

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL PASIVO
EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE EDIFICACIONES”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

KEYVIN YULIÑO SALDAÑA VÁSQUEZ

ASESOR:

DR. HUGO V. L. SCALETTI FARINA

LIMA - PERÚ

2021

© 2021, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados
**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**
Saldaña Vásquez, Keyvin Yuliño
ksaldanav@uni.pe
943571444

*A mis padres por su amor infinito
y a mis hermanos por su apoyo incondicional.*

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación ha sido el proyecto más demandante y retador que he afrontado hasta el momento. Por tal motivo, la culminación de esta tesis me llena de una inconmensurable alegría, orgullo y satisfacción. Sin embargo, alcanzar esta meta no hubiese sido posible sin la participación de personas e instituciones que me apoyaron durante todo este proceso. Por ello, quisiera usar este espacio para mostrarles mis más profundos y sinceros agradecimientos:

- A mi “Alma Mater”, la Universidad Nacional de Ingeniería y particularmente a la Facultad de Ingeniería Civil, por brindarme una formación académica sólida, por permitirme recibir cátedra de excelentes docentes e inculcarme valores y vocación de servicio.
- A mi asesor el Dr. Hugo Scaletti Farina por su valiosa guía, por sus consejos, sus sugerencias y en especial por el tiempo brindado para el desarrollo de la presente investigación. Ha sido para mí un honor y un placer trabajar bajo su supervisión.
- Al Bach. Jorge Lulimachi Shuan, mi amigo y colega, por su confianza y desprendimiento al ayudarme durante la etapa inicial de esta investigación.
- A la Ing. Luciana Carrasco Lonkina, por brindarme soporte emocional en aquellos momentos en los que el estudio y la investigación ocuparon mi tiempo y esfuerzo.
- Al Ing. Julian Palacios Espinoza por solventar muchas de mis dudas durante el proceso de realización de la presente tesis.
- A la Bach. Francheska Ñaupari Medina, por su motivación y su apoyo constante e incondicional.

ÍNDICE

RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
PRÓLOGO	X
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE FIGURAS	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	XVIII
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERALIDADES	1
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	3
1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 HIPÓTESIS DEL ESTUDIO	4
1.4.1 Hipótesis General	4
1.4.2 Hipótesis Específicas	4
1.5 METODOLOGÍA	5
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO	6
2.1 DISPOSITIVOS DE CONTROL PASIVO	6
2.1.1 Aisladores Sísmicos	6
2.1.2 Disipadores de Fluido Viscoso	8
2.1.3 Disipadores Histeréticos	9
2.1.4 Amortiguadores de Masa Sintonizada	10
2.2 MODELOS HISTERÉTICOS PARA LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL	11
2.2.1 Modelo Histerético Bilineal	11
2.2.2 Modelo Histerético de Bouc-Wen	12
2.2.3 Modelo Histerético para Disipador de Fluido Viscoso	13
2.3 MODELOS SIMPLIFICADOS PARA EL ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA	14
2.3.1 Modelo de Viga de Corte	14

2.3.2	Modelo de Masas Concentradas	17
2.4	NORMAS DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS CON PROTECCIÓN SÍSMICA	19
2.4.1	Recomendaciones ASCE 7-16	20
2.4.2	Norma Técnica Peruana E.031	23
2.5	REGISTROS SÍSMICOS	24
2.5.1	Registros Sísmicos Originales	25
2.5.2	Ajuste de Registros Sísmicos a un Espectro Objetivo	26
2.5.3	Registros Sísmicos Ajustados	28
CAPÍTULO III: ANÁLISIS SÍSMICO DE EDIFICACIONES CON BASE AIS- LADA		30
3.1	ECUACIONES DE EQUILIBRIO	30
3.2	ALGORITMO DE INTEGRACIÓN NUMÉRICA	33
3.2.1	Formulación Incremental del Método Beta de Newmark	33
3.2.2	Linealización de la Fuerza de la Interfaz de Aislamiento	34
3.2.3	Algoritmo de Solución para Edificaciones Aisladas	35
3.3	PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS	39
3.4	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS	40
3.4.1	Predimensionamiento	40
3.4.2	Resultados	42
3.5	RESPUESTA SÍSMICA DE MODELOS SIMPLES	45
3.5.1	Importancia de la Razón de Aislamiento	46
3.5.2	Propiedades Nominales, Máximas y Mínimas de la Interfaz de Aislamiento	51
3.5.3	Consideraciones Relativas al Amortiguamiento de la Super- estructura	57
3.6	COMENTARIOS FINALES	62
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS SÍSMICO DE EDIFICACIONES CON DISIPADO- RES DE FLUIDO VISCOSO		63
4.1	ECUACIONES DE EQUILIBRIO	63
4.2	ALGORITMO DE INTEGRACIÓN NUMÉRICA	65
4.2.1	Formulación Incremental del Método de Diferencia Central	65
4.2.2	Algoritmo de Solución para Edificaciones con Disipadores de Fluido Viscoso	66
4.3	PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS	67
4.4	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS	70

4.4.1	Predimensionamiento	70
4.4.2	Resultados	72
4.5	RESPUESTA SÍSMICA DE MODELOS SIMPLES	75
4.5.1	Importancia del Factor de Reducción	78
4.5.2	Influencia del Factor de Amplificación	82
4.5.3	Influencia del Período Fundamental de la Edificación	87
4.6	COMENTARIOS FINALES	92
CAPÍTULO V: ANÁLISIS SÍSMICO DE EDIFICACIONES CON DISIPADORES HISTERÉTICOS		93
5.1	ECUACIONES DE EQUILIBRIO	93
5.2	ALGORITMO DE INTEGRACIÓN NUMÉRICA	95
5.2.1	Formulación Incremental del Método de Runge-Kutta de Cuarto Orden	95
5.2.2	Algoritmo de Solución para Edificaciones con Disipadores Histeréticos	95
5.3	PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS	97
5.4	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS	103
5.4.1	Predimensionamiento	103
5.4.2	Resultados	105
5.5	RESPUESTA SÍSMICA DE MODELOS SIMPLES	108
5.5.1	Importancia del Factor de Reducción	110
5.5.2	Influencia del Período Fundamental de la Edificación	115
5.6	COMENTARIOS FINALES	119
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS SÍSMICO DE EDIFICACIONES CON AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADA		120
6.1	ECUACIONES DE EQUILIBRIO	120
6.2	ALGORITMO DE INTEGRACIÓN NUMÉRICA	121
6.2.1	Formulación Incremental del Método de Diferencia Central	121
6.2.2	Algoritmo de Solución para Edificaciones con Amortiguadores de Masa Sintonizada	122
6.3	PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS	124
6.4	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS	124
6.4.1	Predimensionamiento	125
6.4.2	Resultados	126
6.5	RESPUESTA SÍSMICA DE MODELOS SIMPLES	128
6.5.1	Importancia de la Razón de Masa	129

6.5.2	Influencia del Amortiguamiento del AMS	134
6.6	COMENTARIOS FINALES	138
CAPÍTULO VII: APLICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONTROL PASIVO EN EDIFICACIONES		139
7.1	EDIFICIO PRINCIPAL DEL AEROPUERTO JORGE CHÁVEZ	139
7.1.1	Edificación Original	140
7.1.2	Edificación con Disipadores de Fluido Viscoso	142
7.1.3	Edificación con Disipadores Histeréticos	147
7.2	EDIFICIO DE VIVIENDA MULTIFAMILIAR	153
7.2.1	Edificación Original	154
7.2.2	Edificación con Amortiguador de Masa Sintonizada	155
7.2.3	Edificación con Disipadores Histeréticos	160
7.3	EDIFICIO DEL CENTRO DE INFORMACIÓN FIC UNI	166
7.3.1	Edificación con Base Fija	167
7.3.2	Edificación con Aislamiento de Base	168
7.3.3	Edificación con Disipadores de Fluido Viscoso	173
CONCLUSIONES		179
RECOMENDACIONES		181
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		182
ANEXOS		186
ANEXO A: CÓDIGOS EN PYTHON		186
	Respuesta Sísmica de una Edificación con AS	186
	Respuesta Sísmica de una Edificación con DFV	189
	Respuesta Sísmica de una Edificación con DH	192
	Respuesta Sísmica de una Edificación con AMS	193
	Funciones	195
ANEXO B: HISTÉRESIS DE LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL		198
	Edificio Principal del Aeropuerto Jorge Chavez	198
	Edificio de Vivienda Multifamiliar	198
	Edificio del Centro de Información FIC UNI	199

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es estudiar la eficiencia de los sistemas de control pasivo para mejorar la respuesta sísmica de las edificaciones. En los primeros capítulos de la presente tesis se usa el lenguaje de programación *Python* para obtener las respuestas sísmicas de modelos simplificados de edificaciones, con diferente número de niveles, las cuales incorporan cuatro sistemas de control pasivo distintos. Dichos modelos simplificados emplean las siguientes suposiciones: la edificación usa un modelo de masas concentradas de n GDL cuyas propiedades se obtienen de un modelo de viga de corte, la estructura principal tiene un comportamiento lineal y elástico y por último, el periodo fundamental es directamente proporcional al número de niveles.

Los cuatro sistemas de control pasivo estudiados son: el aislamiento sísmico (AS), los disipadores de fluido viscoso (DFV), los disipadores histeréticos (DH) y los amortiguadores de masa sintonizada (AMS). En primer lugar, se analizan edificaciones que tienen interfaces de aislamiento con comportamiento histerético de tipo bilineal. Los parámetros de estudio en este caso son: la razón de aislamiento (r), las propiedades mínimas (λ_{min}), nominales (λ_{nom}) y máximas (λ_{max}) de la interfaz de aislamiento y el amortiguamiento de la superestructura. Asimismo, se estudian edificaciones con disipadores de energía, tanto los de fluido viscoso con comportamiento no lineal así como los histeréticos con comportamiento de Bouc Wen; los parámetros de estudio son: el factor de reducción objetivo (η_δ), el periodo fundamental (una medida indirecta de la rigidez lateral) y además en el caso de los DFV se estudia el factor de amplificación (f_A). Finalmente, se analizan edificaciones que incorporan amortiguadores de masa sintonizada en su último nivel, los parámetros de estudio en este caso son: la razón de masa (r_a) y el amortiguamiento del AMS (β_a). Luego de estudiar los cuatro sistemas de control pasivo, se concluye que todos permiten reducir las respuestas sísmicas de las edificaciones. Sin embargo, cada uno tiene una efectividad diferente. Así por ejemplo, para edificaciones de pocos niveles y con ciertas características específicas, el aislamiento de base es el sistema con la mayor efectividad, seguido por los DFV y luego los DH.

En el capítulo final de esta tesis, se emplea el software *ETABS* para obtener las respuestas sísmicas de tres modelos tridimensionales de edificaciones de concreto armado existentes. Para cada edificación se plantean dos alternativas usando diferentes tipos de sistemas de control pasivo. Finalmente, se comparan las reducciones obtenidas tanto por los modelos simples, así como por los modelos tridimensionales. Llegando a la conclusión que los modelos simplificados permiten realizar una predicción rápida y aceptable de los niveles de reducción de la respuesta sísmica en edificaciones que incorporan dispositivos de control pasivo.

ABSTRACT

The objective of this research is to study the efficiency of passive control systems to improve the seismic response of buildings. In the first chapters of this thesis, the *Python* programming language is used to obtain the seismic responses of simplified building models, with different number of levels, which incorporate four different passive control systems. These simplified models use the following assumptions: the building uses a concentrated mass model of n DOF whose properties are obtained from a shear beam model, the main structure has a linear and elastic behavior and finally, the fundamental period is directly proportional to the number of levels.

The four passive control systems studied are: base isolation (BI), fluid viscous dampers (FVD), hysteretic dampers (HD) and tuned mass dampers (TMD). In the first place, buildings that have isolation interfaces with bilinear hysteretic behavior are analyzed. The study parameters in this case are: the isolation ratio (r), the minimum (λ_{min}), nominal (λ_{nom}) and maximum (λ_{max}) properties of the isolation interface and the damping of the superstructure. Likewise, buildings with energy dissipators are studied, both fluid viscous with non-linear behavior as well as hysteretic with Bouc Wen behavior; the study parameters are: the target reduction factor (η_δ), the fundamental period (an indirect measure of lateral stiffness) and in the case of FVD, the amplification factor (f_A) also studied. Finally, buildings that incorporate tuned mass dampers at their last level are analyzed, the study parameters in this case are: the mass ratio (r_a) and the TMD damping (β_a). After studying the four passive control systems, it is concluded that all of them will reduce the seismic responses of buildings. However, each one has a different effectiveness. Thus, for example, for buildings with few levels and with specific characteristics, base isolation is the system that presents the highest effectiveness, followed by the FVD and then the HD.

In the final chapter of this thesis, *ETABS* software is used to obtain the seismic responses of three three-dimensional models of existing reinforced concrete buildings. For each building, two alternatives are proposed using different types of passive control systems. Finally, the reductions obtained by both the simple models and the three-dimensional models are compared. Concluding that the simplified models allow a quick and acceptable prediction of the levels of reduction of the seismic response in buildings with passive control devices.

PRÓLOGO

En esta tesis Keyvin Saldaña ha estudiado la eficiencia de diversos tipos de dispositivos de control pasivo para reducir las fuerzas cortantes, los desplazamientos y distorsiones de entrepiso, así como las máximas aceleraciones producidas por acciones de sismo en edificaciones. Se han considerado aisladores, disipadores viscosos e hysteréticos y amortiguadores de masa sintonizada.

El trabajo incluye una revisión de procedimientos para predimensionar aisladores o disipadores viscosos, ya planteados por otros autores, pero también se han desarrollado algunas ideas propias para el caso de disipadores hysteréticos.

Los análisis tiempo historia se han hecho con registros de sismos reales modificados para ajustarse al espectro de diseño de la norma E.031 del Reglamento Nacional de Edificaciones.

En los capítulos iniciales se tratan modelos simplificados, de acoplamiento cercano, para estudiar la eficiencia de los dispositivos en estructuras con distinto número de niveles. En cada caso se han hecho variaciones de los parámetros que resultan más significativos. En estos análisis se ha supuesto que la estructura propiamente dicha tiene un comportamiento lineal, mientras que para los dispositivos de control si se ha considerado la no linealidad. Para ello el autor ha desarrollado diversos programas en *Python*, integrando las ecuaciones de equilibrio con diversos métodos: diferencia central, Newmark o un método de Runge-Kutta de cuarto orden global.

Las observaciones hechas con los modelos simplificados han sido finalmente verificadas al analizar tres estructuras reales, en cada caso con dos distintas alternativas de dispositivos de control sísmico. Para esta etapa se ha empleado una versión educativa de *ETABS*.

Considero que el trabajo desarrollado por Keyvin Saldaña será muy útil, tanto para el estudiante como para el ingeniero práctico, que encontrarán en esta tesis información detallada sobre los procedimientos de predimensionamiento y de análisis, así como información útil para decidir las alternativas que en cada caso podrían ser más apropiadas.

Dr. Hugo Scaletti Farina

Asesor de la tesis

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 2.1	Factor de reducción por amortiguamiento	21
Tabla N° 2.2	Factores de escalamiento	28
Tabla N° 3.1	Parámetros de la interfaz de aislamiento	42
Tabla N° 3.2	Resultados máximos de la edificación aislada	44
Tabla N° 3.3	Resultados máximos de la edificación en base fija	44
Tabla N° 3.4	Parámetros de la interfaz de aislamiento $r = 2$	45
Tabla N° 3.5	Parámetros de la interfaz de aislamiento $r = 3$	45
Tabla N° 3.6	Parámetros de la interfaz de aislamiento $r = 4$	46
Tabla N° 3.7	Parámetros de la interfaz de aislamiento $r = 5$	46
Tabla N° 3.8	Fuerza cortante basal normalizada máxima	47
Tabla N° 3.9	Desplazamiento relativo máximo del último nivel	47
Tabla N° 3.10	Aceleración absoluta máxima del último nivel	47
Tabla N° 3.11	Desplazamiento máximo de la interfaz de aislamiento	48
Tabla N° 3.12	Reducción de la fuerza cortante basal normalizada	48
Tabla N° 3.13	Reducción del desplazamiento relativo del último nivel	48
Tabla N° 3.14	Reducción de la aceleración absoluta del último nivel	49
Tabla N° 3.15	Factores de modificación máximos y mínimos	51
Tabla N° 3.16	Fuerza cortante basal normalizada - λ_{min} y λ_{max}	52
Tabla N° 3.17	Desplazamiento relativo del último nivel - λ_{min} y λ_{max}	53
Tabla N° 3.18	Aceleración absoluta del último nivel - λ_{min} y λ_{max}	53
Tabla N° 3.19	Desplazamiento de la interfaz de aislamiento - λ_{min} y λ_{max}	53
Tabla N° 3.20	Reducción de la fuerza cortante basal - λ_{min} y λ_{max}	54
Tabla N° 3.21	Reducción del desplazamiento del último nivel - λ_{min} y λ_{max}	54
Tabla N° 3.22	Reducción de la aceleración del último nivel - λ_{min} y λ_{max}	54
Tabla N° 3.23	Valores de amortiguamiento recomendados	57
Tabla N° 3.24	Fuerza cortante V_b/P_{tot} y la reducción de V_b para $\beta = 2\%$	58
Tabla N° 3.25	Desplazamiento u_n y la reducción de u_n para $\beta = 2\%$	58
Tabla N° 3.26	Aceleración \ddot{u}_n y la reducción de \ddot{u}_n para $\beta = 2\%$	59
Tabla N° 3.27	Desplazamiento de la interfaz de aislamiento para $\beta = 2\%$	59
Tabla N° 4.1	Parámetros de los DFV	72
Tabla N° 4.2	Resultados máximos de la edificación con DFV	75
Tabla N° 4.3	Parámetros de los DFV para $\eta_\delta = 0.4$	76
Tabla N° 4.4	Parámetros de los DFV para $\eta_\delta = 0.5$	76
Tabla N° 4.5	Parámetros de los DFV para $\eta_\delta = 0.6$	76
Tabla N° 4.6	Parámetros de los DFV para $\eta_\delta = 0.7$	77
Tabla N° 4.7	Fuerza cortante basal normalizada máxima	78
Tabla N° 4.8	Desplazamiento máximo del último nivel	78

