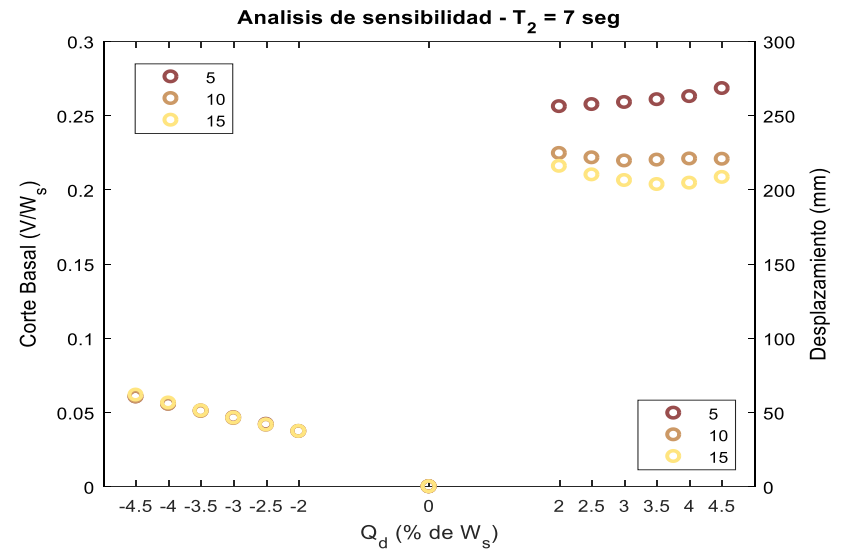


(d)

Figura D.10 Análisis de sensibilidad para factor α : (a) $T_2=2$ seg, (b) $T_2=3$ seg, (c) $T_2=4$ seg, (d) $T_2=5$ seg.

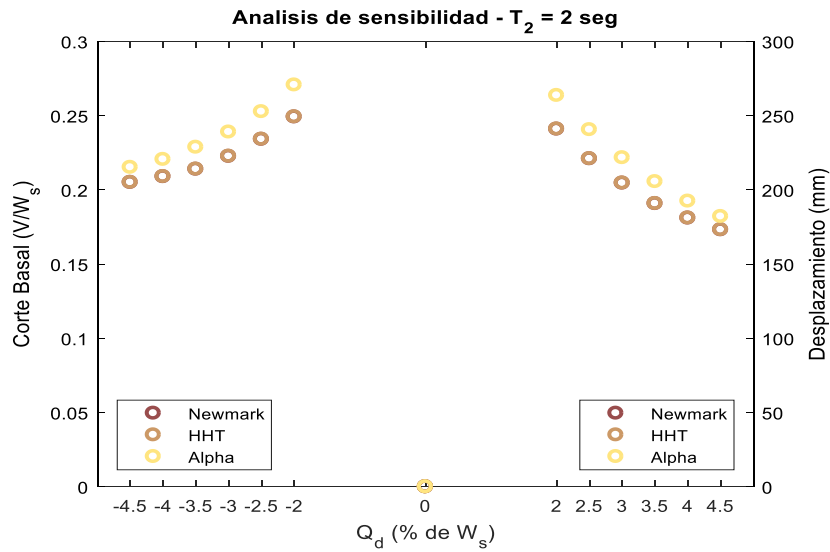


(e)

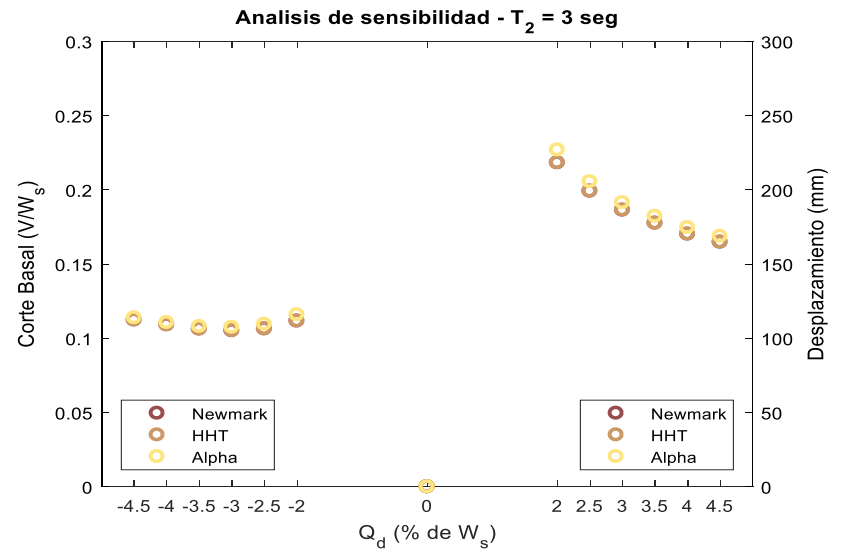


(f)