Tabla N° 4.9	Aceleración absoluta máxima del último nivel	79
Tabla N° 4.10	Reducción de la fuerza cortante basal normalizada	79
Tabla N° 4.11	Reducción del desplazamiento del último nivel	80
Tabla N° 4.12	Reducción de la aceleración absoluta del último nivel	80
Tabla N° 4.13	Fuerza cortante basal normalizada - $f_A = 1$ y $f_A = 2$	83
Tabla N° 4.14	Desplazamiento del último nivel - $f_A = 1$ y $f_A = 2$	83
Tabla N° 4.15	Aceleración absoluta del último nivel - $f_A = 1$ y $f_A = 2$	84
Tabla N° 4.16	Reducción de la fuerza cortante basal - $f_A = 1$ y $f_A = 2$	84
Tabla N° 4.17	Reducción desplazamiento del último nivel - $f_A = 1$ y $f_A = 2$	84
Tabla N° 4.18	Reducción de la aceleración del último nivel - $f_A = 1$ y $f_A = 2$	85
Tabla N° 4.19	Respuestas de edificaciones sin DFV - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$	88
Tabla N° 4.20	Fuerza cortante basal - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$	88
Tabla N° 4.21	Desplazamiento del último nivel - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$	88
Tabla N° 4.22	Aceleración absoluta del último nivel - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$	89
Tabla N° 4.23	Reducción de la cortante basal - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$	89
Tabla N° 4.24	Reducción del desplazamiento u_n - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$	89
Tabla N° 4.25	Reducción de la aceleración \ddot{u}_n - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$	90
Tabla N° 5.1	Parámetros de los disipadores histeréticos	104
Tabla N° 5.2	Resultados máximos de la edificación con DH	107
Tabla N° 5.3	Parámetros de los DH para $\eta_\delta = 0.4$	109
Tabla N° 5.4	Parámetros de los DH para $\eta_\delta = 0.5$	109
Tabla N° 5.5	Parámetros de los DH para $\eta_\delta = 0.6$	110
Tabla N° 5.6	Parámetros de los DH para $\eta_\delta = 0.7$	110
Tabla N° 5.7	Fuerza cortante basal normalizada máxima	111
Tabla N° 5.8	Desplazamiento máximo del último nivel	111
Tabla N° 5.9	Aceleración absoluta máxima del último nivel	111
Tabla N° 5.10	Reducción de la fuerza cortante basal normalizada	112
Tabla N° 5.11	Reducción del desplazamiento del último nivel	112
Tabla N° 5.12	Reducción de la aceleración absoluta del último nivel	113
Tabla N° 5.13	Fuerzas cortantes basales - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$	115
Tabla N° 5.14	Desplazamiento del último nivel - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$	115
Tabla N° 5.15	Aceleración absoluta del último nivel - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$	116
Tabla N° 5.16	Reducción de la cortante basal - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$	116
Tabla N° 5.17	Reducción del desplazamiento u_n - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$	116
Tabla N° 5.18	Reducción de la aceleración \ddot{u}_n - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$	117
Tabla N° 6.1	Parámetros del amortiguador de masa sintonizada	126
Tabla N° 6.2	Resultados máximos de la edificación con AMS	128
Tabla N° 6.3	Parámetros de los AMS para $r_a = 1\%$	129
Tabla N° 6.4	Parámetros de los AMS para $r_a = 2\%$	129
Tabla N° 6.5	Parámetros de los AMS para $r_a = 3\%$	129

Tabla N° 6.6	Parámetros de los AMS para $r_a = 4\%$	129
Tabla N° 6.7	Fuerza cortante basal normalizada máxima	130
Tabla N° 6.8	Desplazamiento máximo del último nivel	130
Tabla N° 6.9	Aceleración absoluta máxima del último nivel	130
Tabla N° 6.10	Reducción de la fuerza cortante basal normalizada	131
Tabla N° 6.11	Reducción del desplazamiento del último nivel	131
Tabla N° 6.12	Reducción de la aceleración absoluta del último nivel	132
Tabla N° 6.13	Fuerza cortante basal - $\beta_a = 5\%$ y $\beta_a = 15\%$	134
Tabla N° 6.14	Desplazamiento del último nivel - $\beta_a = 5\%$ y $\beta_a = 15\%$	134
Tabla N° 6.15	Aceleración absoluta del último nivel - $\beta_a = 5\%$ y $\beta_a = 15\%$	135
Tabla N° 6.16	Reducción de la cortante basal - $\beta_a = 5\%$ y $\beta_a = 15\%$	135
Tabla N° 6.17	Reducción del desplazamiento u_n - $\beta_a = 5\%$ y $\beta_a = 15\%$	135
Tabla N° 6.18	Reducción de la aceleración \ddot{u}_n - $\beta_a = 5\%$ y $\beta_a = 15\%$	136
Tabla N° 7.1	Características dinámicas del edificio Jorge Chávez	141
Tabla N° 7.2	Constantes de amortiguamiento no lineales de los DFV	144
Tabla N° 7.3	Respuestas sísmicas máximas y porcentaje de reducción	146
Tabla N° 7.4	Comparación de porcentajes de reducción	147
Tabla N° 7.5	Rigideces y cortantes de la edificación sin DH	148
Tabla N° 7.6	Propiedades histeréticas de los DH	149
Tabla N° 7.7	Respuestas sísmicas máximas y porcentaje de reducción	152
Tabla N° 7.8	Comparación de porcentajes de reducción	152
Tabla N° 7.9	Características dinámicas del edificio de viviendas	154
Tabla N° 7.10	Respuestas sísmicas máximas y porcentaje de reducción	159
Tabla N° 7.11	Comparación de porcentajes de reducción	160
Tabla N° 7.12	Rigideces y cortantes de la edificación sin DH	161
Tabla N° 7.13	Propiedades histeréticas de los DH	162
Tabla N° 7.14	Respuestas sísmicas máximas y porcentaje de reducción	165
Tabla N° 7.15	Comparación de porcentajes de reducción	165
Tabla N° 7.16	Características dinámicas del edificio de viviendas	167
Tabla N° 7.17	Respuestas sísmicas máximas y porcentaje de reducción	172
Tabla N° 7.18	Comparación de porcentajes de reducción	173
Tabla N° 7.19	Constantes de amortiguamiento no lineales de los DFV	175
Tabla N° 7.20	Respuestas sísmicas máximas y porcentaje de reducción	178
Tabla N° 7.21	Comparación de porcentajes de reducción	178

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 2.1	Dispositivos de aislamiento sísmico	8
Figura N° 2.2	Disipador de fluido viscoso	8
Figura N° 2.3	Disipadores hysteréticos metálicos	10
Figura N° 2.4	Amortiguador de masa sintonizada	10
Figura N° 2.5	Modelo hysterético bilineal	11
Figura N° 2.6	Modelo hysterético de Bouc-Wen	12
Figura N° 2.7	Modelo hysterético para DFV	13
Figura N° 2.8	Modelo de viga de corte	15
Figura N° 2.9	Acelerogramas del sismo de Lima de 1966	25
Figura N° 2.10	Acelerogramas del sismo de Pisco de 2007	25
Figura N° 2.11	Acelerogramas del sismo de Maule de 2010	26
Figura N° 2.12	Espectro elástico de la norma E.031	27
Figura N° 2.13	Ajuste de los registros al espectro de la norma E.031	27
Figura N° 2.14	Acelerogramas espectrocompatibles - Lima 1966	28
Figura N° 2.15	Acelerogramas espectrocompatibles - Pisco 2007	29
Figura N° 2.16	Acelerogramas espectrocompatibles - Maule 2010	29
Figura N° 3.1	Edificación con aislamiento de base	30
Figura N° 3.2	Linealización del modelo bilineal	35
Figura N° 3.3	Algoritmo de solución para edificaciones aisladas	38
Figura N° 3.4	Histéresis de la interfaz de aislamiento	42
Figura N° 3.5	Desplazamiento de la interfaz de aislamiento	42
Figura N° 3.6	Desplazamiento relativo del último nivel	43
Figura N° 3.7	Aceleración absoluta del último nivel	43
Figura N° 3.8	Fuerza cortante basal normalizada	44
Figura N° 3.9	Desplazamiento máximo de la interfaz de aislamiento	49
Figura N° 3.10	Reducción de la fuerza cortante basal normalizada	50
Figura N° 3.11	Reducción del desplazamiento relativo del último nivel	50
Figura N° 3.12	Reducción de la aceleración absoluta del último nivel	50
Figura N° 3.13	Envolturas de la histéresis de la interfaz de aislamiento	52
Figura N° 3.14	Reducción de la cortante basal - λ_{min} , λ_{nom} y λ_{max}	55
Figura N° 3.15	Reducción del desplazamiento u_n - λ_{min} , λ_{nom} y λ_{max}	55
Figura N° 3.16	Reducción de la aceleración \ddot{u}_n - λ_{min} , λ_{nom} y λ_{max}	56
Figura N° 3.17	Desplazamiento u_b - λ_{min} , λ_{nom} y λ_{max}	56
Figura N° 3.18	Reducción de la cortante basal - $\beta = 2\%$ y $\beta = 5\%$	60
Figura N° 3.19	Reducción del desplazamiento u_n - $\beta = 2\%$ y $\beta = 5\%$	60
Figura N° 3.20	Reducción de la aceleración \ddot{u}_n - $\beta = 2\%$ y $\beta = 5\%$	61
Figura N° 3.21	Desplazamiento u_b - $\beta = 2\%$ y $\beta = 5\%$	61

Figura N° 4.1	Edificación con disipadores de fluido viscoso	63
Figura N° 4.2	Algoritmo de solución para edificaciones con DFV	67
Figura N° 4.3	η_δ y η_a como función de β	69
Figura N° 4.4	δ y η_δ en edificaciones con DFV	73
Figura N° 4.5	Histéresis de los DFV	73
Figura N° 4.6	Desplazamiento del último nivel	74
Figura N° 4.7	Aceleración absoluta del último nivel	74
Figura N° 4.8	Fuerza cortante basal normalizada	75
Figura N° 4.9	Reducción de la fuerza cortante basal normalizada	81
Figura N° 4.10	Reducción del desplazamiento del último nivel	81
Figura N° 4.11	Reducción de la aceleración absoluta del último nivel	81
Figura N° 4.12	Factor de amplificación para diferentes configuraciones	82
Figura N° 4.13	Reducción de la cortante basal - $f_A = 0.89$, $f_A = 1$ y $f_A = 2$	85
Figura N° 4.14	Reducción desplazamiento u_n - $f_A = 0.89$, $f_A = 1$ y $f_A = 2$	86
Figura N° 4.15	Reducción de la aceleración \ddot{u}_n - $f_A = 0.89$, $f_A = 1$ y $f_A = 2$	86
Figura N° 4.16	Reducción de V_b/P_{tot} - $T = 0.05n$, $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$	90
Figura N° 4.17	Reducción de u_n - $T = 0.05n$, $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$	91
Figura N° 4.18	Reducción de \ddot{u}_n - $T = 0.05n$, $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$	91
Figura N° 5.1	Edificación con disipadores histeréticos	93
Figura N° 5.2	Algoritmo de solución para edificaciones con DH	97
Figura N° 5.3	η_δ en función de K_e y F_y - 1N	99
Figura N° 5.4	η_{Vb} en función de K_e y F_y - 1N	99
Figura N° 5.5	η_δ en función de K_e y F_y - 3N	100
Figura N° 5.6	η_{Vb} en función de K_e y F_y - 3N	100
Figura N° 5.7	η_δ en función de K_e y F_y - 6N	101
Figura N° 5.8	η_{Vb} en función de K_e y F_y - 6N	101
Figura N° 5.9	δ y η_δ en edificaciones con DH	105
Figura N° 5.10	Histéresis de los DH	105
Figura N° 5.11	Desplazamiento del último nivel	106
Figura N° 5.12	Aceleración absoluta del último nivel	106
Figura N° 5.13	Fuerza cortante basal normalizada	107
Figura N° 5.14	Reducción de la fuerza cortante basal normalizada	114
Figura N° 5.15	Reducción del desplazamiento del último nivel	114
Figura N° 5.16	Reducción de la aceleración absoluta del último nivel	114
Figura N° 5.17	Reducción de V_b/P_{tot} - $T = 0.05n$, $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$	117
Figura N° 5.18	Reducción de u_n - $T = 0.05n$, $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$	118
Figura N° 5.19	Reducción de \ddot{u}_n - $T = 0.05n$, $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$	118
Figura N° 6.1	Edificación con amortiguador de masa sintonizada	120
Figura N° 6.2	Algoritmo de solución para edificaciones con AMS	123
Figura N° 6.3	Desplazamiento relativo del AMS	126

Figura N° 6.4	Desplazamiento del último nivel	126
Figura N° 6.5	Aceleración absoluta del último nivel	127
Figura N° 6.6	Fuerza cortante basal normalizada	127
Figura N° 6.7	Reducción de la fuerza cortante basal normalizada	133
Figura N° 6.8	Reducción del desplazamiento del último nivel	133
Figura N° 6.9	Reducción de la aceleración absoluta del último nivel	133
Figura N° 6.10	Reducción de V_b/P_{tot} - $\beta_a = 5\%$, $\beta_a = 10\%$ y $\beta_a = 15\%$	136
Figura N° 6.11	Reducción de u_n - $\beta_a = 5\%$, $\beta_a = 10\%$ y $\beta_a = 15\%$	137
Figura N° 6.12	Reducción de \ddot{u}_n - $\beta_a = 5\%$, $\beta_a = 10\%$ y $\beta_a = 15\%$	137
Figura N° 7.1	Vista en planta del edificio Jorge Chávez	140
Figura N° 7.2	Modelo numérico del edificio Jorge Chávez	140
Figura N° 7.3	Respuestas sísmicas del edificio Jorge Chávez	141
Figura N° 7.4	Modelo numérico del edificio Jorge Chávez con DFV	142
Figura N° 7.5	Respuestas sísmicas del edificio Jorge Chávez con DFV	144
Figura N° 7.6	Desplazamiento u_{10} del edificio Jorge Chávez con DFV	145
Figura N° 7.7	Aceleración \ddot{u}_{10} del edificio Jorge Chávez con DFV	145
Figura N° 7.8	Cortante basal V_b del edificio Jorge Chávez con DFV	146
Figura N° 7.9	Modelo numérico del edificio Jorge Chávez con DH	147
Figura N° 7.10	Respuestas sísmicas del edificio Jorge Chávez con DH	150
Figura N° 7.11	Desplazamiento u_{10} del edificio Jorge Chávez con DH	150
Figura N° 7.12	Aceleración \ddot{u}_{10} del edificio Jorge Chávez con DH	151
Figura N° 7.13	Cortante basal V_b del edificio Jorge Chávez con DH	151
Figura N° 7.14	Vista en planta del edificio de vivienda multifamiliar	153
Figura N° 7.15	Modelo numérico del edificio de vivienda multifamiliar	154
Figura N° 7.16	Respuestas sísmicas del edificio de vivienda	155
Figura N° 7.17	Modelo numérico del edificio de vivienda con AMS	156
Figura N° 7.18	Respuestas sísmicas del edificio de vivienda con AMS	157
Figura N° 7.19	Desplazamiento u_7 del edificio de vivienda con AMS	158
Figura N° 7.20	Aceleración \ddot{u}_7 del edificio de vivienda con AMS	158
Figura N° 7.21	Cortante basal V_b del edificio de vivienda con AMS	159
Figura N° 7.22	Modelo numérico del edificio de vivienda con DH	160
Figura N° 7.23	Respuestas sísmicas del edificio de vivienda con DH	163
Figura N° 7.24	Desplazamiento u_7 del edificio de vivienda con DH	163
Figura N° 7.25	Aceleración \ddot{u}_7 del edificio de vivienda con DH	164
Figura N° 7.26	Cortante basal V_b del edificio de vivienda con DH	164
Figura N° 7.27	Vista en planta del centro de información FIC UNI	166
Figura N° 7.28	Modelo numérico del centro de información FIC UNI	167
Figura N° 7.29	Respuestas sísmicas del centro de información FIC UNI	168
Figura N° 7.30	Modelo del centro de información FIC UNI con AS	169
Figura N° 7.31	Respuestas sísmicas del centro FIC UNI con AS	170

Figura N° 7.32 Desplazamiento u_g del centro FIC UNI con AS	171
Figura N° 7.33 Aceleración \ddot{u}_g del centro FIC UNI con AS	171
Figura N° 7.34 Cortante basal V_b/P_{tot} del centro FIC UNI con AS	172
Figura N° 7.35 Modelo del centro de información FIC UNI con DFV	173
Figura N° 7.36 Respuestas sísmicas del centro FIC UNI con DFV	176
Figura N° 7.37 Desplazamiento u_g del centro FIC UNI con DFV	176
Figura N° 7.38 Aceleración \ddot{u}_g del centro FIC UNI con DFV	177
Figura N° 7.39 Cortante basal V_b del centro FIC UNI con DFV	177

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

SÍMBOLOS

- α : Razón entre la rigidez postfluencia y la rigidez elástica / Exponente de amortiguamiento
- A : Área de la sección transversal de la viga
- β : Porcentaje de amortiguamiento crítico de la superestructura
- β_a : Fracción de amortiguamiento crítico del AMS
- β_M : Amortiguamiento efectivo de la edificación aislada
- B_M : Factor de reducción asociado al amortiguamiento efectivo β_M
- c_a : Amortiguamiento del AMS
- c_s : Velocidad de las ondas de corte a lo largo de la viga de corte
- c_i : Amortiguamiento del i-ésimo entrepiso de la edificación
- C : Matriz de amortiguamiento de la edificación
- C_α : Constante de amortiguamiento
- C_{Nivel} : Constante de amortiguamiento de los DFV de cada entrepiso
- δ : Deriva de entrepiso de la edificación
- D_y : Desplazamiento de fluencia
- D_M : Desplazamiento translacional de la interfaz de aislamiento
- ζ_{n^*} : Fracción de amortiguamiento crítico del enésimo modo
- ζ_i, ζ_j : Fracción de amortiguamiento crítico de los modos i-ésimo y j-ésimo
- f : Factor para estimar el periodo fundamental de los modelos simples
- f_{n^*} : Función del tiempo de la viga de corte
- f_A : Factor de amplificación del DFV
- f_D : Fuerza axial del DFV
- F_i : Fuerza que desarrollan los disipadores del i-ésimo entrepiso
- F_y : Fuerza de fluencia
- F : Vector que recoge las diferencias de las fuerzas de los disipadores
- ϕ_{n^*} : Forma del n-ésimo modo de vibración de la viga de corte
- g : Aceleración de la gravedad
- G : Módulo de corte del material
- h : Altura del entrepiso de la edificación

H	: Altura de la viga de corte
I_n	: Matriz identidad de orden $n \times n$
k_i	: Rigidez del i -ésimo entrepiso de la edificación
k_a	: Rigidez del AMS
K	: Matriz de rigidez de la edificación
K_M	: Rigidez efectiva del sistema de aislamiento
K_e	: Rigidez elástica
K_p	: Rigidez postfluencia
λ	: Relación entre la masa de la superestructura y la masa de la estructura
λ_{min}	: Factor de modificación para obtener las propiedades mínimas del AS
λ_{max}	: Factor de modificación para obtener las propiedades máximas del AS
m_i	: Masa del i -ésimo nivel de la edificación
m_a	: Masa del AMS
m_b	: Masa de la interfaz de aislamiento
m_{tot}	: Masa total de la edificación
M	: Matriz de masa de la edificación
η	: Parámetro que controla la forma del lazo histerético de Bouc Wen
η_δ	: Factor de reducción objetivo respecto a la deriva de entrepiso
n^*	: Modo n -ésimo vibración
n	: Número de niveles de la edificación
N	: Número total de datos del registro sísmico
ρ	: Densidad del material
P_{tot}	: Peso total de la edificación
Q	: Fuerza característica
r	: Razón de aislamiento
r_a	: Razón entre la masa del AMS y la masa total de la edificación
R	: Fuerza cortante de la interfaz de aislamiento
S_{aM}	: Ordenada espectral de la edificación aislada
S	: Factor de amplificación del suelo
θ	: Ángulo de inclinación de los DFV respecto a la horizontal
τ	: Vector de unos de orden $n \times 1$
t	: Tiempo

T_1	: Período fundamental de la edificación
T_a	: Período de sintonización del AMS
T_M	: Período de la edificación aislada
u_i	: Desplazamiento del i-ésimo nivel de estructura
u_b	: Desplazamiento de la interfaz de aislamiento
u_a	: Desplazamiento horizontal del AMS
u_{s_i}	: Desplazamiento del i-ésimo nivel de la superestructura
\ddot{u}_i	: Aceleración del i-ésimo nivel de estructura
\ddot{u}_g	: Aceleración horizontal del suelo debido a un sismo
U	: Factor de uso o importancia
Δv_{max}	: Velocidades relativas máximas de cada nivel
V_b	: Fuerza cortante basal de la edificación
V_i	: Fuerza cortante del i-ésimo de la edificación
ω_1	: Frecuencia angular correspondiente al período fundamental
W	: Peso sísmico de la edificación aislada
W_M	: Energía disipada en cada ciclo de histéresis
Z	: Factor de zona

SIGLAS

ADAS	: Added damping and stiffness (disipador que añade amortiguamiento y rigidez)
AMS	: Amortiguador de masa sintonizada
AS	: Aislador sísmico
ASCE	: American Society of Civil Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Civiles)
ATHL	: Análisis tiempo historia lineal
ATHNL	: Análisis tiempo historia no lineal
CISMID	: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres
DFPB	: Double frictional pendulum bearing (aislador de péndulo friccional doble)
DFV	: Disipador de fluido viscoso
DH	: Disipador histerético
E030	: RNE Norma E.030 “Diseño Sismorresistente”
E031	: RNE Norma E.031 “Aislamiento Sísmico”
FIC UNI	: Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería
FLD	: Flexural link damper (disipador histerético de flexión)
GDL	: Grados de libertad
HDRB	: High damping rubber bearing (aislador elastomérico de alto amortiguamiento)
LRB	: Lead rubber bearing (aislador elastomérico de núcleo de plomo)
NRB	: Natural rubber bearing (aislador elastomérico de caucho natural)
REDACIS	: Red acelerografica del CISMID
RENADIC	: Red nacional de acelerógrafos de la Universidad de Chile
RNE	: Reglamento nacional de edificaciones
SLB	: Shear link Bozzo (disipador histerético de corte Bozzo)
SLD	: Shear link damper (disipador histerético de corte)
TADAS	: Triangular-plate added damping and stiffness (disipador de placa triangular que añade amortiguamiento y rigidez)
TFPB	: Triple frictional pendulum bearing (aislador de péndulo friccional triple)

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El Perú es un país con elevada actividad sísmica, concentrada en la costa oeste y producida principalmente por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana (Calderón et al., 2012). Esta realidad condiciona que el diseño estructural de las edificaciones se encuentre gobernado por la acción sísmica. De acuerdo a la norma E.030 del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), un diseño sismorresistente adecuado logrará evitar el colapso de la edificación ante un sismo severo; sin embargo, no podrá evitar los daños estructurales y no estructurales (en especial el daño en el contenido del edificio).

Debido a esto, resulta de mucho interés contar con técnicas y metodologías modernas para el análisis y diseño de edificaciones sismorresistentes. Para tal efecto, los sistemas de control pasivo proveen una alternativa viable para el diseño de estructuras, frente al enfoque del diseño actual, que está basado en el concepto de ductilidad (Buckle, 2000) y por ende en admitir cierto nivel de daño en un evento sísmico severo.

Los sistemas de control pasivo son sistemas de protección sísmica que no requieren de una fuente de alimentación externa y pueden ser agrupados en tres tipos: disipadores de energía, amortiguadores sintonizados y aisladores de base. Los disipadores de energía aumentan la capacidad de disipación de las estructuras mediante la conversión de energía mecánica en energía térmica; con este principio funcionan los disipadores de fluido viscoso (DFV) y los disipadores histeréticos (DH). Los amortiguadores sintonizados funcionan según el principio de transferencia de energía al amortiguador entre los modos de vibración; un ejemplo de estos dispositivos son los amortiguadores de masa sintonizada (AMS). Por otra parte, los dispositivos de aislamiento de base atenúan la aceleración horizontal del terremoto transmitida a la superestructura modificando las características de vibración libre de la estructura y llevándola a una frecuencia más baja, donde la amplitud de la excitación del terremoto es menor. El aislamiento de base desplaza el período fundamental de la estructura fuera del rango de la energía sísmica dominante y también aumenta la absorción de energía (Parulekar y Reddy, 2009).

El aislamiento sísmico ha sido materia de investigación y desarrollo desde la década de 1990. Ferj (2016) en su investigación realizó un análisis comparativo del desempeño sísmico de hospitales de pórticos de concreto armado con aislamiento sísmico y sus alternativas convencionales de muros estructurales con base fija, llegando a la conclusión que las deformaciones relativas de entrepiso y aceleraciones de piso son sustancialmente menores en las configuraciones aisladas que en

las tradicionales, con reducciones que fluctúan entorno al 60%. Además, la investigación reveló que la implementación de la alternativa aislada permite reducir la fragilidad de los elementos estructurales y no estructurales. Asimismo, Hernández (2016) estudió el comportamiento sísmico de edificios aislados usando un modelo de viga de corte uniforme sobre un aislador lineal, logrando determinar los parámetros dinámicos de mayor influencia en la respuesta sísmica de una edificación y proponiendo gráficos para estimar la respuesta dinámica de manera aproximada y rápida.

El uso de disipadores de fluido viscoso en edificaciones también se ha investigado. Por ejemplo, Ras y Boumechra (2016) realizaron un estudio donde obtuvieron la respuesta sísmica de una edificación de acero estructural de 12 niveles que tenía incorporados disipadores de fluido viscoso. Comparando la respuesta estructural de la edificación con y sin dispositivos de disipación de energía, se llegó a la conclusión que la primera opción posibilita una reducción de los desplazamientos y aceleraciones máximas en alrededor de 35%. Además se evidenció una reducción de hasta 40% en la fuerza cortante y en el momento flector del elemento más esforzado. Estas reducciones son posibles ya que los dispositivos incorporados incrementan las capacidades disipativas de la estructura sin incrementar la rigidez, mejorando el desempeño estructural de la edificación durante un evento sísmico. De igual forma, Narváez (2019) estudió una estructura de 11 niveles con un sistema estructural formado por pórticos de concreto armado equipados con disipadores de fluido viscoso, logrando una reducción del 40% y 50% en términos de fuerza cortante basal y derivas de entrepiso respectivamente en relación a la estructura sin disipadores.

La aplicación de disipadores histeréticos en edificaciones también ha sido motivo de investigación y desarrollo. Saghafi et al. (2019) estudiaron la respuesta sísmica de tres edificaciones de 4, 7 y 10 niveles conformadas por pórticos de concreto armado resistentes a momentos equipados con disipadores histeréticos metálicos de tipo Triangular-plate Added Damping and Stiffness (TADAS), realizando análisis tiempo historia no lineales (ATHNL) usando 7 registros sísmicos. Los resultados indican que las derivas de entrepiso se redujeron un 50% en promedio en las tres estructuras estudiadas. Además, se evidenció una reducción en las aceleraciones máximas de piso, el máximo desplazamiento del piso superior y la máxima fuerza cortante en la base. Por su parte Bozzo et al. (2019) estudiaron un edificio prefabricado de 5 niveles incorporando disipadores histeréticos metálicos de tipo Shear Link Bozzo (SLB), realizando un ATHNL basado en 10 señales sísmicas compatibilizadas con el espectro de la norma peruana E.030 para $R=1$ y un suelo S1 en zona 4. Se estudiaron dos configuraciones estructurales y los resultados muestran que las derivas de entrepiso obtenidas son menores a las estipuladas por la norma

E030. Además la estructura presentó desplazamientos bajos, compatibles con el nivel de desempeño sísmico de ocupación inmediata.

El empleo de amortiguadores de masa sintonizada como un sistema de control pasivo para reducir la respuesta sísmica de edificaciones ha sido estudiado por muchos investigadores. Una muestra de esto es el trabajo de Garrido (2016) donde se estudió la efectividad de los amortiguadores de masa sintonizada haciendo uso de una estructura simplificada de corte sometida a 132 registros sísmico chilenos, obteniendo como resultado una reducción promedio de 15% en estructuras con periodo corto. Además, se evidenció que se logra una mayor reducción conforme se reduce el periodo de la edificación o se aumenta la razón de masas a valores superiores a 4%. Adicionalmente, Inga (2015) estudió la respuesta sísmica de dos edificaciones de concreto armado equipadas con amortiguadores de masa sintonizada frente a 3 registros sísmicos. La primera edificación fue de 10 niveles y presentó una reducción de entre el 12% y 40% para el desplazamiento del piso superior y de entre un 5% y 60% para la fuerza cortante basal. La segunda edificación fue de 16 niveles y 4 sótanos, para la cual se obtuvo una reducción de entre 7% y 60% para desplazamientos de piso superior y de entre 5% y 60% para la fuerza cortante basal.

Con base en las investigaciones antes mencionadas, se concluye que estudiar la eficiencia de los sistemas de control pasivo, entendiendo por eficiencia a la capacidad de reducción de las respuestas sísmicas, permitirá tener un conocimiento más amplio al momento de seleccionar la mejor alternativa del tipo de sistema de protección sísmica a usar, haciendo posible diseñar edificaciones más seguras y con mejores niveles de desempeño sísmico.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Los diferentes sistemas de control pasivo existentes pueden mejorar la respuesta sísmica de una edificación en diversos aspectos. Sin embargo, no son aplicables en todos los casos y no todos reducen las respuestas sísmicas en la misma medida. En consecuencia, resulta importante tener procedimientos y metodologías que permitan a los ingenieros poder elegir el sistema de protección sísmica a usar de acuerdo a las características propias de cada proyecto y a los objetivos de reducción deseados.

El predimensionamiento de los dispositivos de control pasivo termina siendo en muchos casos el resultado de un procedimiento de prueba y error (Silvestri et al., 2010). En este contexto se justifica realizar un estudio que ayude a tomar las decisiones iniciales para predimensionar los dispositivos de control.

La importancia de esta investigación radica en conocer la eficiencia que tiene ca-

da uno de los sistemas de control pasivo que se estudiarán y en qué medida la respuesta sísmica de las edificaciones se ve afectada por la incorporación de los mismos.

En conclusión, el principal problema es la aún reducida cantidad de información y publicaciones respecto a los procesos de predimensionamiento y eficiencia de los diferentes sistemas de control pasivo en el contexto de las condiciones de sismicidad del Perú.

1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.3.1 Objetivo General

Estudiar la eficiencia de los sistemas de control pasivo para mejorar la respuesta sísmica de las edificaciones.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Contrastar la respuesta sísmica de edificaciones con diferentes sistemas de control pasivo, haciendo uso de modelos simplificados.
- Comparar la eficiencia de los diferentes sistemas de control pasivo empleando modelos estructurales tridimensionales de edificaciones existentes de concreto armado.
- Revisar y proponer procedimientos rápidos para el predimensionamiento de los dispositivos de control pasivo instalados en edificaciones.

1.4 HIPÓTESIS DEL ESTUDIO

1.4.1 Hipótesis General

Mediante el estudio de la eficiencia de los diferentes sistemas de control pasivo se obtendrá mayor conocimiento y nuevas herramientas para tomar las decisiones apropiadas en el proceso de selección del tipo de sistema de protección sísmica que se debe usar. Esto dará a los diseñadores estructurales más criterios para proyectar edificaciones más seguras y con mejor comportamiento estructural durante un evento sísmico severo.

1.4.2 Hipótesis Específicas

- Los modelos simplificados estudiados permiten realizar una predicción rápida y aceptable de los niveles de reducción de la respuesta sísmica que se pueden alcanzar en edificaciones tridimensionales de concreto armado que incorporan dispositivos de control pasivo.

- Mediante simulaciones numéricas se puede determinar la eficiencia de cada uno de los sistemas de control pasivo en la reducción de la respuesta sísmica de las edificaciones
- Es posible realizar gráficos y plantear procedimientos que permitan tomar las decisiones iniciales para predimensionar los dispositivos de control pasivo.

1.5 METODOLOGÍA

La metodología seguida para el desarrollo de la presente tesis es la siguiente:

- Recopilación de información relacionada al tema de sistemas de control pasivo en edificaciones, enfocándose en el aislamiento de base, disipadores de fluido viscoso, disipadores histeréticos y amortiguadores de masa sintonizada. Para ello se ha hecho una revisión de tesis, reportes de investigación, libros y artículos de revistas académicas.
- Obtención y análisis de la respuesta sísmica de modelos dinámicos simplificados. Para ello se empleó el lenguaje de programación *Python* y diversos procedimientos numéricos para elaborar modelos simplificados de estructuras con múltiples grados de libertad con sistemas de control pasivo con comportamiento no lineal.
- Obtención y análisis de la respuesta sísmica de edificaciones de concreto armado con dispositivos de control pasivo. Para lograr este objetivo se usaron modelos matemáticos de estructuras de concreto armado elaborados en el software *ETABS*. Estos modelos tuvieron en cuenta las propiedades no lineales de los dispositivos y se usaron registros sísmicos peruanos ajustados al espectro de diseño dado por las normas E.030 y E.031 del Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Comparación de los resultados obtenidos con cada sistema de control pasivo en términos de desplazamientos relativos, aceleraciones y fuerzas cortantes en la base, identificando en cada caso la eficiencia de usar los dispositivos de control pasivo y estudiando si existe una adecuada correlación con los resultados de los modelos simplificados.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

Mitigar los daños causados por los eventos sísmicos es una de las principales labores de la ingeniería estructural. Para lograr tal objetivo se han desarrollado tecnologías y se han propuesto diversas metodologías de diseño. En este sentido, los sistemas de control pasivo vienen jugando un rol muy importante, pues cerca del 80 % de las investigaciones realizadas en todo el mundo en los últimos 10 años en el campo de los sistemas de protección sísmica se enfocan en sistemas pasivos (De la Llera et al., 2015). Comprender el comportamiento dinámico de las edificaciones que incorporan dispositivos de control pasivo es de crucial importancia para usar esta tecnología de manera correcta.

2.1 DISPOSITIVOS DE CONTROL PASIVO

2.1.1 Aisladores Sísmicos

Son dispositivos que desacoplan la estructura y su contenido de los efectos de un sismo. Este desacople se alcanza incrementando la flexibilidad del sistema y proporcionándole un amortiguamiento adecuado (Skinner et al., 1993).

Los aisladores sísmicos concentran el incremento de amortiguamiento de la edificación en la interfaz de aislamiento. Por lo tanto, los elementos estructurales ya no necesitarían liberar energía mediante el trabajo inelástico de sus nudos o la ductilidad del sistema, que es la forma más común para disipar energía en los sistemas convencionales. Asimismo, el desplazamiento también se concentra en estos dispositivos, reduciendo de esta manera las aceleraciones, los desplazamientos relativos de entrepiso y los esfuerzos cortantes de la superestructura (Yucra, 2018).

Existen diversos tipos de aisladores sísmicos, siendo los más usados en la actualidad los aisladores elastoméricos y los aisladores friccionantes.

2.1.1.1 Aisladores Elastoméricos

- Aisladores de elastómero natural o de bajo amortiguamiento

Los dispositivos NRB (*Natural Rubber Bearing*) consisten en capas alternadas de caucho y acero unidas mediante un proceso de vulcanización. Se caracterizan por su bajo nivel de amortiguamiento (alrededor de 2-3%), poseen una curva fuerza deformación casi lineal y una fuerza restitutiva estable (Naeim y Kelly, 1999).

- Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento

Los dispositivos HDRB (*High Damping Rubber Bearing*) son muy similares a

los dispositivos NRB con la única salvedad que el caucho usado ha pasado por un tratamiento donde se le adicionan ciertos componente que incrementan notoriamente su capacidad de disipación. El nivel de amortiguamiento alcanzado por estos dispositivos está en el rango de 10-20 % (Naeim y Kelly, 1999).

- Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo

Los dispositivos LRB (*Lead Rubber Bearing*) son similares a los NRB, con la diferencia de que incorporan un núcleo de plomo que permite que el dispositivo tenga una respuesta bilineal y por ende que disipe energía mediante un proceso histerético. El amortiguamiento en los LRB es dependiente del nivel de desplazamiento; es así que para niveles de desplazamiento altos se pueden lograr amortiguamientos de hasta un 30 % (Naeim y Kelly, 1999).

2.1.1.2 Aisladores Friccionantes

- Deslizadores simples

Son los dispositivos de aislamiento más simples que existen y constan de un deslizador que se mueve sobre una superficie plana de bajo coeficiente de fricción. Carecen de una fuerza restitutiva intrínseca y por ende son usados en conjunto con aisladores elastoméricos. Estos dispositivos resultan interesantes debido a su bajo costo, su baja rigidez horizontal y la facilidad para incluirlos en el análisis estructural (Portillo, 2019).

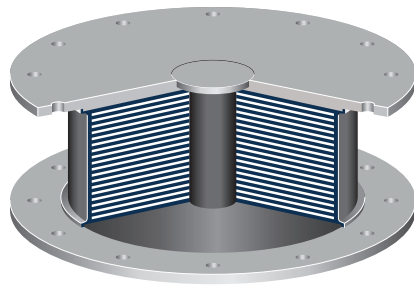
- Aisladores de péndulo de fricción simple

Los dispositivos FPS (*Frictional Pendulum System*) constan de un deslizador articulado que se mueve sobre una superficie de fricción esférica. La superficie de contacto está revestida de un material compuesto autolubricante. Cuando el deslizador se mueve sobre la superficie esférica, la masa soportada se levantará y el movimiento proporcionará la fuerza restitutiva del sistema. El radio de curvatura de la superficie cóncava dominará la rigidez y el periodo del sistema (Wu, 2001).

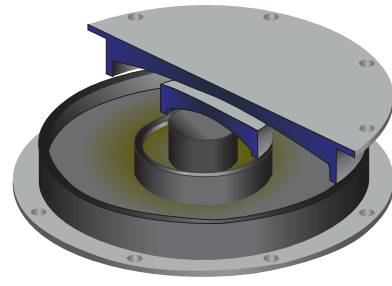
- Aisladores de péndulo de fricción doble y triple

Los dispositivos DFPB (*Double Frictional Pendulum Bearing*) están compuestos por dos superficies cóncavas de acero inoxidable separadas por un deslizador articulado. Los radios de curvatura, así como los coeficientes de rozamiento de cada superficie que pueden ser distintos. El desplazamiento horizontal total permitido es la suma de los desplazamientos de cada superficie (Fenz y Constantinou, 2008).

Los dispositivos TFPB (*Triple Frictional Pendulum Bearing*) son similares a los DFPB con la diferencia que cuentan con un deslizador interno anidado. Este deslizador interno consta de dos placas deslizantes cóncavas separadas por un deslizador rígido. Cada superficie interna y externa tiene su propio radio de curvatura y coeficiente de fricción (Fenz y Constantinou, 2008).