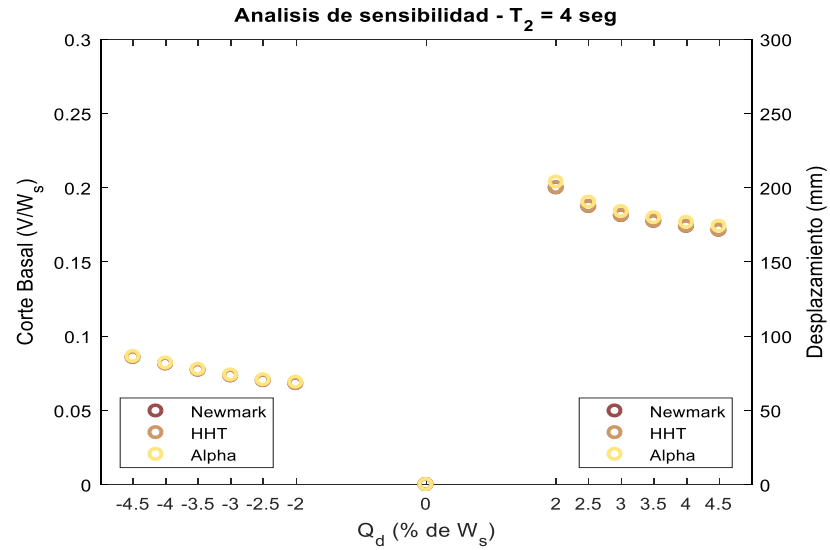
Figura D.11 Análisis de sensibilidad para factor α : (e) $T_2 = 6$ seg, (f) $T_2 = 7$ seg



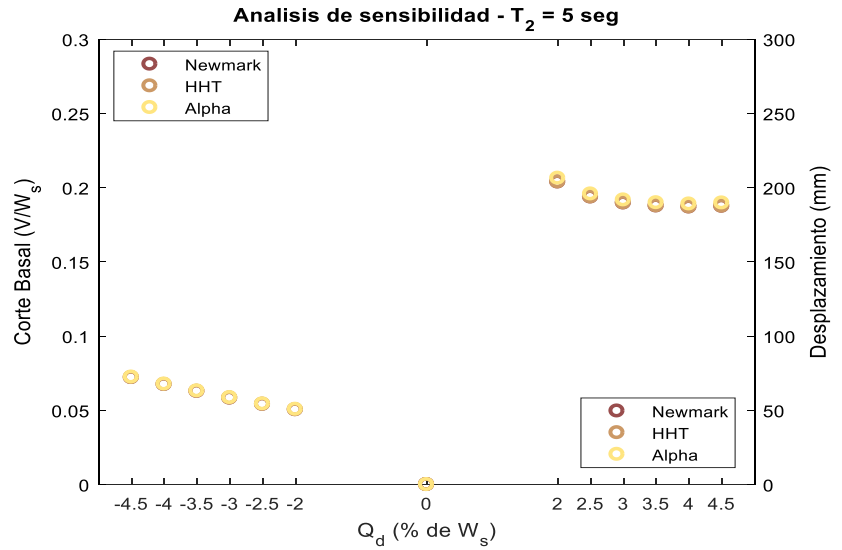
(a)



(b)

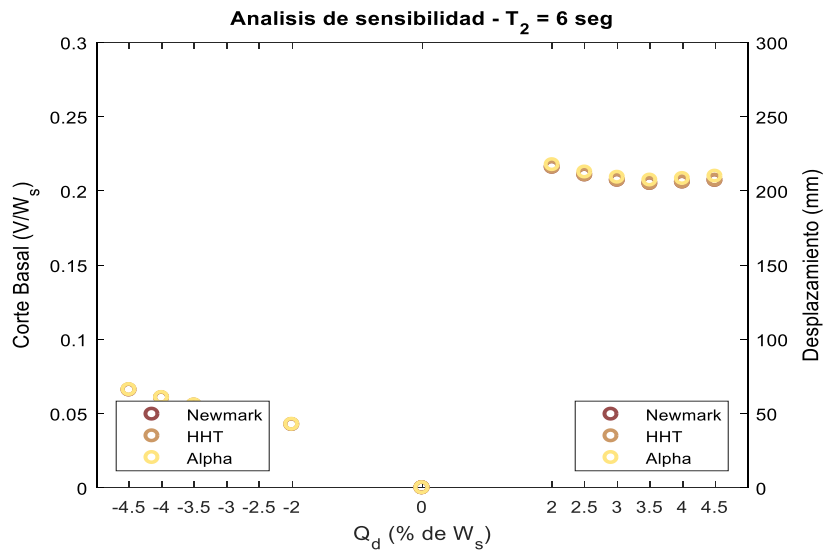


(c)