(a) Aislador elastomérico LRB. Adaptado de Bridgestone (2015)



(b) Aislador friccionante TFPB. Adaptado de Fenz y Constantinou (2008)

FIGURA N° 2.1: Dispositivos de aislamiento sísmico

2.1.2 Disipadores de Fluido Viscoso

Son dispositivos que incrementan el amortiguamiento de la estructura sin modificar su rigidez y cuyo funcionamiento depende fundamentalmente de la velocidad relativa de sus extremos. Los DFV están compuestos por un pistón de acero inoxidable, con cabezal de bronce y un acumulador, que se encuentran alojados dentro en un cilindro metálico lleno con un fluido de alta viscosidad. La cabeza del pistón tiene orificios que están diseñados con una serie de formas especiales para alterar las características de flujo con la velocidad del fluido, disipando de esta manera energía en forma de calor. La construcción mecánica y las propiedades del orificio se pueden variar para obtener las propiedades amortiguadoras deseadas (Constantinou y Symans, 1993).

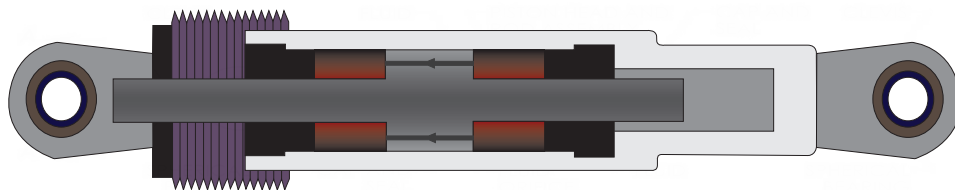


FIGURA N° 2.2: Disipador de fluido viscoso. Adaptado de Berquist et al. (2019)

2.1.3 Disipadores Histeréticos

Son dispositivos metálicos que se acoplan a la estructura y son capaces de deformarse en el rango inelástico, lo cual les permite absorber y disipar energía mediante un proceso histerético (Ahumada, 2010). Estos dispositivos se caracterizan por incrementar la rigidez de la estructura y porque su funcionamiento depende principalmente del desplazamiento relativo entre sus extremos.

En la actualidad existen muchos tipos de disipadores histeréticos; los más comunes son los que trabajan por flexión o por corte.

2.1.3.1 Disipadores Histeréticos que Trabajan por Flexión

Los dispositivos FLD (*Flexural Link Damper*) pueden sostener un gran número de ciclos de carga y descarga sin ningún signo de degradación de la rigidez o la resistencia y exhiben un comportamiento histerético estable (Saeedi et al., 2016).

- *Disipador que añade amortiguamiento y rigidez*

Los dispositivos ADAS (*Added damping and stiffness*) están formados por una serie de placas metálicas en forma de “X” conectadas de tal manera que sus extremos se encuentren restringidos. Durante un sismo el desplazamiento relativo de la parte superior e inferior de las placas presentan una doble curvatura. La variación de momento flector en toda la altura del dispositivo se asemeja a la de una viga empotrada en sus dos extremos, de manera que las placas lleguen a la fluencia al mismo tiempo (Narváez, 2019).

- *Disipador de placa triangular que añade amortiguamiento y rigidez*

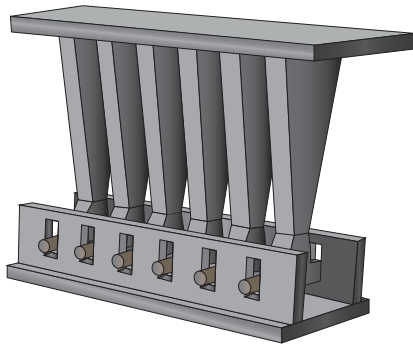
Los dispositivos TADAS (*Triangular-plate added damping and stiffness*) están formados por una serie de placas metálicas triangulares con un comportamiento dinámico muy parecido al de los dispositivos ADAS, con la excepción de que solo uno de sus bordes permanece restringido mientras que el otro extremo permanece libre a la traslación vertical. Por lo tanto, las placas presentan curvatura simple y su deformación se asemeja a una viga en voladizo (Narváez, 2019).

2.1.3.2 Disipadores Histeréticos que Trabajan por Corte

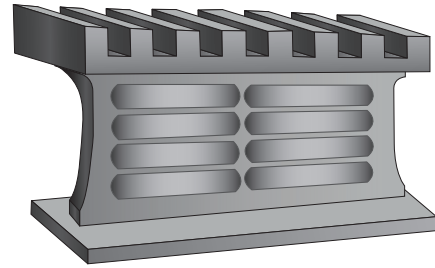
Los dispositivos SLD (*Shear Link Damper*) presentan curvas histeréticas estables, un endurecimiento significativo por deformación y alta capacidad de disipación de energía (Nuzzo et al., 2018). Un gran número de pruebas experimentales realizadas tanto con disipadores que trabajan por flexión como con disipadores que trabajan por corte demuestran que estos últimos pueden lograr rotaciones plásticas más grandes y una mayor disipación de energía (Popov y Engelhardt, 1988).

- *Shear Link Bozzo* (SLB)

Los dispositivos SLB se caracterizan por tener una geometría simple y por proporcionar ductilidad local. Además, los SLB tiene la ventaja de poder cubrir un amplio rango de capacidades de fuerzas, que los hacen adaptables a diferentes niveles de demanda (Nuzzo et al., 2018).



(a) Disipador TADAS. Adaptado de Mohammadi et al. (2017)



(b) Disipador SLB. Adaptado de Bozzo et al. (2019)

FIGURA N° 2.3: Disipadores histeréticos metálicos

2.1.4 Amortiguadores de Masa Sintonizada

Son dispositivos que se acoplan a la estructura principal y agregan masa, amortiguamiento y rigidez. La frecuencia natural de los dispositivos de disipación se sintoniza en resonancia con el modo fundamental de la edificación, de modo que una gran cantidad de energía de vibración estructural se transfiere a estos dispositivos, donde es disipada por el amortiguamiento (Lee et al., 2006). Existen muchas maneras de construir un amortiguador de masa sintonizada (AMS), sin embargo, en edificaciones las dos alternativas más comunes son la que consisten en una masa suspendida por cables o cadenas a modo de péndulo y la que consta de una masa montada sobre aisladores sísmicos.

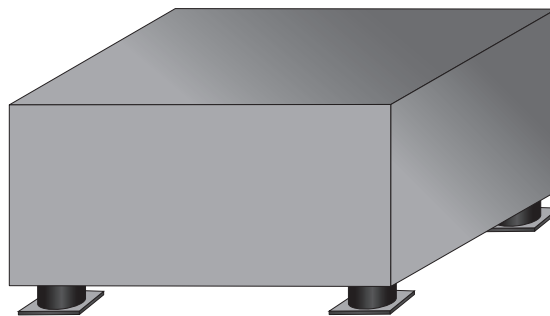


FIGURA N° 2.4: Amortiguador de masa sintonizada.

2.2 MODELOS HISTERÉTICOS PARA LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL

En esta sección se revisan modelos matemáticos capaces de describir de forma analítica una amplia gama de comportamientos inelásticos complejos presentes en muchos sistemas y materiales.

2.2.1 Modelo Histerético Bilineal

Es un modelo que tiene un extenso uso en estructuras que presentan un comportamiento elastoplástico. Ha sido ampliamente estudiado y utilizado debido a su simplicidad, ya que la relación fuerza desplazamiento se compone de relaciones lineales y continuas por partes (Pratap et al., 1994). Este modelo histerético necesita solo tres parámetros de entrada, los cuales son: La rigidez elástica, la rigidez postfluencia y la fuerza característica.

En la investigación realizada por Vaiana et al. (2018), la fuerza en el tiempo t del modelo bilineal se evalúa en función del desplazamiento de la siguiente manera:

$$F(t) = \begin{cases} K_e(u(t) - u_j) + K_p u_j + s(t)Q & \text{si } u_j s(t) - 2D_y < u(t)s(t) < u_j s(t) \\ K_p u_j + s(t)Q & \text{otro} \end{cases} \quad (2.1)$$

Donde K_e , K_p y Q son los tres parámetros del modelo que se calibran con resultados numéricos o experimentales. Además se tiene que $s(t) = \text{sgn}(\dot{u}(t))$ y los parámetros D_y y u_j se pueden calcular como:

$$D_y = \frac{Q}{K_e - K_p} \quad (2.2)$$

$$u_j = \frac{K_e u(t - \Delta t) + s(t)Q - F(t - \Delta t)}{K_e - K_p} \quad (2.3)$$

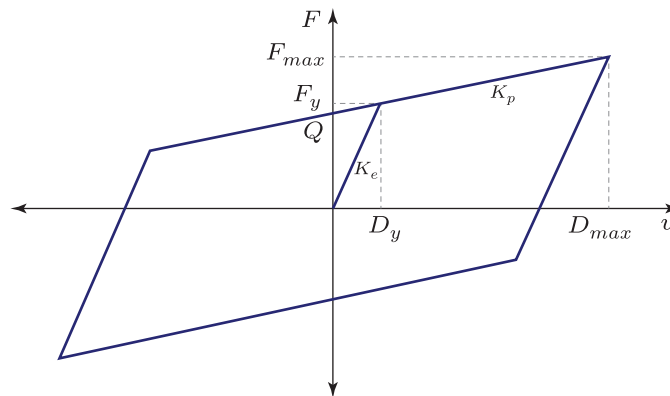


FIGURA N° 2.5: Modelo histerético bilineal. Adaptado de Naeim y Kelly (1999)

La Figura N° 2.5 y las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 muestran los parámetros necesarios para definir un ciclo histerético con comportamiento bilineal.

Donde:

- K_e : Rigidez elástica
- K_p : Rigidez postfluencia
- Q : Fuerza característica
- D_y : Desplazamiento de fluencia
- F_y : Fuerza de fluencia

2.2.2 Modelo Histerético de Bouc-Wen

Es un modelo que se usa para predecir el comportamiento dinámico no lineal de aisladores sísmicos, así como de disipadores histeréticos. El modelo de Bouc-Wen necesita cuatro parámetros de entrada, los cuales son: la rigidez elástica, la rigidez postfluencia, la fuerza característica y un parámetro adimensional que controla la forma del lazo histerético.

De acuerdo con Charalampakis (2010) la fuerza en el tiempo t del modelo histerético de Bouc-Wen se evalúa en función del desplazamiento de la siguiente manera:

$$F(t) = \alpha \frac{F_y}{D_y} u(t) + (1 - \alpha) F_y z(t) \quad (2.4)$$

$$\dot{z}(t) = [1 - |z(t)|^\eta \operatorname{sgn}(\dot{u}(t)z(t))] \frac{\dot{u}(t)}{D_y}, \quad z(0) = 0 \quad (2.5)$$

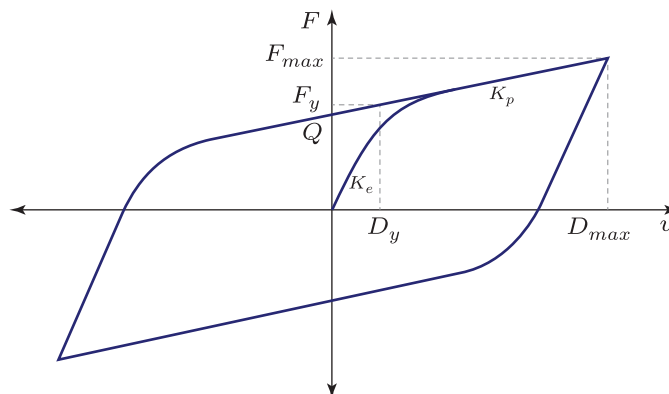


FIGURA N° 2.6: Modelo histerético de Bouc-Wen. Adaptado de Charalampakis (2010)

En la ecuación 2.4 $z(t)$ es un parámetro histerético adimensional que representa un nivel de fuerza, de tal manera que $-1 < z(t) < 1$. Entonces se puede pensar en $z(t)$ como un nivel de fuerza normalizado por la fuerza de fluencia. El valor de $z(t)$

se puede obtener resolviendo la ecuación 2.5 que es una ecuación diferencial no lineal con condición inicial igual a cero.

En la Figura N° 2.6 y en las ecuaciones 2.4 y 2.5 se muestran los parámetros necesarios para definir un ciclo histerético con comportamiento de Bouc-Wen.

Donde:

- K_e : Rigidez elástica
- K_p : Rigidez postfluencia
- Q : Fuerza característica
- D_y : Desplazamiento de fluencia
- F_y : Fuerza de fluencia
- α : Razón entre la rigidez postfluencia y la rigidez elástica
- η : Parámetro adimensional que controla la forma del lazo histerético

2.2.3 Modelo Histerético para Disipador de Fluido Viscoso

Es un modelo usado para predecir el comportamiento dinámico no lineal de sistemas en los que la fuerza sea proporcional a la velocidad relativa. Este modelo histerético tiene únicamente dos parámetros de entrada los cuales son: La constante de amortiguamiento y el exponente de amortiguamiento.

Constantinou y Symans (1993) verificaron de manera experimental modelos matemáticos basados en simplificaciones hechas al modelo de Maxwell para describir el comportamiento histerético de un DFV, encontrando que la fuerza en el tiempo t del modelo histerético para un DFV se evalúa en función de la velocidad de la siguiente manera:

$$F(t) = C_\alpha \operatorname{sgn}(\dot{u}(t)) |\dot{u}(t)|^\alpha \quad (2.6)$$

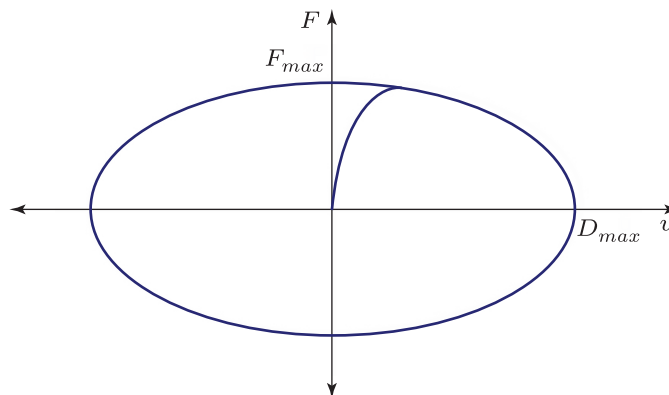


FIGURA N° 2.7: Modelo histerético para DFV. Adaptado de Parulekar y Reddy (2009)

En la Figura N° 2.7 y en la ecuación 2.6 se muestran los parámetros necesarios para definir un ciclo histerético para un DFV.

Donde:

C_α : Constante de amortiguamiento

α : Exponente de amortiguamiento

En la ecuación 2.6 el parámetro α controla la forma del lazo histerético (una característica propia del disipador; $\alpha = 1$ y $\alpha < 1$ para disipadores lineales y no lineales respectivamente). Por otro lado, el parámetro C_α representa la capacidad de disipación del DFV y tiene dimensiones de $FL^{-\alpha}T^\alpha$ con F , L y T representando fuerza, longitud y tiempo respectivamente.

2.3 MODELOS SIMPLIFICADOS PARA EL ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA

2.3.1 Modelo de Viga de Corte

Es un modelo físico conformado por una viga de corte continua, uniforme y lineal que puede ser usado de manera acertada para simular y comprender el comportamiento dinámico de una edificación que tiene un sistema estructural basado en pórticos resistentes a momento, con columnas cuyas deformaciones axiales son pequeñas, donde se desprecian los efectos de la torsión y donde se supone que los pisos solo experimentan desplazamiento lateral (Skinner et al., 1993).

Hernández (2016) presenta las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del modelo de viga de corte. La Figura N° 2.8 muestra el diagrama del cuerpo libre de un diferencial de longitud dz de la viga en referencia. Luego de aplicar las condiciones de equilibrio de fuerzas transversales y después de efectuar las operaciones pertinentes se tiene la ecuación dinámica para la vibración libre:

$$\rho A \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} - GA \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = 0 \quad (2.7a)$$

Que puede reescribirse como:

$$\ddot{x} - c_s x'' = 0 \quad (2.7b)$$

Donde:

A : Área de la sección transversal de la viga

ρ : Densidad del material

G : Módulo de corte del material

c_s : Velocidad de las ondas de corte a lo largo de la viga

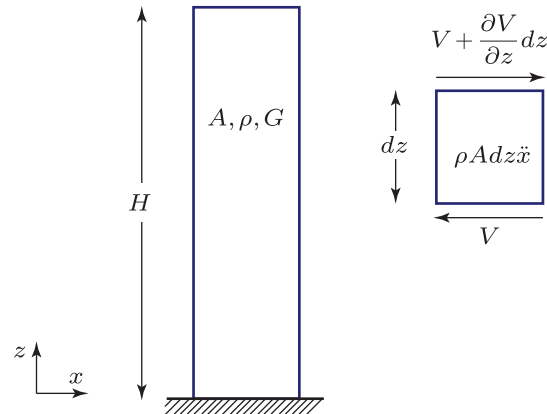


FIGURA N° 2.8: Modelo de viga de corte. Adaptado de Skinner et al. (1993)

En las ecuaciones 2.7 el desplazamiento x depende del nivel en el que se evalúa (z) y a su vez del tiempo (t). Luego de aplicar el método de separación de variables, se tiene soluciones de la forma:

$$x_{n^*}(z, t) = \phi_{n^*}(z) f_{n^*}(t) \quad (2.8)$$

Donde $f_{n^*}(t)$ es la función del tiempo y $\phi_{n^*}(z)$ es el $n^{\text{ésimo}}$ modo de vibración:

$$f_{n^*}(t) = e^{p_{n^*} t} \quad (2.9a)$$

$$\phi_{n^*}(z) = C_1 \text{sen} \left(q_{n^*} \frac{z}{H} \right) + C_2 \text{cos} \left(q_{n^*} \frac{z}{H} \right) \quad (2.9b)$$

Sustituyendo 2.9a y 2.9b en 2.8:

$$x_{n^*}(z, t) = \left[C_1 \text{sen} \left(q_{n^*} \frac{z}{H} \right) + C_2 \text{cos} \left(q_{n^*} \frac{z}{H} \right) \right] e^{p_{n^*} t} \quad (2.10)$$

Siendo H la altura total de la viga de corte, q_{n^*} una variable adimensional y p_{n^*} la frecuencia asociada al $n^{\text{ésimo}}$ modo de vibración.

Así, reemplazando la ecuación 2.10 en 2.7 se tiene:

$$p_{n^*} = i q_{n^*} \frac{c_s}{H} \quad (2.11)$$

Por otro lado, con la hipótesis de no existir amortiguamiento, se cumple que:

$$p_{n^*} = i \omega_{n^*} \quad (2.12)$$

Siendo ω_{n^*} la frecuencia natural no amortiguada.

Por lo tanto, al igualar las ecuaciones 2.11 y 2.12, resulta que:

$$\omega_{n^*} = q_{n^*} \frac{c_s}{H} \quad (2.13a)$$

$$T_{n^*} = \frac{2\pi H}{q_{n^*} c_s} \quad (2.13b)$$

Las condiciones de borde de la ecuación 2.10 para el caso de base fija son:

$$z = 0 \rightarrow x_{n^*}(0, t) = 0 \quad (2.14a)$$

$$z = H \rightarrow x'_{n^*}(H, t) = 0 \quad (2.14b)$$

Para otros casos ver Hernández (2016).

Al evaluar las condiciones de 2.14 en 2.10 se obtiene:

$$\phi_{n^*}(0) = 0 \rightarrow C_2 = 0 \quad (2.15a)$$

$$\phi'_{n^*}(H) = 0 \rightarrow \cos(q_{n^*} H) = 0 \quad (2.15b)$$

Por lo tanto:

$$q_{n^*} = (2n^* - 1) \frac{\pi}{2} \quad (2.16a)$$

$$\omega_{n^*} = (2n^* - 1) \frac{\pi}{2} \frac{c_s}{H} \quad (2.16b)$$

$$T_{n^*} = \frac{4}{(2n^* - 1)} \frac{H}{c_s} \quad (2.16c)$$

Finalmente se tiene que:

$$\phi_{n^*}(z) = C_1 \text{sen} \left((2n^* - 1) \frac{\pi}{2} \frac{z}{H} \right) \quad (2.17)$$

Asimismo, sean M_s y K_s la masa y la rigidez total de la viga de corte respectivamente:

$$M_s = \rho A H \quad (2.18)$$

$$K_s = \frac{GA}{H} = M_s \left(\frac{c_s}{H} \right)^2 \quad (2.19)$$

2.3.2 Modelo de Masas Concentradas

Es un modelo físico discreto conformado por una serie de masas interconectadas por resortes sin peso (sistema de acoplamiento cercano). Este modelo puede describir adecuadamente el comportamiento de edificaciones con un sistemas estructural basado en pórticos con vigas muy rígidas y donde las deformaciones axiales de las columnas se desprecian.

De acuerdo con Hernández (2016) es posible conformar un modelo discreto de masas concentradas a partir de las propiedades de un modelo de viga de corte, similar al estudiado en el apartado 2.3.1. A continuación, se describe la metodología usada para la creación del modelo discreto en cuestión.

- Asignar n , siendo n el número de niveles de la edificación.
- Fijar f y luego estimar el periodo fundamental de la edificación, usando la expresión 2.20.

$$T_1 = fn \quad (2.20)$$

Nota: El valor de f puede suponerse en el rango entre 0.08 y 0.12 para sistemas estructurales basados en pórticos.

- Calcular el valor de c_s/H , a partir de la ecuación 2.16c, cuando $n^* = 1$.

$$\frac{c_s}{H} = \frac{4}{T_1} \quad (2.21)$$

- Obtener GA al sustituir la ecuación 2.21 en 2.19.

$$GA = \left(\frac{4}{T_1}\right)^2 M_s H \quad (2.22)$$

- Calcular la altura promedio de entrepiso (h) y la masa de cada nivel (m).

$$h = \frac{H}{n} \quad (2.23a)$$

$$m = \frac{M_s}{n} \quad (2.23b)$$

- Computar la rigidez de entrepiso k_s usando la ecuación 2.24.

$$k_s = \frac{GA}{h} = \left(\frac{4n}{T_1}\right)^2 m \quad (2.24)$$

2.3.2.1 Matrices de Masa y Rigidez

Para un modelo discreto de masas concentradas de n GDL, la matriz de masas M es diagonal, con la masa i ésima, m_i , como el elemento diagonal i ésimo.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & m_n \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (2.25)$$

Por su parte, la matriz de rigidez K , que relaciona los grados de libertad dinámicos a las fuerzas correspondientes, queda definida de la siguiente manera:

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -k_n & k_n \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (2.26)$$

Es preciso indicar que las rigideces usadas para formar la matriz K son las obtenidas con la ecuación 2.24, es decir:

$$k_i = k_s \quad \forall i \in (1;n) \quad (2.27)$$

2.3.2.2 Matriz de Amortiguamiento

Usando el amortiguamiento de Rayleigh se puede construir una matriz de amortiguamiento que sea consistente con los datos experimentales (Chopra, 2016). Tal como se aprecia en la ecuación 2.28, Rayleigh propone que la matriz de amortiguamiento sea una combinación lineal de la matriz de masa y la matriz de rigidez.

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (2.28)$$

De lo que resulta un amortiguamiento viscoso equivalente dependiente de la frecuencia:

$$\zeta_{n^*} = \frac{a_0}{2\omega_{n^*}} + \frac{a_1\omega_{n^*}}{2} \quad (2.29)$$

Por su parte, la ecuación 2.29 muestra la fracción de amortiguamiento para el $n^{\text{ésimo}}$ modo del sistema, donde los coeficientes a_0 y a_1 pueden determinarse a partir de las fracciones de amortiguamiento especificadas ζ_i y ζ_j para los modos i —*ésimo* y j —*ésimo*, respectivamente. Si la ecuación 2.29 para estos dos modos se expresa en forma matricial, resulta:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{Bmatrix} \quad (2.30)$$

Estas dos ecuaciones algebraicas pueden resolverse para determinar los coeficientes a_0 y a_1 . Si se supone que ambos modos tienen la misma fracción de amortiguamiento ζ , lo cual es razonable con base en los datos experimentales, entonces:

$$a_0 = \zeta \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad a_1 = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (2.31)$$

Ahora la matriz de amortiguamiento se conoce gracias a las ecuaciones 2.28 y 2.31. Es preciso indicar que al aplicar este procedimiento a un problema práctico, los modos i y j con las fracciones de amortiguamiento especificadas deben elegirse de manera que garanticen valores razonables para las fracciones de amortiguamiento en todos los modos que contribuyen de manera significativa a la respuesta.

2.4 NORMAS DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS CON PROTECCIÓN SÍSMICA

Las normas de diseño estructural son importantes ya que regulan cada aspecto del análisis y diseño de las edificaciones, haciendo que estas cumplan con paradigmas establecidos. En este sentido, cuando se implementan sistemas de protección sísmica como aisladores sísmico o disipadores de energía se deben usar normativas especializadas para el diseño estructural. Las recomendaciones ASCE 7-16 presentan en sus capítulos 17 y 18 lineamientos para el diseño de edificaciones que incorporen aisladores sísmicos o disipadores de energía, respectivamente. En el Perú se tiene la norma E.031 del Reglamento Nacional de Edificaciones que brinda lineamientos para el uso de aisladores sísmicos en edificaciones. Sin embargo, no se tiene un marco normativo para el uso de disipadores de energía, aunque existen investigaciones como la realizada por Fuentes (2019) donde se plantean procedimientos de análisis y diseño de estructuras con disipadores con el objetivo de servir como base para una futura norma peruana.

2.4.1 Recomendaciones ASCE 7-16

2.4.1.1 Definición del Movimiento del Terreno

- Espectro del Máximo Sismo Considerado

El máximo sismo considerado tiene un 2% de probabilidad de excedencia en 50 años, es decir un periodo de retorno de 2500 años. El espectro que caracteriza a este sismo viene dado por:

$$S_{aM} = \begin{cases} S_{MS} \left(0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0} \right) & T < T_0 \\ S_{MS} & T_0 < T < T_S \\ \frac{S_{M1}}{T} & T_S < T < T_L \\ \frac{S_{M1} T_L}{T^2} & T > T_L \end{cases} \quad (2.32)$$

Donde:

$$S_{MS} = F_a S_S \quad S_{M1} = F_v S_1 \quad (2.33a)$$

$$T_0 = 0.2 S_{M1} / S_{MS} \quad T_S = S_{M1} / S_{MS} \quad (2.33b)$$

S_{MS} y S_{M1} son valores espectrales correspondientes a periodos de 0.2 y 1 segundos. F_a y F_v son factores modificadorios que dependen de las condiciones de sitio y de la intensidad del sismo.

- Registros de Aceleraciones del Suelo

Cuando se realice un análisis tiempo historia, el movimiento del suelo se representa con un mínimo de siete registros de aceleración escalados de tal manera que se cumpla la condición 2.34 para periodos comprendidos entre $0.2T_M$ y $1.25T_M$ para señales espectro compatibles. La ASCE 7-16 también indica procedimientos para escalar los registros sísmicos (*amplitude matching* y *spectral matching*).

$$S_{a\text{average}} \geq S_{aM} \quad (2.34)$$

En la ecuación 2.34 $S_{a\text{average}}$ es la ordenada del espectro obtenida al promediar los espectros de cada registro sísmico. El espectro de un registro se obtiene al combinar los espectros de los dos componentes del mismo registro mediante la raíz cuadrada de la suma de cuadrados (SRSS).

2.4.1.2 Análisis con Fuerzas Estáticas Equivalentes

Este procedimiento de análisis es permitido solo cuando la edificación cumple ciertas condiciones (generalmente edificaciones menores o que no tengan una función esencial). Estas condiciones son diferentes para edificaciones con aislamiento sísmico y para edificaciones con disipadores de energía.

Cuando el método de análisis estático de fuerzas equivalentes se aplica en edificaciones aisladas se tiene:

- Periodo Efectivo

El periodo efectivo de la estructura aislada T_M que corresponde al desplazamiento D_M se calcula según la ecuación 2.35.

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_M g}} \quad (2.35)$$

Donde W representa el peso sísmico de la estructura encima de la interfaz de aislamiento, K_M es la rigidez efectiva del sistema de aislamiento y g es la aceleración de la gravedad.

- Desplazamiento Máximo

El sistema de aislamiento debe diseñarse para un desplazamiento máximo dado por la ecuación 2.36.

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M} \quad (2.36)$$

TABLA N° 2.1: Factor de reducción por amortiguamiento

Amortiguamiento Efectivo β_M [%]	Factor B_M
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

En la ecuación 2.36 S_{M1} es la ordenada espectral calculada según la ecuación 2.33a para un periodo de 1 segundo y B_M es un factor de reducción asociado al amortiguamiento efectivo β_M . El valor de B_M se determina de acuerdo con la Tabla N° 2.1.

- Límites de Derivas

Las derivas por encima del nivel de base se calculan al multiplicar por R los resultados del análisis lineal elástico y no deben ser mayores a 15‰. Es preciso indicar que la ASCE 7-16 considera inercias agrietadas para calcular las derivas.

2.4.1.3 Análisis Dinámico

Cuando se realiza análisis dinámicos en edificaciones aisladas se debe considerar lo siguiente:

- Análisis Modal Espectral

El análisis modal espectral debe realizarse considerando un valor de amortiguamiento modal para el modo fundamental en la dirección de interés no mayor que 30% del amortiguamiento crítico. En cuanto al resto de modos, estos considerarán un amortiguamiento modal consistente con una estructura de base fija. El análisis modal espectral debe incluir de manera simultánea una excitación del 100% del movimiento del suelo en la dirección de interés y un 30% en la dirección perpendicular.

- Análisis Tiempo Historia

El análisis tiempo historia se debe desarrollar con un grupo de pares de registros de aceleración correctamente seleccionados y escalados. Cada par de componentes se aplican simultáneamente y deben considerar la excentricidad accidental más desfavorable. Los parámetros de interés se calculan como el promedio de los resultados obtenidos para cada par de registros en la dirección de estudio.

- Límites de Deriva

La máxima deriva obtenida según el procedimiento modal espectral no debe ser mayor a 15‰, mientras que la máxima deriva obtenida con un procedimiento tiempo historia no debe exceder el 20‰, ambas calculadas considerando inercias agrietadas.

Por otro lado, cuando se realiza análisis dinámicos en edificaciones con disipadores de energía se tiene:

- Análisis Modal Espectral

El análisis modal espectral debe realizarse teniendo en cuenta la rigidez elástica de los dispositivos de disipación según el tipo de dispositivo. Los disipadores dependientes del desplazamiento se modelarán con una rigidez efectiva

que represente la fuerza del dispositivo en el desplazamiento de respuesta de interés. Por otra parte, los disipadores dependientes de la velocidad que tengan un componente de rigidez se modelarán con una rigidez efectiva correspondiente a la amplitud y frecuencia de interés.

El procedimiento que se debe seguir para llevar a cabo el análisis modal espectral se detalla en el apartado 18.7 de la ASCE 7-16.

- Análisis Tiempo Historia

En el análisis tiempo historia el amortiguamiento inherente de la estructura no debe ser mayor que el 3% del crítico. Los resultados del sismo máximo esperado servirán para el diseño del sistema de disipación. Los parámetros de interés se calculan como el promedio de los máximos resultados obtenidos para cada par de registros en la dirección de estudio.

- Límites de Deriva

La máxima deriva obtenida con un procedimiento tiempo historia no debe exceder el 30‰ (calculada considerando inercias agrietadas).

2.4.2 Norma Técnica Peruana E.031

La norma E.031 está basada en la ASCE 7-16. Por tal razón, la mayor parte de los lineamientos brindados por ambos documentos son coincidentes. A continuación, se mostrarán algunas diferencias que tiene la norma E.031, las mismas que responden a la realidad sísmica del Perú.

2.4.2.1 Definición del Movimiento del Terreno

- Espectro del Máximo Sismo Considerado

El espectro considerado por la norma E.031 es 1.5 veces el espectro considerado en la norma E.030 y viene dado por:

$$S_{aM} = 1.5ZUCSg \quad (2.37)$$

En la ecuación 2.37, Z , U y S son factores definidos en la norma E.030 y C se determina de acuerdo a la ecuación 2.38.

$$C = \begin{cases} 1 + 7.5 \frac{T}{T_P} & T < 0.2T_P \\ 2.5 & 0.2T_P < T < T_P \\ 2.5 \frac{T_P}{T} & T_P < T < T_L \\ 2.5 \frac{T_P T_L}{T^2} & T > T_L \end{cases} \quad (2.38)$$

2.4.2.2 Análisis con Fuerzas Estáticas Equivalentes

- Desplazamiento Máximo

El sistema de aislamiento debe diseñarse y construirse para soportar como mínimo el desplazamiento máximo dado por la ecuación 2.39.

$$D_M = \frac{S_{aM} T_M^2}{4\pi^2 B_M} \quad (2.39)$$

Siendo S_{aM} la ordenada espectral calculada según la ecuación 2.37 correspondiente al periodo de la edificación aislada y B_M un factor de reducción asociado al amortiguamiento efectivo β_M . El valor de B_M se determina de acuerdo con la Tabla N° 2.1.

- Límites de Derivas

La máxima deriva en la superestructura por encima del nivel de base no debe exceder de 3.5‰. Es preciso indicar que la norma E.031 especifica el uso de inercias brutas para calcular las derivas.

2.4.2.3 Análisis Dinámico

- Límites de Deriva

La máxima deriva obtenida según el procedimiento modal espectral no debe ser mayor a 3.5‰, mientras que la máxima deriva obtenidas con un procedimiento tiempo historia, considerando las características de fuerza-deformación no lineales de la interfaz de aislamiento, no debe exceder el 5‰, ambas calculadas considerando inercias brutas.

2.5 REGISTROS SÍSMICOS

De acuerdo con la ASCE 7-16 y la norma E.031 cuando se realice un análisis tiempo historia para diseñar edificaciones que incorporen algún sistema de control pasivo se debe usar un mínimo de siete registros sísmico, los cuales deben estar escalados correctamente. Dado que el objetivo de la presente tesis no es realizar un diseño detallado sino más bien conocer la eficiencia de cada sistema de control pasivo en la reducción de la respuesta sísmica, se usaron solo tres registros.

Los registros sísmicos usados corresponden a los eventos ocurridos en Lima en octubre de 1966, Pisco en agosto del 2007 y Maule en febrero del 2010. Se seleccionaron estos tres registros ya que presentan características diferentes entre sí. Así por ejemplo, el sismo de Lima fue seleccionado por ser uno de los sismos más fuertes que sufrió Lima y por ser de uso recurrente en la literatura. Por su parte, el sismo de Pisco fue seleccionado debido a su peculiar espectro de respuesta que

presenta dos picos, razón por la cual resulta de interés estudiar el comportamiento de una edificación aislada frente a este registro. Finalmente, el sismo de Maule, a pesar de no haber ocurrido en el Perú, fue seleccionado por ser uno de los sismos más fuertes que han ocurrido en Chile.

2.5.1 Registros Sísmicos Originales

2.5.1.1 Registro Sísmico de Lima de 1966

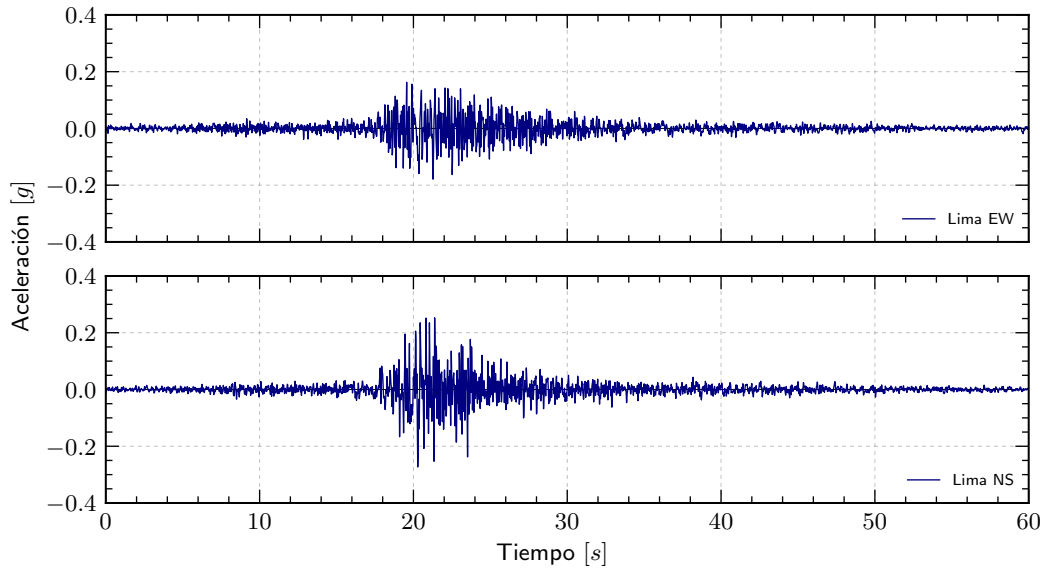


FIGURA N° 2.9: Acelerogramas del sismo de Lima de 1966.

2.5.1.2 Registro Sísmico de Pisco de 2007

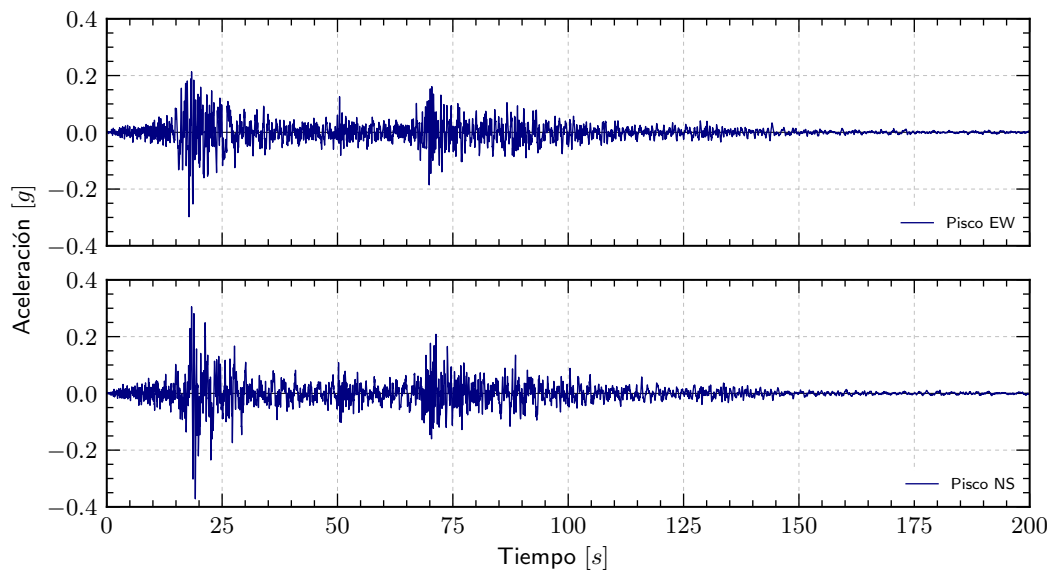


FIGURA N° 2.10: Acelerogramas del sismo de Pisco de 2007.