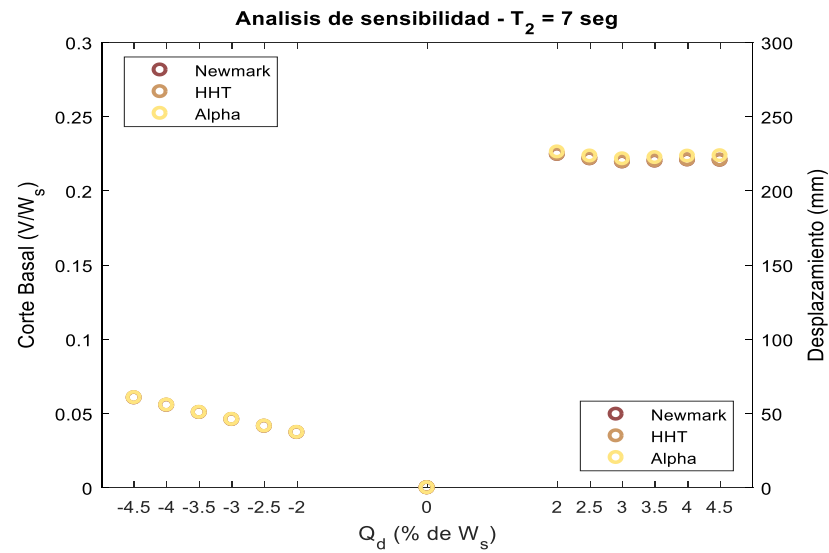


(d)

Figura D.12 Análisis de sensibilidad para método de integración: (a) $T_2 = 2$ seg, (b) $T_2 = 3$ seg, (c) $T_2 = 4$ seg, (d) $T_2 = 5$ seg.



(e)

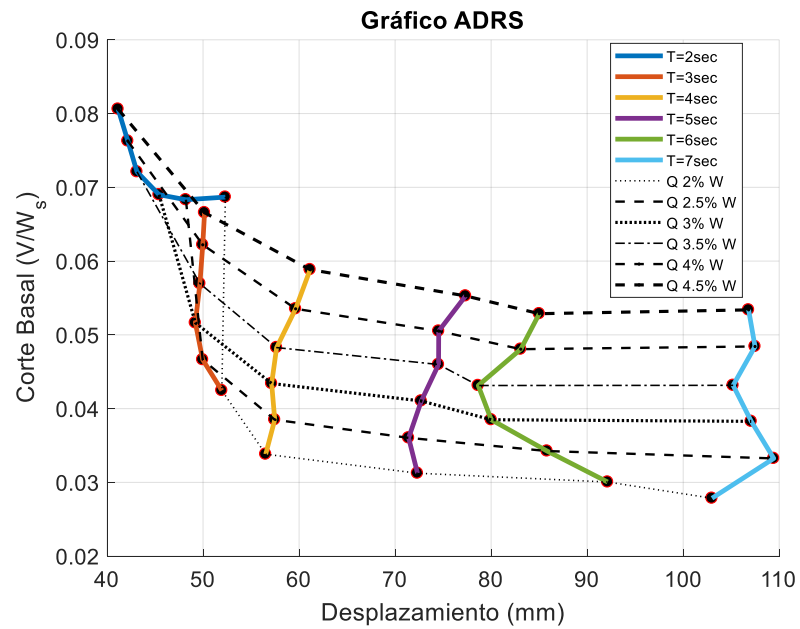


(f)

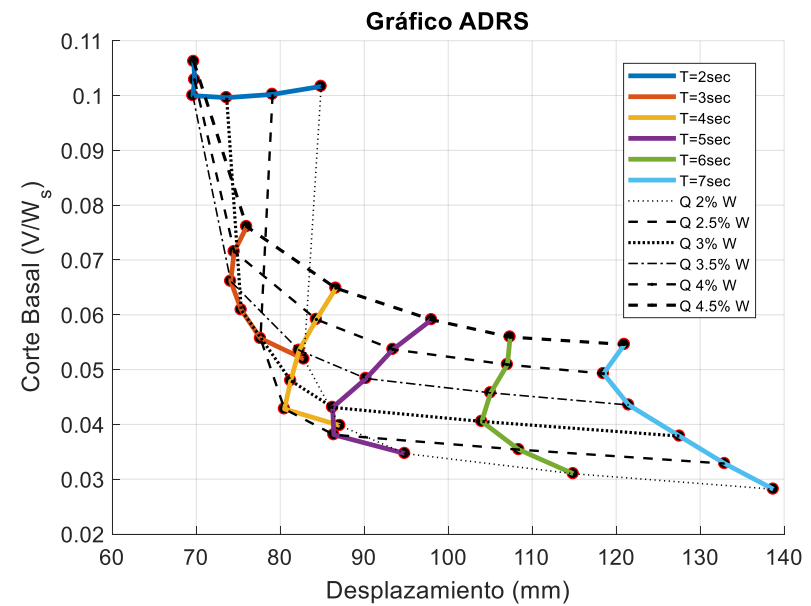
Figura D.13 Análisis de sensibilidad para método de integración: (e) $T_2= 6$ seg, (f) $T_2= 7$ seg

10.5. Anexo E. Gráficos ADRS

Espectros ADRS para las zonas sísmicas y tipos de suelos establecidos en NCh2745 utilizando registros característicos de la zona.