2.5.1.3 Registro Sísmico de Maule de 2010

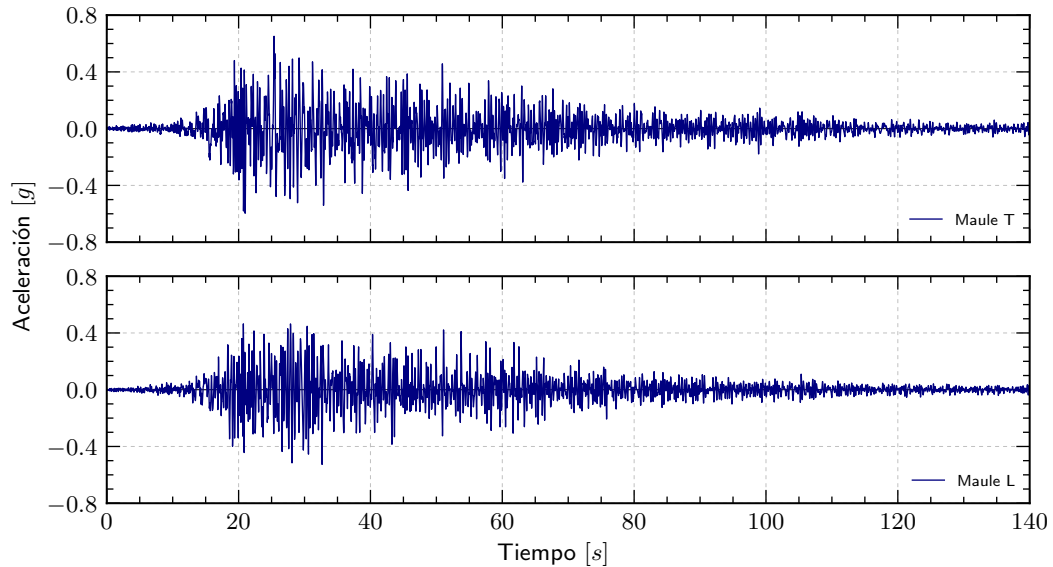


FIGURA N° 2.11: Acelerogramas del sismo de Maule de 2010.

El registro acelerográfico mostrado en la Figura N° 2.9 fue tomado de la Red Acelerográfica del CISMID (REDACIS) de la Universidad Nacional de Ingeniería y corresponde a la estación Parque de la Reserva. Asimismo, el registro mostrado en la Figura N° 2.10 también fue tomado de la REDACIS y corresponde a la estación UNICA. Por último, el registro mostrado en la Figura N° 2.11 fue tomado de la Red Nacional de Acelerógrafos (RENADIC) de la Universidad de Chile y corresponde a la estación Constitución.

2.5.2 Ajuste de Registros Sísmicos a un Espectro Objetivo

Los registros sísmicos usados solamente poseían corrección instrumental. El procedimiento seguido para obtener los registros sísmicos finales y los factores de escala está basado en los lineamientos dados por la ASCE 7-16. Dicho procedimiento se describe a continuación:

- Se realizó una corrección de línea base y una filtración de bandas de frecuencias de todas las señales usando el programa *Seismo Signal*.
- Con la ayuda del programa *Seismo Match* se obtuvieron señales espectro compatibles con el espectro elástico del sismo máximo considerado de la norma E.031 que se muestra en la Figura N° 2.12. Este espectro objetivo responde a la ecuación 2.37, donde $Z = 0.45$, $U = 1$, el valor de C se obtiene de la ecuación 2.38 y $S = 1$.
- Se obtuvo el espectro SRSS de cada par de componentes de los registros

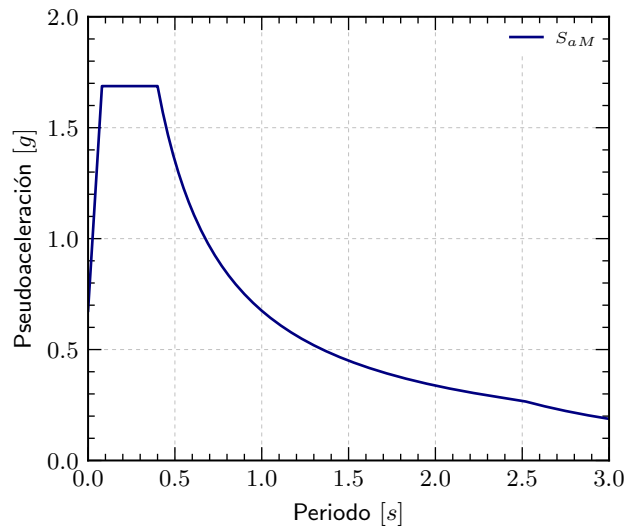


FIGURA N° 2.12: Espectro elástico de la norma E.031.

sísmicos y se multiplicó cada espectro por un factor de escalamiento (FE). El valor del FE debe ser tal que el promedio de los espectros calculados debe verificar la condición 2.34. Además, en concordancia con la ASCE 7-16, se introdujeron los factores 0.90 y 0.44 que afectan a la componente con mayor y menor aceleración máxima del suelo respectivamente.

En la Figura N° 2.13 se muestran los espectros SRSS, el espectro promedio de los mismos y el espectro del sismo máximo considerado de la norma E.031, donde se puede apreciar de manera visual que el promedio de los espectros es mayor al espectro de la norma en el intervalo de interés.

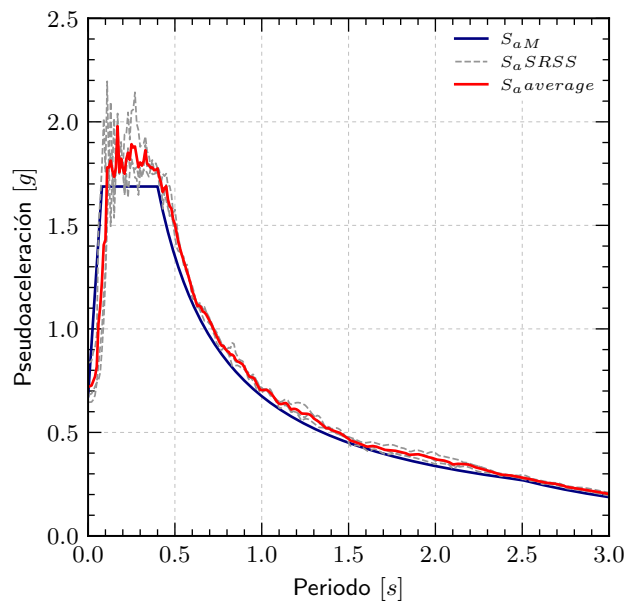


FIGURA N° 2.13: Ajuste de los registros al espectro de la norma E.031.

Por último, en la Tabla N° 2.2 se presentan los factores de escalamiento (FE), los factores totales (FT) y los factores usados en el software *ETABS* para definir los casos de carga de cada uno de los componentes de los tres registros sísmicos.

TABLA N° 2.2: Factores de escalamiento

Señal	FE	FT	F. <i>ETABS</i>
Lima66 EW	1.03	0.45	4.45
Lima66 NS	1.03	0.93	9.09
Pisco07 EW	1.05	0.46	4.53
Pisco07 NS	1.05	0.95	9.27
Maule10 T	1.04	0.94	9.18
Maule10 L	1.04	0.46	4.49

2.5.3 Registros Sísmicos Ajustados

En todos los capítulos siguientes se mostrarán los resultados obtenidos luego de usar los registros sísmicos que se observan en las Figuras N° 2.14, N° 2.15 y N° 2.16 que han sido ajustados al espectro de la norma E031.

2.5.3.1 Registro Sísmico de Lima de 1966 Ajustado

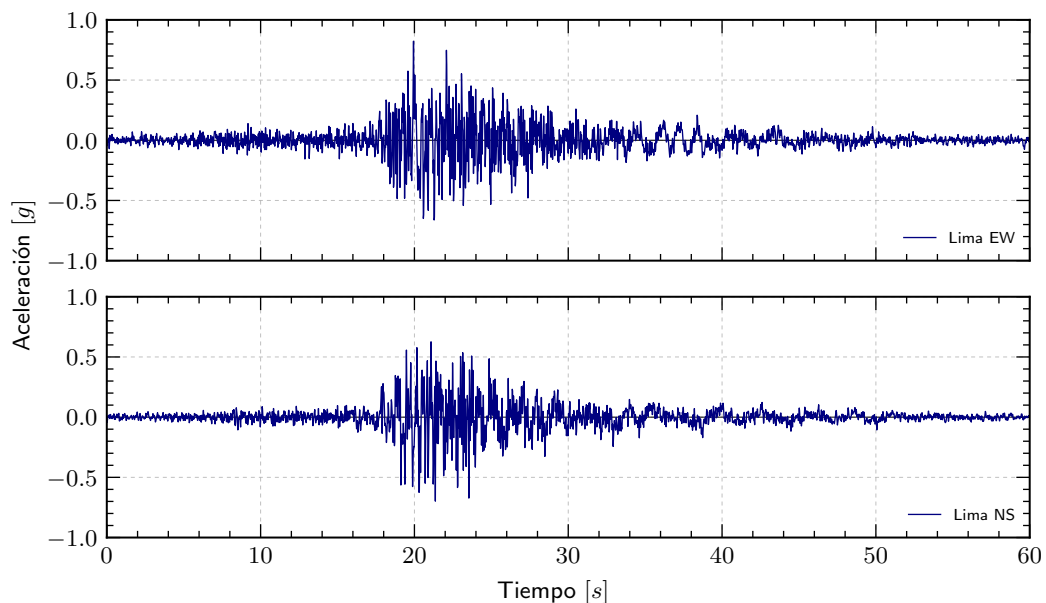


FIGURA N° 2.14: Acelerogramas espectrocompatibles - Lima 1966.

2.5.3.2 Registro Sísmico de Pisco de 2007 Ajustado

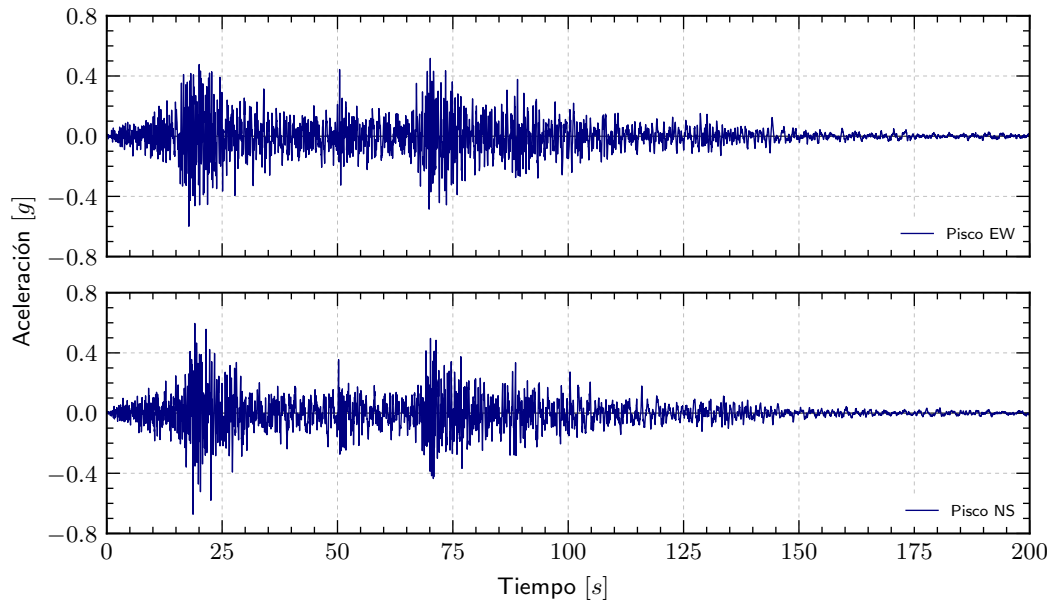


FIGURA N° 2.15: Acelerogramas espectrocompatibles - Pisco 2007.

2.5.3.3 Registro Sísmico de Maule de 2010 Ajustado

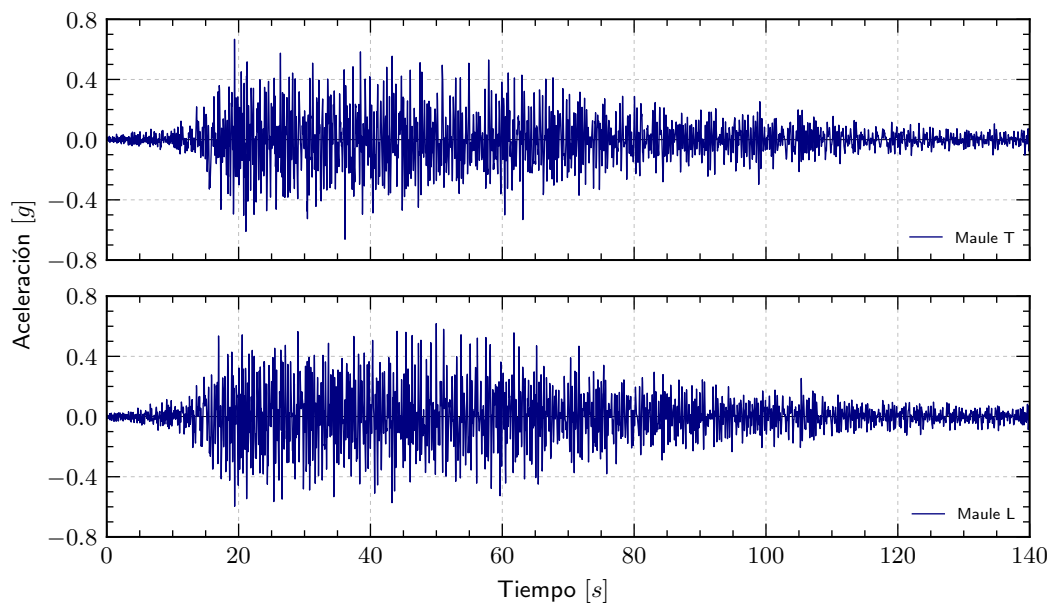


FIGURA N° 2.16: Acelerogramas espectrocompatibles - Maule 2010.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS SÍSMICO DE EDIFICACIONES CON BASE AISLADA

En el presente capítulo se estudiarán modelos simplificados de edificaciones que incorporan aisladores sísmicos (AS). Se usará un modelo de masas concentradas con n *GDL* con comportamiento lineal y elástico, montado sobre una interfaz de aislamiento con un comportamiento hysterético de tipo bilineal, que será sometido a un registro sísmico. El objetivo de este capítulo es observar la incidencia en la respuesta sísmica que tienen variables como la razón de aislamiento, el amortiguamiento considerado para la superestructura y el uso de las propiedades nominales, mínimas y máximas al momento de definir las características de la interfaz de aislamiento.

3.1 ECUACIONES DE EQUILIBRIO

La Figura N° 3.1 representa a una edificación aislada sujeta a una aceleración horizontal del suelo dado por \ddot{u}_g . La superestructura tiene n *GDL* dinámicos, que representan el desplazamiento de los n niveles respecto a la interfaz de aislamiento, los cuales se recogen en el vector $\mathbf{u}_s(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)]^T$. Por otro lado, la interfaz de aislamiento es representada por un grado de libertad adicional que viene dado por u_b relativo al suelo (De Domenico et al., 2018).

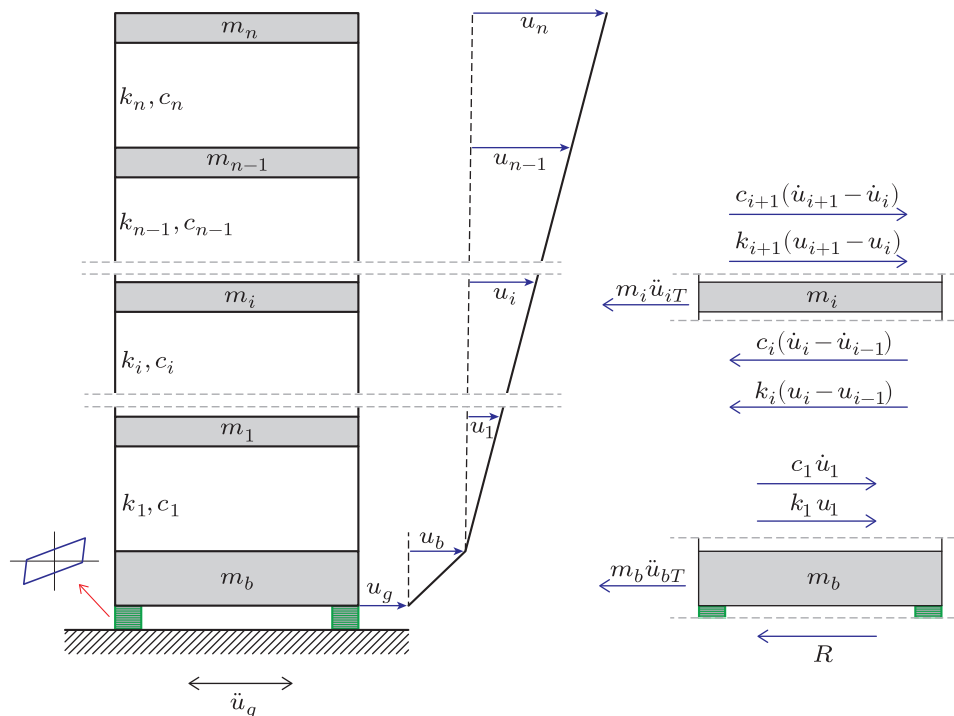


FIGURA N° 3.1: Edificación con aislamiento de base. Adaptado de De Domenico et al. (2018)

En la figura anterior se observa que:

$$u_{iT} = u_g + u_b + u_i \quad \rightarrow \quad \ddot{u}_{iT} = \ddot{u}_g + \ddot{u}_b + \ddot{u}_i \quad (3.1a)$$

$$u_{bT} = u_g + u_b \quad \rightarrow \quad \ddot{u}_{bT} = \ddot{u}_g + \ddot{u}_b \quad (3.1b)$$

Además, del diagrama de cuerpo libre de la i ésima masa de la Figura N° 3.1 se tiene:

$$m_i \ddot{u}_{iT} + c_i(\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}) + k_i(u_i - u_{i-1}) - c_{i+1}(\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i) - k_{i+1}(u_{i+1} - u_i) = 0 \quad (3.2)$$

Remplazando la ecuación 3.1a en 3.2, reordenando y simplificando se puede llegar a una expresión matricial de la forma:

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{u}}_s(t) + \mathbf{M}_s \boldsymbol{\tau} \ddot{u}_b(t) + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{u}}_s(t) + \mathbf{K}_s \mathbf{u}_s(t) = -\mathbf{M}_s \boldsymbol{\tau} \ddot{u}_g(t) \quad (3.3)$$

Donde \mathbf{M}_s es la matriz de masa de la superestructura y se obtiene de la ecuación 2.25, \mathbf{C}_s es la matriz de amortiguamiento y viene dada por la ecuación 2.28, \mathbf{K}_s es la matriz de rigidez y es producto de la ecuación 2.26 y $\boldsymbol{\tau} = [1, 1, \dots, 1]^T$ es un vector de $n \times 1$.

Por otro lado, considerando el diagrama de cuerpo libre de la masa m_b se tiene:

$$m_b \ddot{u}_{bT} + R - c_1 \dot{u}_1 - k_1 u_1 = 0 \quad (3.4)$$

Remplazando 3.1b en 3.4 y al sumarlo con la ecuación 3.2 $\forall i \in (1; n)$ se obtiene:

$$\boldsymbol{\tau}^T \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{u}}_s(t) + m_{tot} \ddot{u}_b(t) + R(t) = -m_{tot} \ddot{u}_g(t) \quad (3.5)$$

Donde, $R(t)$ es la fuerza cortante en la interfaz de aislamiento que responde a la ecuación 2.1, además m_{tot} es la masa total de la estructura y m_{stot} es la masa total de la superestructura.

$$m_{tot} = m_b + \boldsymbol{\tau}^T \mathbf{M}_s \boldsymbol{\tau} = m_b + \sum_{i=1}^n m_i = m_b + m_{stot} \quad (3.6)$$

Las ecuaciones 3.3 y 3.5 pueden reescribirse juntas en forma de matriz como se muestra en la ecuación 3.7.

$$\overline{\mathbf{M}} \ddot{\mathbf{u}}(t) + \overline{\mathbf{C}} \dot{\mathbf{u}}(t) + \overline{\mathbf{K}} \mathbf{u}(t) + \overline{\mathbf{R}}(t) = -\mathbf{v} \ddot{u}_g(t) \quad (3.7)$$

Donde:

$$\bar{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{M}_s \boldsymbol{\tau} \\ \boldsymbol{\tau}^T \mathbf{M}_s & m_{tot} \end{bmatrix}; \quad \bar{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & 0 \end{bmatrix}; \quad (3.8a)$$

$$\bar{\mathbf{R}}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ R(t) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s(t) \\ u_b(t) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s \boldsymbol{\tau} \\ m_{tot} \end{bmatrix} \quad (3.8b)$$

En la ecuación 3.8, $\mathbf{0} = [0, 0, \dots, 0]^T$ es un vector $n \times 1$ con todos sus términos iguales a cero.

De acuerdo con De Domenico et al. (2018) es posible usar un procedimiento de superposición modal para resolver la ecuación 3.7. Para lograr dicho objetivo se debe realizar un análisis modal clásico considerando únicamente a la superestructura, la cual está asociada con las matrices \mathbf{M}_s y \mathbf{K}_s de orden $n \times n$.

$$\mathbf{K}_s \boldsymbol{\Phi}_s = \mathbf{M}_s \boldsymbol{\Phi}_s \boldsymbol{\Omega}_s^2 \quad ; \quad \boldsymbol{\Phi}_s^T \mathbf{M}_s \boldsymbol{\Phi}_s = \mathbf{I}_n \quad (3.9)$$

Donde $\boldsymbol{\Phi}_s = [\phi_{s1}, \phi_{s2}, \dots, \phi_{sn}]$ y $\boldsymbol{\Omega}_s^2 = \text{diag}\{\omega_{s1}^2, \omega_{s2}^2, \dots, \omega_{sn}^2\}$, el subíndice s hace énfasis en los primeros n autovalores y autovectores referidos a la superestructura como si esta tuviese base fija. Los desplazamientos nodales de la superestructura expresados mediante el método de superposición modal están dados por:

$$\mathbf{u}_s(t) = \sum_{i=1}^n \phi_{si} \gamma_{si} d_{si}(t) = \boldsymbol{\Phi}_s \boldsymbol{\Gamma}_s \mathbf{d}_s(t) \quad (3.10)$$

En la ecuación 3.10, se tiene que $\boldsymbol{\Gamma}_s = \text{diag}\{\gamma_{si}\}$ en donde $\gamma_{si} = \phi_{si}^T \mathbf{M}_s \boldsymbol{\tau}$ es el iésimo factor de participación modal correspondiente al iésimo modo de la superestructura. Por lo tanto, las primeras n ecuaciones mostradas en la expresión 3.7 se pueden reescribir como un conjunto de ecuaciones desacopladas en un subespacio vectorial modal, ya que la superestructura se puede considerar de manera realista como un sistema con amortiguamiento clásico donde $\boldsymbol{\Xi}_s = \boldsymbol{\Phi}_s^T \mathbf{C}_s \boldsymbol{\Phi}_s = \text{diag}\{2\zeta_{si} \omega_{si}\}$. Combinando las expresiones anteriores con la ecuación 3.5, propias de una estructura que incorpora aislamiento de base, se tiene:

$$\ddot{d}_{si}(t) + 2\zeta_{si} \omega_{si} \dot{d}_{si}(t) + \omega_{si}^2 d_{si}(t) = -\ddot{u}_g(t) - \ddot{u}_b(t) \quad \forall i \in (1; n) \quad (3.11a)$$

$$\boldsymbol{\tau}^T \mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{u}}_s(t) + m_{tot} \ddot{u}_b(t) + R(t) = -m_{tot} \ddot{u}_g(t) \quad (3.11b)$$

El primer término del lado izquierdo de la ecuación 3.11b representa el efecto de re-energización de la superestructura al sistema de aislamiento. Este término puede ser manipulado y transformado usando la ecuación 3.10, obteniendo como resul-

tado $\tau^T M_s \ddot{u}_s(t) = \gamma_s^T \Gamma_s \ddot{d}_s(t) = \gamma_s^{2T} \ddot{d}_s(t)$, con $\gamma_s^{2T} = [\gamma_{s1}^2, \gamma_{s2}^2, \dots, \gamma_{sn}^2]$ siendo un vector $n \times 1$ que contiene los cuadrados de los factores de participación modal. Por otro lado, se debe recordar la definición de factor de participación de masa $\varepsilon_i = \gamma_{si}^2 / m_{stot}$, de donde se obtiene $\varepsilon_s = \text{diag}\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n\}$. Además, se introduce $\lambda = m_{stot} / m_{tot}$ como la relación entre la masa total de la superestructura y la masa total de la estructura. Finalmente se divide la ecuación 3.11b por m_{tot} , lo que da como resultado:

$$\ddot{u}_b(t) + \ddot{d}_{si}(t) + 2\zeta_{si}\omega_{si}\dot{d}_{si}(t) + \omega_{si}^2 d_{si}(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad \forall i \in (1;n) \quad (3.12a)$$

$$\lambda \tau^T \varepsilon_s \ddot{d}_s(t) + \ddot{u}_b(t) + \frac{R(t)}{m_{tot}} = -\ddot{u}_g(t) \quad (3.12b)$$

Las ecuaciones 3.12a y 3.12b pueden reescribirse juntas en forma matricial de la siguiente manera:

$$M\ddot{d}(t) + C\dot{d}(t) + Kd(t) + R(t) = -\nu\ddot{u}_g(t) \quad (3.13)$$

Donde:

$$M = \begin{bmatrix} I_{n \times n} & \tau \\ \lambda \tau^T \varepsilon_s & 1 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} \Xi_s & 0 \\ 0^T & 0 \end{bmatrix}; \quad K = \begin{bmatrix} \Omega_s^2 & 0 \\ 0^T & 0 \end{bmatrix}; \quad (3.14a)$$

$$R(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ R(t)/m_{tot} \end{bmatrix}; \quad d(t) = \begin{bmatrix} d_s(t) \\ u_b(t) \end{bmatrix}; \quad \nu = \begin{bmatrix} \tau \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.14b)$$

3.2 ALGORITMO DE INTEGRACIÓN NUMÉRICA

3.2.1 Formulación Incremental del Método Beta de Newmark

Las aproximaciones de diferencias finitas para el método Beta de Newmark se muestran a continuación:

$$d_{i+1} \approx d_i + (\Delta t)\dot{d}_i + (\Delta t)^2 \left[\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{d}_i + \beta \ddot{d}_{i+1} \right] \quad (3.15a)$$

$$\dot{d}_{i+1} \approx \dot{d}_i + \Delta t \left[(1 - \gamma)\ddot{d}_i + \gamma \ddot{d}_{i+1} \right] \quad (3.15b)$$

Si en la ecuación 3.15 se considera $\beta = 1/4$ y $\gamma = 1/2$ el método Beta de Newmark es implícito e incondicionalmente estable.

La formulación incremental en términos del incremento del desplazamiento ($\delta d_i = d_{i+1} - d_i$), velocidad ($\delta \dot{d}_i = \dot{d}_{i+1} - \dot{d}_i$), aceleración ($\delta \ddot{d}_i = \ddot{d}_{i+1} - \ddot{d}_i$) y de la fuerza

restitutiva no lineal ($\delta \mathbf{R}_i = \mathbf{R}_{i+1} - \mathbf{R}_i$) viene dada por:

$$\delta \dot{\mathbf{d}}_i = \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} \delta \mathbf{d}_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{\mathbf{d}}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{\mathbf{d}}_i \quad (3.16a)$$

$$\delta \ddot{\mathbf{d}}_i = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \delta \mathbf{d}_i - \frac{1}{\beta(\Delta t)} \dot{\mathbf{d}}_i - \frac{1}{2\beta} \ddot{\mathbf{d}}_i \quad (3.16b)$$

Satisfaciendo el equilibrio incremental sobre el paso de tiempo Δt se tiene:

$$\mathbf{M} \delta \ddot{\mathbf{d}}_i + \mathbf{C} \delta \dot{\mathbf{d}}_i + \mathbf{K} \delta \mathbf{d}_i + \delta \mathbf{R}_i = -\nu \delta \ddot{u}_{g_i} \quad (3.17)$$

Reemplazando las ecuaciones 3.16a y 3.16b en 3.17 y reagrupando se obtiene:

$$\mathbf{A}_1 \delta \mathbf{d}_i + \delta \mathbf{R}_i = \mathbf{A}_2 \dot{\mathbf{d}}_i + \mathbf{A}_3 \ddot{\mathbf{d}}_i - \nu \delta \ddot{u}_{g_i} \quad (3.18)$$

Donde:

$$\mathbf{A}_1 = \frac{1}{\beta(\Delta t)^2} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} \mathbf{C} + \mathbf{K} \quad (3.19a)$$

$$\mathbf{A}_2 = \frac{1}{\beta(\Delta t)} \mathbf{M} + \frac{\gamma}{\beta} \mathbf{C} \quad (3.19b)$$

$$\mathbf{A}_3 = \frac{1}{2\beta} \mathbf{M} + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \mathbf{C} \quad (3.19c)$$

3.2.2 Linealización de la Fuerza de la Interfaz de Aislamiento

De acuerdo con Gavin (2018) la fuerza restauradora de la interfaz de aislamiento con comportamiento histerético bilineal puede ser tratada como una fuerza elástica en cada rama lineal que intenta restaurar el movimiento a una posición de equilibrio desplazada "d" como se muestra en la Figura N° 3.2, es decir:

$$R(t) = K_b(u_b(t) - d(t)) \quad (3.20)$$

La rigidez de la interfaz de aislamiento K_b solamente puede tomar dos valores, los cuales corresponden a la rigidez elástica K_{b_e} y a la rigidez postfluecia K_{b_p} . Por lo tanto, las ecuaciones de movimiento estarán condicionadas a los parámetros de control geométrico del comportamiento bilineal.

$$K_b = K_{b_e} \quad \vee \quad K_b = K_{b_p} \quad (3.21)$$

Es así que la formulación incremental de las ecuaciones de movimiento para este tipo de comportamiento histerético permite linealizar el tratamiento de la solución

en cada paso de tiempo sin necesidad de realizar iteraciones de convergencia.

$$\delta R = \delta [K_b(u_b - d)] = K_b \delta u_b \quad (3.22)$$

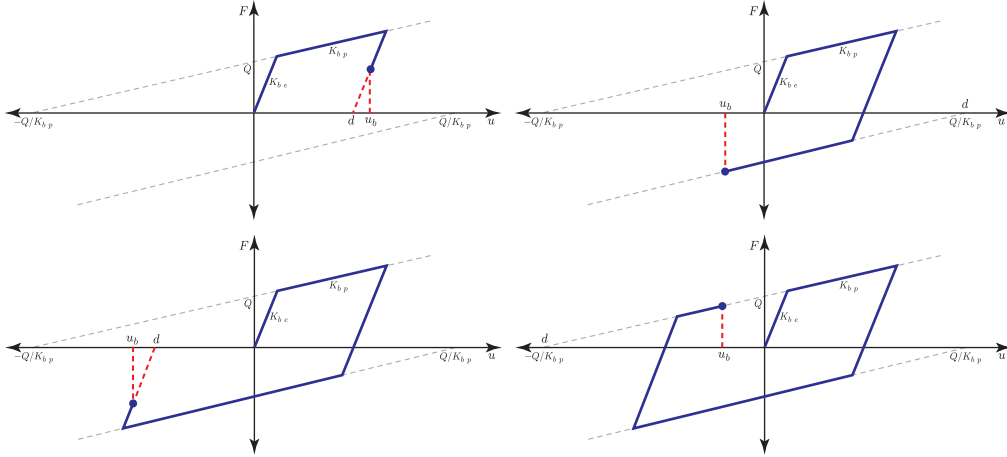


FIGURA N° 3.2: Linealización del modelo bilineal. Adaptado de Gavin (2018)

Teniendo en cuenta la ecuación 3.22 se puede reescribir el valor de δR de la siguiente manera:

$$\delta \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \delta R / m_{tot} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ K_b \delta u_b / m_{tot} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & K_b / m_{tot} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta d_s \\ \delta u_b \end{bmatrix} = \mathbf{K}_b \delta d \quad (3.23)$$

Reemplazando la ecuación 3.23 en 3.18 se obtiene:

$$[\mathbf{A}_1 + \mathbf{K}_b] \delta d_i = \mathbf{A}_2 \dot{d}_i + \mathbf{A}_3 \ddot{d}_i - \nu \delta \ddot{u}_{g i} \quad (3.24)$$

Luego, se puede despejar el incremento de desplazamiento:

$$\delta d_i = [\mathbf{A}_1 + \mathbf{K}_b]^{-1} [\mathbf{A}_2 \dot{d}_i + \mathbf{A}_3 \ddot{d}_i - \nu \delta \ddot{u}_{g i}] \quad (3.25)$$

Finalmente se debe recordar:

$$d_{i+1} = d_i + \delta d_i \quad (3.26)$$

3.2.3 Algoritmo de Solución para Edificaciones Aisladas

A continuación se describe el algoritmo numérico seguido para calcular la respuesta sísmica de una edificación aislada.

1. Definir los parámetros dinámicos de la superestructura, como lo son el número de niveles, el periodo fundamental de la superestructura en base fija, el

porcentaje de amortiguamiento crítico y la relación de masas.

$$n, T_s, \beta, \lambda$$

- Definir los parámetros del modelo bilineal de la interfaz de aislamiento, tales como la rigidez elástica, la rigidez postfluencia y la fuerza característica.

$$K_{b\ e}, K_{b\ p}, Q_b$$

- Definir el registro sísmico que se usará.

$$\ddot{u}_g; N = \text{len}(\ddot{u}_g)$$

- Asignar los valores iniciales del sistema.

$$\mathbf{d}_0 = \dot{\mathbf{d}}_0 = \ddot{\mathbf{d}}_0 = \mathbf{0}$$

$$d = 0; K_b = K_{b\ e}$$

Para $i \in [1; N]$ se realizarán los pasos del 5 al 14.

- Calcular el incremento de desplazamiento (ecuación 3.25) y de velocidad (ecuación 3.16).

$$\delta \mathbf{d}_i = [\mathbf{A}_1 + \mathbf{K}_b]^{-1} [\mathbf{A}_2 \dot{\mathbf{d}}_i + \mathbf{A}_3 \ddot{\mathbf{d}}_i - \nu \delta \ddot{u}_{g\ i}]$$

$$\delta \dot{\mathbf{d}}_i = \frac{\gamma}{\beta(\Delta t)} \delta \mathbf{d}_i - \frac{\gamma}{\beta} \dot{\mathbf{d}}_i + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{\mathbf{d}}_i$$

- Calcular los desplazamientos y velocidades.

$$\mathbf{d}_{i+1} = \mathbf{d}_i + \delta \mathbf{d}_i$$

$$\dot{\mathbf{d}}_{i+1} = \dot{\mathbf{d}}_i + \delta \dot{\mathbf{d}}_i$$

Los pasos 7, 8 y 9 controlan el comportamiento histerético bilineal de la interfaz de aislamiento.

- Calcular la fuerza de fluencia para el desplazamiento $u_{b\ i}$.

$$F_y = Q \cdot \text{sgn}(\dot{u}_{b\ i+1}) + K_{b\ p} \cdot u_{b\ i+1}$$

- Verificar la fluencia.

$$\text{Si: } K_b = K_{b\ e}; \dot{u}_{b\ i+1} > 0; K_b(u_{b\ i+1} - d) > F_y$$

Se alcanzó la fluencia en el lazo de carga

$$\text{Entonces: } K_b = K_{b p}; \quad d = -Q/K_{b p}$$

$$\text{Si: } K_b = K_{b e}; \quad \dot{u}_{b i+1} < 0; \quad K_b(u_{b i+1} - d) < F_y$$

Se alcanzó la fluencia en el lazo de descarga

$$\text{Entonces: } K_b = K_{b p}; \quad d = Q/K_{b p}$$

9. Verificar la de reversión de carga.

$$\text{Si: } K_b = K_{b p}; \quad \dot{u}_{b i+1} \cdot \dot{u}_{b i} < 0$$

$$\text{Entonces: } K_b = K_{b e}; \quad d = u_{b i+1} - K_{b p}/K_{b e}(u_{b i+1} - d)$$

10. Actualizar la matriz de rigidez de la interfaz de aislamiento.

$$K_b = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{n \times n} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & K_b/m_{tot} \end{bmatrix}$$

11. Actualizar la fuerza restauradora.

$$R_{i+1} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ R_{i+1}/m_{tot} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ K_b(u_{b i+1} - d)/m_{tot} \end{bmatrix}$$

12. Calcular la aceleración a partir de las ecuaciones de movimiento.

$$\ddot{d}_{i+1} = -M^{-1} [\nu \ddot{u}_{g i+1} + C \dot{d}_{i+1} + K d_{i+1} + R_{i+1}]$$

13. Almacenar los resultados.

$$d_{i+1}; \quad \dot{d}_{i+1}; \quad \ddot{d}_{i+1}; \quad R_{i+1}$$

14. Calcular los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de la superestructura.

$$u_{s i+1} = \Phi_s \Gamma_s d_{s i+1}; \quad \dot{u}_{s i+1} = \Phi_s \Gamma_s \dot{d}_{s i+1}; \quad \ddot{u}_{s i+1} = \Phi_s \Gamma_s \ddot{d}_{s i+1}$$

15. Determinar los valores máximos de interés y almacenarlos.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo del algoritmo usado en este caso para calcular la respuesta sísmica de una edificación aislada.