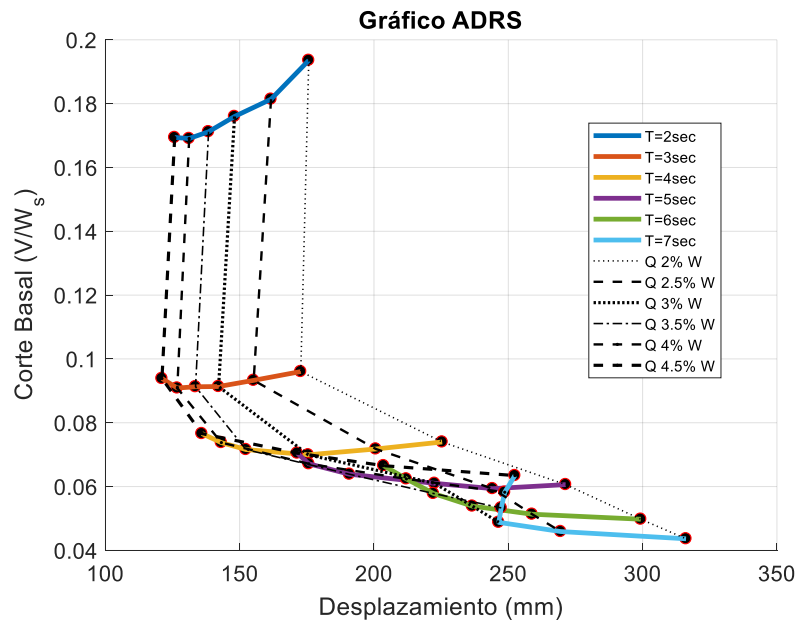


(a)

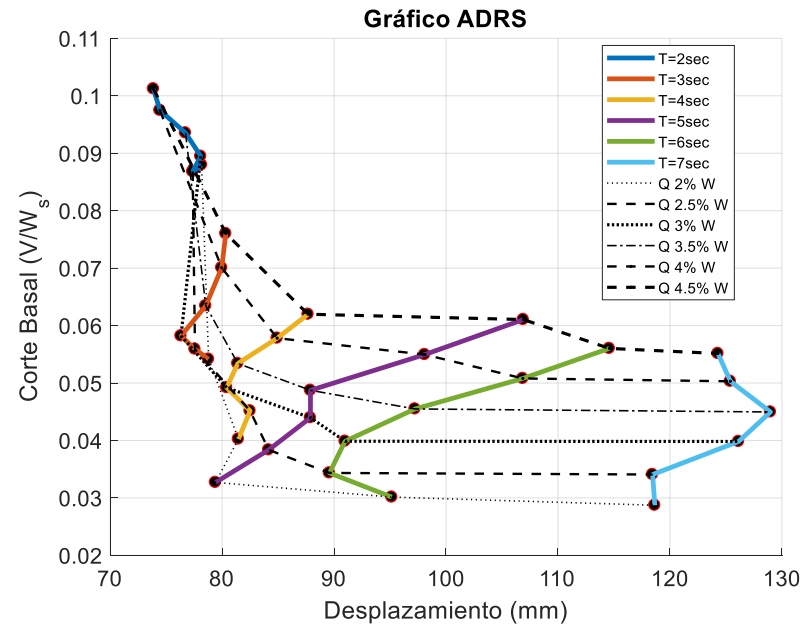


(b)

Figura E.1 Espectros ADRS: (a) Para zona sísmica 1 suelo tipo A, (b) Para zona sísmica 1 suelo tipo B

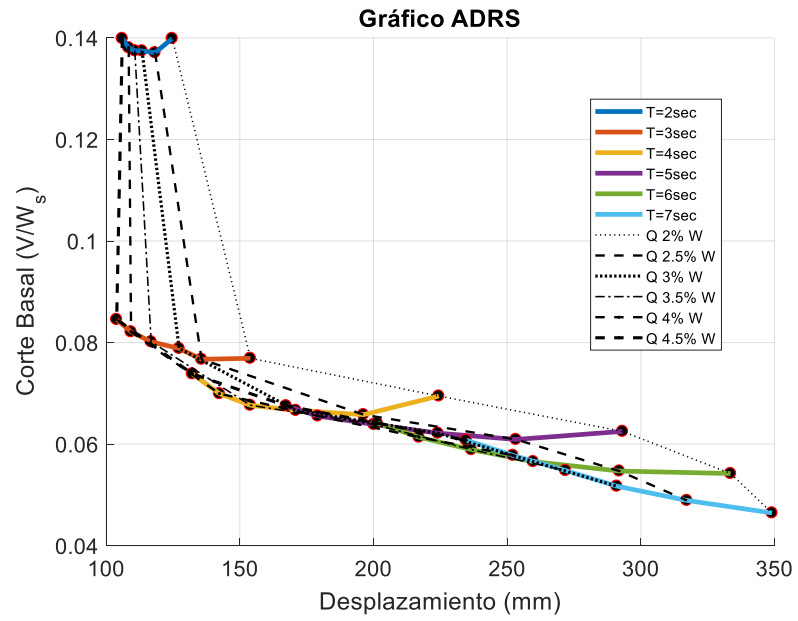


(c)

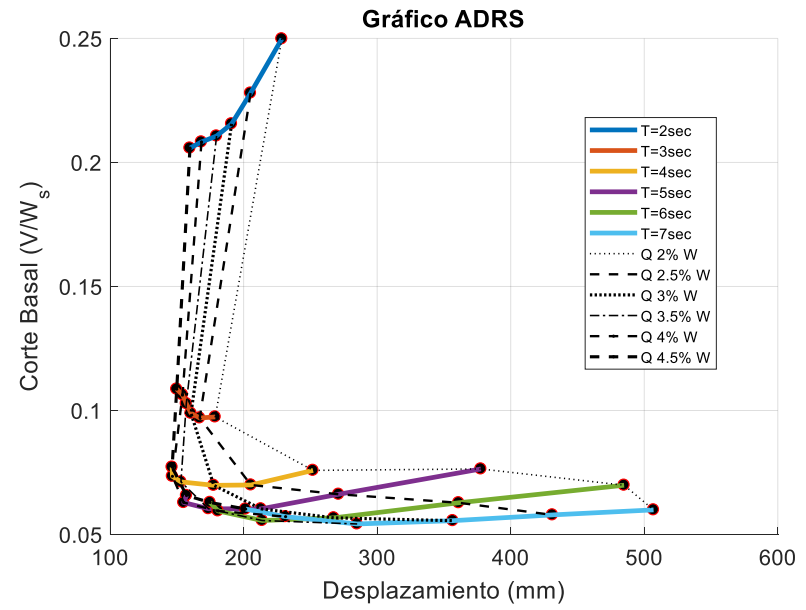


(d)

Figura E.2 Espectros ADRS: (c) Para zona sísmica 1 suelo tipo C/D, (d) Para zona sísmica 2 suelo tipo A



(e)



(f)

Figura E.2 Espectros ADRS: (e) Para zona sísmica 2 suelo tipo B, (f) Para zona sísmica 2 suelo tipo C/D

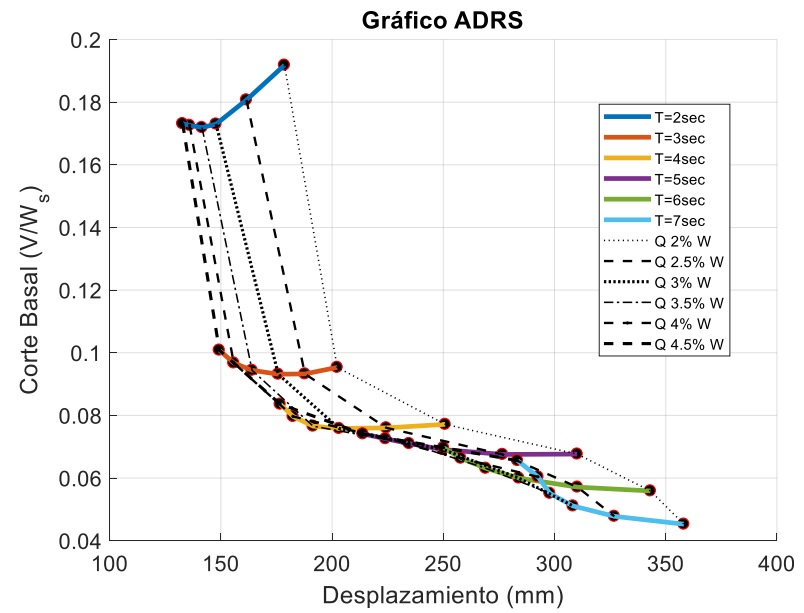
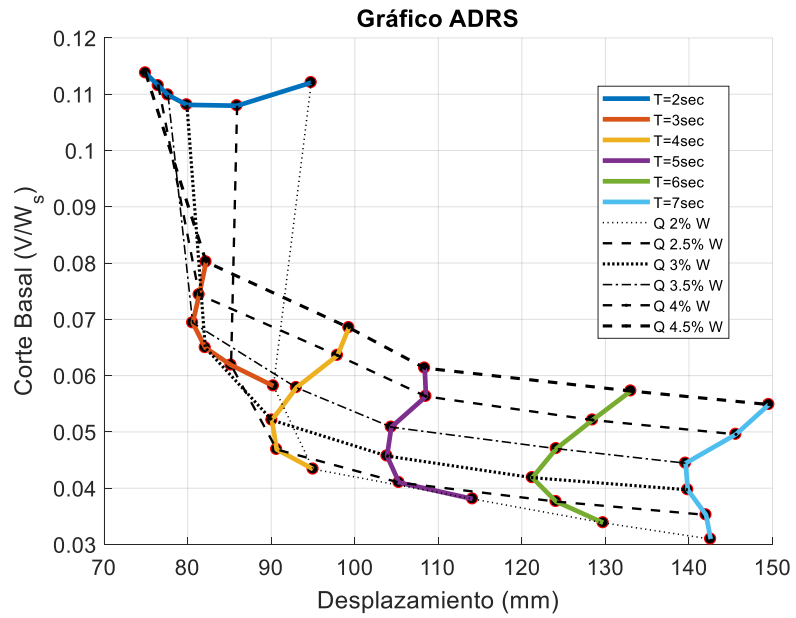
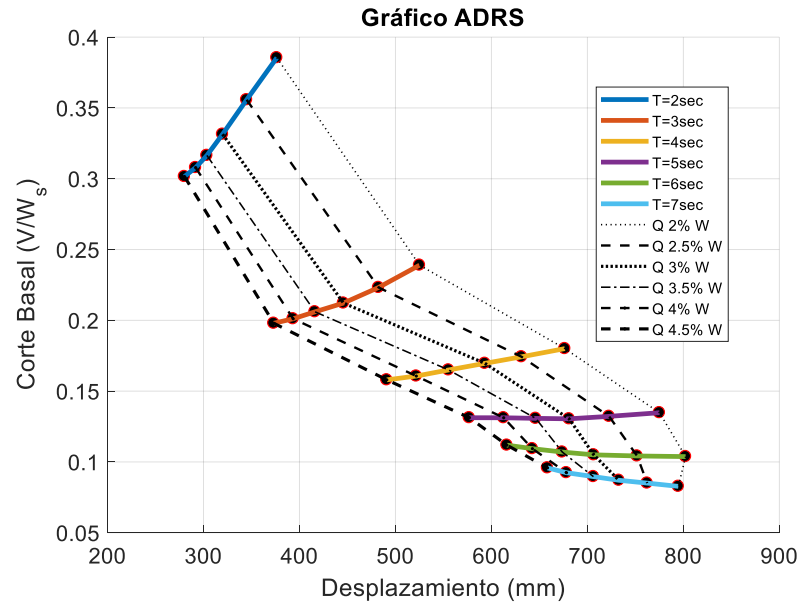


Figura E.2 Espectros ADRS: (g) Para zona sísmica 3 suelo tipo A, (h) Para zona sísmica 3 suelo tipo B



(i)

Figura E.2 Espectros ADRS: (i) Para zona sísmica 3 suelo tipo C/D

Gráficos ADRS obtenidos durante la investigación al variar un parámetro.

Para registros sin escalar

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	21
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	21
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=5K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=5K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=5K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=5K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=15K_p$	21
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=15K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=10K_p$	21
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=10K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	HHT	$K_i=10K_p$	21
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>							

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=10K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=5K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=5K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=15K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=15K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	21
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=5K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=5K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=10K_p$	21

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	7

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	7

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	7

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=5K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=5K_p$	7

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=5K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=5K_p$	7

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W_s)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (Blue solid) T=3sec (Orange solid) T=4sec (Yellow solid) T=5sec (Purple solid) T=6sec (Green solid) T=7sec (Light Blue solid) Q 2% W (Dotted) Q 2.5% W (Dashed) Q 3% W (Dash-dot) Q 3.5% W (Long-dash) Q 4% W (Short-dash) Q 4.5% W (Dash-dot-dot)</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W_s)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (Blue solid) T=3sec (Orange solid) T=4sec (Yellow solid) T=5sec (Purple solid) T=6sec (Green solid) T=7sec (Light Blue solid) Q 2% W (Dotted) Q 2.5% W (Dashed) Q 3% W (Dash-dot) Q 3.5% W (Long-dash) Q 4% W (Short-dash) Q 4.5% W (Dash-dot-dot)</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	7

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=15K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=15K_p$	7

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=10K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=10K_p$	7

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W_s)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec T=3sec T=4sec T=5sec T=6sec T=7sec Q 2% W Q 2.5% W Q 3% W Q 3.5% W Q 4% W Q 4.5% W</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	HHT	$K_i=10K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W_s)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec T=3sec T=4sec T=5sec T=6sec T=7sec Q 2% W Q 2.5% W Q 3% W Q 3.5% W Q 4% W Q 4.5% W</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	HHT	$K_i=10K_p$	7

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=10K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p>							

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	7

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W_s)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (blue solid) T=3sec (orange solid) T=4sec (yellow solid) T=5sec (purple solid) T=6sec (green solid) T=7sec (light blue solid) Q 2% W (dotted) Q 2.5% W (dashed) Q 3% W (dash-dot) Q 3.5% W (long-dash) Q 4% W (short-dash) Q 4.5% W (dash-dot-dot)</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W_s)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (blue solid) T=3sec (orange solid) T=4sec (yellow solid) T=5sec (purple solid) T=6sec (green solid) T=7sec (light blue solid) Q 2% W (dotted) Q 2.5% W (dashed) Q 3% W (dash-dot) Q 3.5% W (long-dash) Q 4% W (short-dash) Q 4.5% W (dash-dot-dot)</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	7

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	7

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=5K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=5K_p$	7

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	7

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=10K_p$	7
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=10K_p$	7

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W_s)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (Blue solid) T=3sec (Orange solid) T=4sec (Yellow solid) T=5sec (Purple solid) T=6sec (Green solid) T=7sec (Cyan solid) Q 2% W (Dotted) Q 2.5% W (Dashed) Q 3% W (Dotted) Q 3.5% W (Dashed) Q 4% W (Dotted) Q 4.5% W (Dashed)</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	3
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W_s)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (Blue solid) T=3sec (Orange solid) T=4sec (Yellow solid) T=5sec (Purple solid) T=6sec (Green solid) T=7sec (Cyan solid) Q 2% W (Dotted) Q 2.5% W (Dashed) Q 3% W (Dotted) Q 3.5% W (Dashed) Q 4% W (Dotted) Q 4.5% W (Dashed)</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	3

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W_s)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (Blue) T=3sec (Orange) T=4sec (Yellow) T=5sec (Purple) T=6sec (Green) T=7sec (Light Blue) Q 2% W (Dotted) Q 2.5% W (Dashed) Q 3% W (Dotted) Q 3.5% W (Dashed) Q 4% W (Dotted) Q 4.5% W (Dashed)</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	3
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W_s)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (Blue) T=3sec (Orange) T=4sec (Yellow) T=5sec (Purple) T=6sec (Green) T=7sec (Light Blue) Q 2% W (Dotted) Q 2.5% W (Dashed) Q 3% W (Dotted) Q 3.5% W (Dashed) Q 4% W (Dotted) Q 4.5% W (Dashed)</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	3

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	3
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	3

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=5K_p$	3
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=5K_p$	3

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=5K_p$	3
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=5K_p$	3

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	3
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	3

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W_s)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (Blue solid) T=3sec (Orange solid) T=4sec (Yellow solid) T=5sec (Purple solid) T=6sec (Green solid) T=7sec (Cyan solid) Q 2% W (Dotted) Q 2.5% W (Dashed) Q 3% W (Dash-dot) Q 3.5% W (Long-dash) Q 4% W (Short-dash) Q 4.5% W (Dash-dot-dot)</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=15K_p$	3
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W_s)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (Blue solid) T=3sec (Orange solid) T=4sec (Yellow solid) T=5sec (Purple solid) T=6sec (Green solid) T=7sec (Cyan solid) Q 2% W (Dotted) Q 2.5% W (Dashed) Q 3% W (Dash-dot) Q 3.5% W (Long-dash) Q 4% W (Short-dash) Q 4.5% W (Dash-dot-dot)</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=15K_p$	3

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=10K_p$	3
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=10K_p$	3

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	HHT	$K_i=10K_p$	3
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	HHT	$K_i=10K_p$	3

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=10K_p$	3
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=10K_p$	3

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	3
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	3

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	3
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	3

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	3
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	3

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	3
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	3

Gráficos	Selección	Escalamiento	Modelación				Registros
			Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=10K_p$	3
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SE	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=10K_p$	3

Para registros escalados en el dominio del tiempo

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
----------	----	------	-------	------------	--	--	--	------

				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=5K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=5K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=5K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=5K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
----------	----	------	-------	------------	--	--	--	------

				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (Blue solid) T=3sec (Orange solid) T=4sec (Yellow solid) T=5sec (Purple solid) T=6sec (Green solid) T=7sec (Light Blue solid) Q 2% W (Dotted) Q 2.5% W (Dashed) Q 3% W (Dash-dot) Q 3.5% W (Long-dash) Q 4% W (Short-dash) Q 4.5% W (Dash-dot-dot)</p>	Aleatorio (con Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (Blue solid) T=3sec (Orange solid) T=4sec (Yellow solid) T=5sec (Purple solid) T=6sec (Green solid) T=7sec (Light Blue solid) Q 2% W (Dotted) Q 2.5% W (Dashed) Q 3% W (Dash-dot) Q 3.5% W (Long-dash) Q 4% W (Short-dash) Q 4.5% W (Dash-dot-dot)</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=15K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=15K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
----------	----	------	-------	------------	--	--	--	------

				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (blue solid) T=3sec (orange solid) T=4sec (yellow solid) T=5sec (purple solid) T=6sec (green solid) T=7sec (light blue solid) Q 2% W (dotted) Q 2.5% W (dashed) Q 3% W (dash-dot) Q 3.5% W (long-dash) Q 4% W (short-dash) Q 4.5% W (solid)</p>	Aleatorio (con Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (blue solid) T=3sec (orange solid) T=4sec (yellow solid) T=5sec (purple solid) T=6sec (green solid) T=7sec (light blue solid) Q 2% W (dotted) Q 2.5% W (dashed) Q 3% W (dash-dot) Q 3.5% W (long-dash) Q 4% W (short-dash) Q 4.5% W (solid)</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=10K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	HHT	$K_i=10K_p$	21
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	HHT	$K_i=10K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
----------	----	------	-------	------------	--	--	--	------

				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (solid blue) T=3sec (solid orange) T=4sec (solid yellow) T=5sec (solid purple) T=6sec (solid green) T=7sec (solid light blue) Q 2% W (dotted black) Q 2.5% W (dashed black) Q 3% W (dash-dot black) Q 3.5% W (long-dash black) Q 4% W (short-dash black) Q 4.5% W (dash-dot-dot black)</p>	Aleatorio (con Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (solid blue) T=3sec (solid orange) T=4sec (solid yellow) T=5sec (solid purple) T=6sec (solid green) T=7sec (solid light blue) Q 2% W (dotted black) Q 2.5% W (dashed black) Q 3% W (dash-dot black) Q 3.5% W (long-dash black) Q 4% W (short-dash black) Q 4.5% W (dash-dot-dot black)</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=10K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=5K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=5K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
----------	----	------	-------	------------	--	--	--	------

				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (Blue solid) T=3sec (Orange solid) T=4sec (Yellow solid) T=5sec (Purple solid) T=6sec (Green solid) T=7sec (Cyan solid) Q 2% W (Dotted) Q 2.5% W (Dashed) Q 3% W (Dash-dot) Q 3.5% W (Long-dash) Q 4% W (Short-dash) Q 4.5% W (Dash-dot-dot)</p>	Aleatorio (con Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=5K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (Blue solid) T=3sec (Orange solid) T=4sec (Yellow solid) T=5sec (Purple solid) T=6sec (Green solid) T=7sec (Cyan solid) Q 2% W (Dotted) Q 2.5% W (Dashed) Q 3% W (Dash-dot) Q 3.5% W (Long-dash) Q 4% W (Short-dash) Q 4.5% W (Dash-dot-dot)</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=5K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (con Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=15K_p$	21
<p style="text-align: center;">Gráfico ADRS</p>	Aleatorio (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=15K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
----------	----	------	-------	------------	--	--	--	------

				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend:</p> <ul style="list-style-type: none"> T=2sec T=3sec T=4sec T=5sec T=6sec T=7sec Q 2% W Q 2.5% W Q 3% W Q 3.5% W Q 4% W Q 4.5% W 	Aleatorio (con Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=15K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend:</p> <ul style="list-style-type: none"> T=2sec T=3sec T=4sec T=5sec T=6sec T=7sec Q 2% W Q 2.5% W Q 3% W Q 3.5% W Q 4% W Q 4.5% W 	Aleatorio (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=15K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=10K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
----------	----	------	-------	------------	--	--	--	------

				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (solid blue) T=3sec (solid orange) T=4sec (solid yellow) T=5sec (solid purple) T=6sec (solid green) T=7sec (solid cyan) Q 2% W (dotted) Q 2.5% W (dashed) Q 3% W (dash-dot) Q 3.5% W (long-dash) Q 4% W (short-dash) Q 4.5% W (dash-dot-dot)</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (solid blue) T=3sec (solid orange) T=4sec (solid yellow) T=5sec (solid purple) T=6sec (solid green) T=7sec (solid cyan) Q 2% W (dotted) Q 2.5% W (dashed) Q 3% W (dash-dot) Q 3.5% W (long-dash) Q 4% W (short-dash) Q 4.5% W (dash-dot-dot)</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	HHT	$K_i=10K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=10K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
----------	----	------	-------	------------	--	--	--	------

				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (solid blue) T=3sec (solid orange) T=4sec (solid yellow) T=5sec (solid purple) T=6sec (solid green) T=7sec (solid cyan) Q 2% W (dotted black) Q 2.5% W (dashed black) Q 3% W (dash-dot black) Q 3.5% W (long-dash black) Q 4% W (short-dash black) Q 4.5% W (dash-dot-dot black)</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=5K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p> <p>Corte Basal (V/W)</p> <p>Desplazamiento (mm)</p> <p>Legend: T=2sec (solid blue) T=3sec (solid orange) T=4sec (solid yellow) T=5sec (solid purple) T=6sec (solid green) T=7sec (solid cyan) Q 2% W (dotted black) Q 2.5% W (dashed black) Q 3% W (dash-dot black) Q 3.5% W (long-dash black) Q 4% W (short-dash black) Q 4.5% W (dash-dot-dot black)</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=5K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=5K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=5K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Newmark	$K_i=15K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=15K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Bi-lineal	Alpha	$K_i=15K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=10K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	HHT	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	HHT	$K_i=10K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=10K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=10K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=5K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=5K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=5K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=5K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=15K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Newmark	$K_i=15K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección

Gráficos	S*	E.O*	Escl.	Modelación				Reg.
				Amortig	Histéresis	Método Integración	Relación K_i/K_p	
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (con Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=15K_p$	21
<p>Gráfico ADRS</p>	Intensidad de Arias (sin Concepción)	SMP	TD	5%	Boue-Wen	Alpha	$K_i=15K_p$	21

E.O*: Espectro Objetivo; S*: Selección