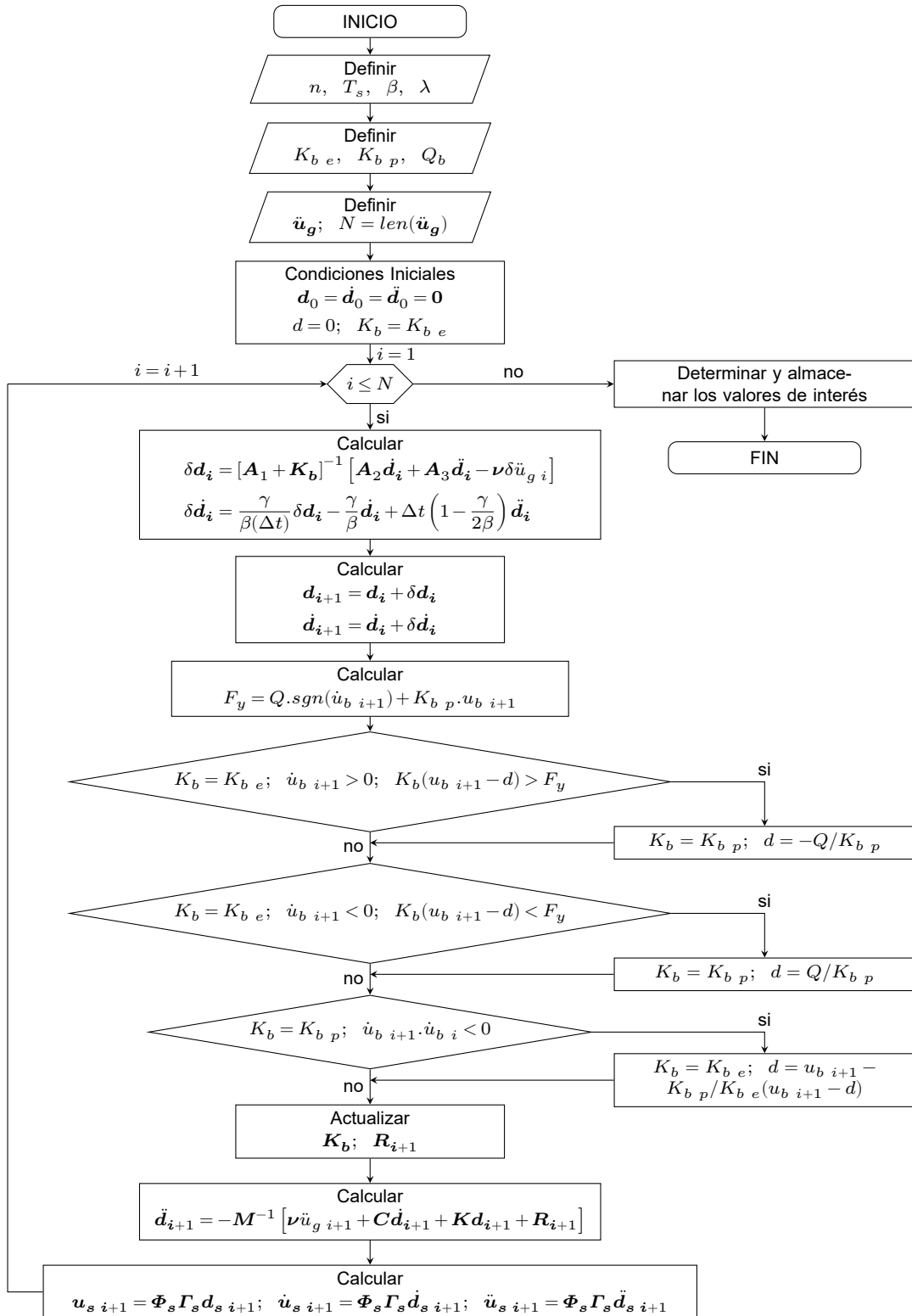


FIGURA N° 3.3: Algoritmo de solución para edificaciones aisladas.

3.3 PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS

A continuación se describe el procedimiento planteado por Naeim y Kelly (1999) para realizar el predimensionamiento de las propiedades mecánicas de la interfaz de aislamiento que se incorporará en una edificación. Es preciso indicar que este procedimiento fue planteado teniendo en consideración que la interfaz de aislamiento presenta un comportamiento hysterético de tipo bilineal, similar al mostrado en el apartado 2.2.1.

- Asignar el valor del período de la edificación en base fija, el valor del porcentaje de amortiguamiento deseado y la razón de aislamiento.

$$T_f; \beta_M; r \quad (3.27)$$

Nota: La razón de aislamiento r se entiende como la relación entre el período de la edificación con base aislada y el período de la edificación en base fija.

- Calcular el período de la edificación aislada y su correspondiente pseudoaceleración basado en el espectro de la norma E031.

$$T_M = rT_f; S_{aM} \quad (3.28)$$

- Calcular el desplazamiento traslacional estático y la rigidez efectiva del sistema de aislamiento.

$$D_M = \frac{S_{aM}T_M^2}{4\pi^2B_M}; K_{effM} = \frac{4\pi^2W}{T_M^2g} \quad (3.29)$$

- Calcular la energía disipada en cada ciclo de histéresis.

$$W_M = 2\pi K_{effM}D_M^2\beta_M \quad (3.30)$$

- Obtener la fuerza característica de la interfaz de aislamiento.

$$Q = \frac{W_M}{4(D_M - D_y)} \quad (3.31)$$

Nota: Para una primera aproximación se puede despreciar el desplazamiento de fluencia, es decir, $D_y = 0$.

- Computar la rigidez postfluencia de la interfaz de aislamiento.

$$K_p = K_{effM} - \frac{Q}{D_M} \quad (3.32)$$

- Calcular la rigidez elástica de la interfaz de aislamiento.

$$K_e = \frac{K_p}{\alpha} \quad (3.33)$$

Nota: Como aproximación inicial se puede considerar que $\alpha = 0.1$

- Obtener el desplazamiento de fluencia.

$$D_y = \frac{Q}{K_e - K_p} \quad (3.34)$$

- Usar el valor de D_y obtenido en el paso anterior para recalculer Q de acuerdo con la ecuación Ecuación 3.31.

3.4 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS

En esta sección se presenta a modo de ejemplo el predimensionamiento, el análisis y los resultados obtenidos para un modelo bidimensional de una edificación de tres niveles que incorpora una interfaz de aislamiento con un comportamiento histerético de tipo bilineal. Se usará la componente NS del registro sísmico de Lima de 1966, mostrado en la Figura N° 2.14, como aceleración en la base.

3.4.1 Predimensionamiento

Para realizar el predimensionamiento de la edificación en cuestión se hicieron algunas hipótesis, por ejemplo, se supuso que el peso de todos los niveles de la superestructura así como el peso de la interfaz de aislamiento tienen el mismo valor. Por otro lado, también se supuso que todos los modos de vibración de la superestructura tienen la misma fracción del amortiguamiento crítico. Asimismo, se estimó el periodo en base fija de la superestructura usando la ecuación 2.20, para $f = 0.1$. A continuación, se muestran los cálculos realizados en el proceso de predimensionamiento.

- Datos iniciales.

$$T_f = 0.3 \text{ s}; \quad \beta_M = 15\%; \quad r = 3$$

- Periodo objetivo y pseudoaceleración.

$$T_M = rT_f = 0.9 \text{ s}; \quad S_{aM} = 0.75g$$

- Masa de la superestructura y masa total.

$$m_{stot} = 3m; \quad m_b = m; \quad m_{tot} = 4m$$

Nota: Es preciso indicar que muchas propiedades fueron normalizadas respecto a la masa total, las cuales son fácilmente identificables pues tienen un superíndice en forma de asterisco. Por ejemplo Q^* es la fuerza característica normalizada, es decir, $Q^* = Q/m_{tot}$.

- Desplazamiento traslacional estático y rigidez efectiva normalizada.

$$D_M = \frac{S_{aM} T_M^2}{4\pi^2 B_M} = 110 \text{ mm}; \quad K_{effM}^* = \frac{4\pi^2 W}{T_M^2 g} = 48.7 \frac{1}{s^2}$$

Nota: En la expresión anterior se usó $B_M = 1.35$ de acuerdo con la Tabla N° 2.1.

- Energía disipada normalizada.

$$W_M^* = 2\pi K_{effM}^* D_M^2 \beta_M = 0.0058 \text{ g}^2 \text{ s}^2$$

- Fuerza característica normalizada (primera iteración)

$$Q^* = \frac{W_M^*}{4(D_M)} = 0.128 \text{ g}$$

- Rigidez postfluencia (primera iteración)

$$K_p^* = K_{effM}^* - \frac{Q^*}{D_M} = 37.25 \frac{1}{s^2}$$

- Desplazamiento de fluencia (primera iteración)

$$D_y = \frac{\alpha Q^*}{(1-\alpha)K_p^*} = 3.76 \text{ mm}$$

- Fuerza característica normalizada (segunda iteración)

$$Q^* = \frac{W_M^*}{4(D_M - D_y)} = 0.133 \text{ g}$$

- Rigidez postfluencia (segunda iteración)

$$K_p^* = K_{effM}^* - \frac{Q^*}{D_M} = 36.84 \frac{1}{s^2}$$

- Desplazamiento de fluencia (segunda iteración)

$$D_y = \frac{\alpha Q^*}{(1-\alpha)K_p^*} = 3.93 \text{ mm}$$

A continuación, se muestra la Tabla N° 3.1 con los parámetros necesarios para definir el modelo bilineal de la interfaz de aislamiento.

TABLA N° 3.1: Parámetros de la interfaz de aislamiento

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Rigidez postfluencia normalizada	K_p^*	36.84	$1/s^2$
Rigidez elástica normalizada	K_e^*	368.40	$1/s^2$
Fuerza característica normalizada	Q^*	0.133	g

3.4.2 Resultados

Luego de aplicar el algoritmo mostrado en la Figura N° 3.3 usando los parámetros de la Tabla N° 3.1 se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

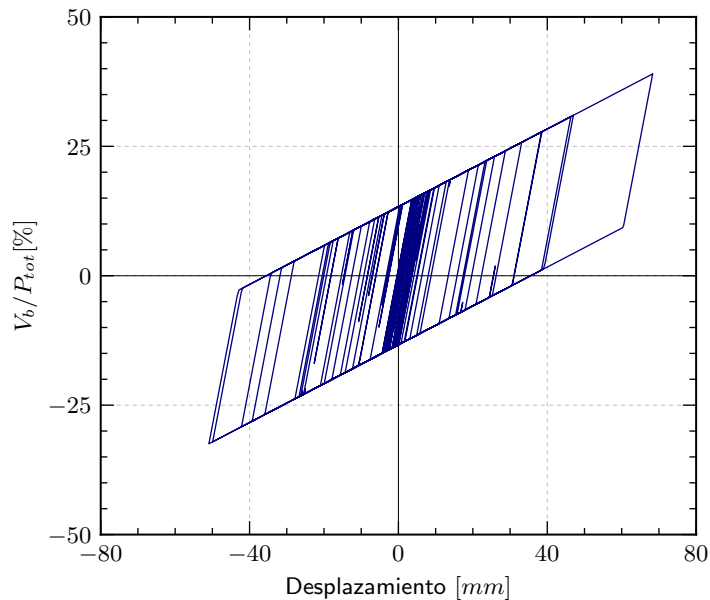


FIGURA N° 3.4: Histéresis de la interfaz de aislamiento.

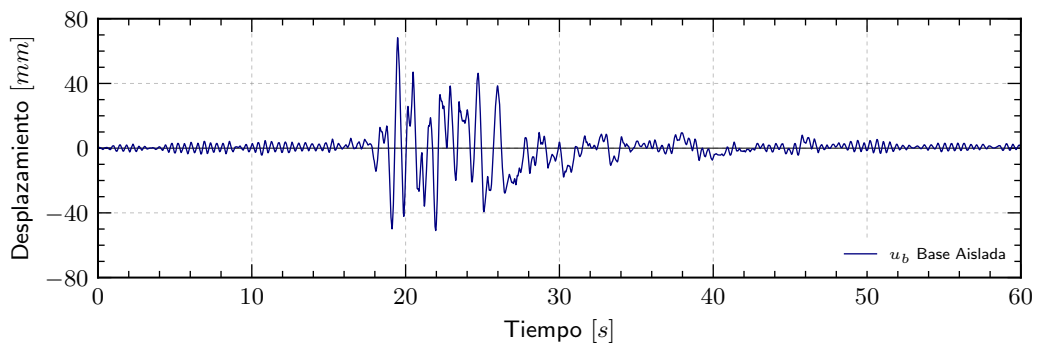


FIGURA N° 3.5: Desplazamiento de la interfaz de aislamiento.

La Figura N° 3.4 muestra el comportamiento histerético de tipo bilineal de la interfaz de aislamiento, donde la fuerza cortante basal esta normalizada respecto al peso total de la edificación a fin de tener una mejor comprensión de la misma. Asimismo, las Figuras N° 3.6, N° 3.7 y N° 3.8 muestran los resultados de la edificación aislada en superposición con los resultados de la misma edificación en base fija, con el objetivo de evidenciar de manera visual la reducción en las respuestas sísmicas. Por otro lado, cabe recalcar que la Figura N° 3.6 presenta el desplazamiento relativo del tercer nivel de la edificación respecto de la interfaz de aislamiento.

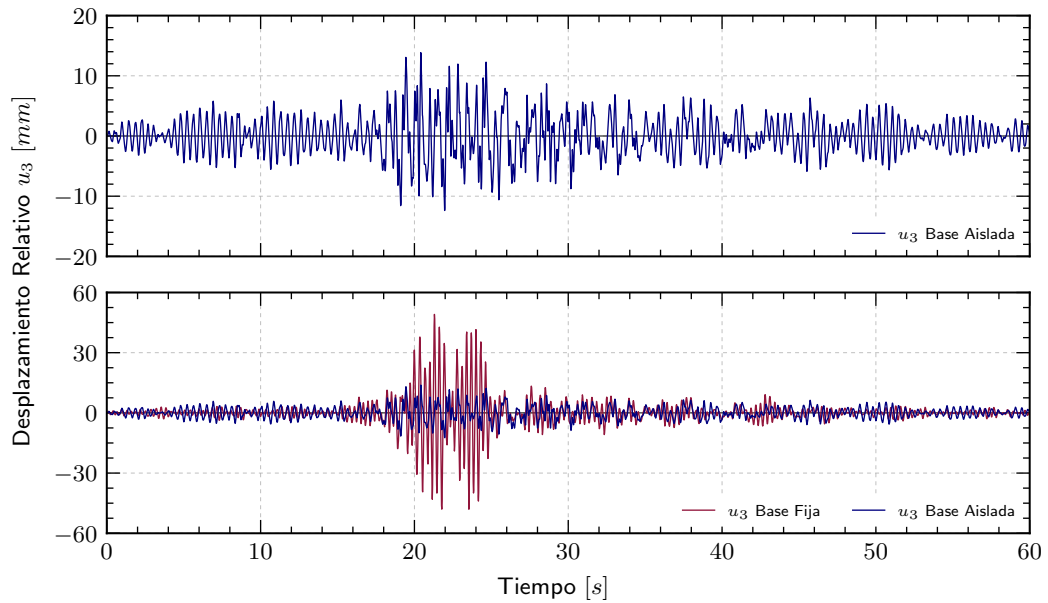


FIGURA N° 3.6: Desplazamiento relativo del último nivel.

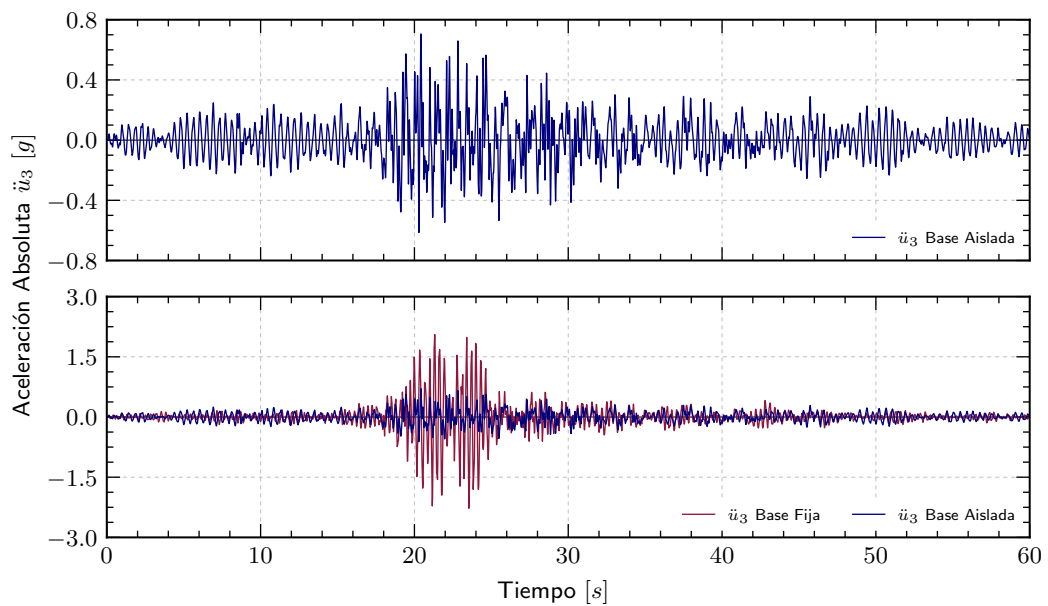


FIGURA N° 3.7: Aceleración absoluta del último nivel.

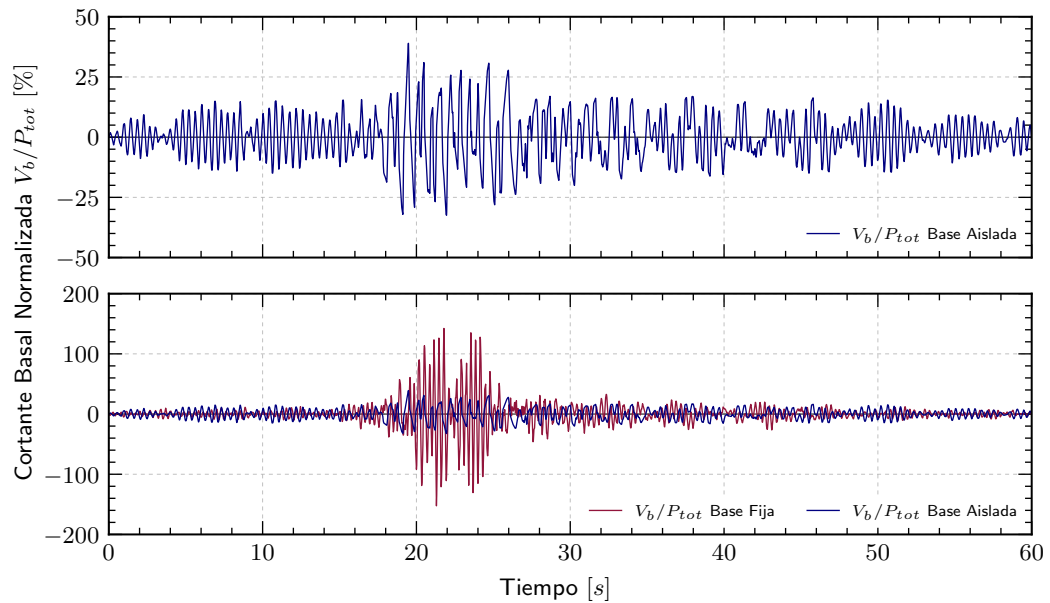


FIGURA N° 3.8: Fuerza cortante basal normalizada.

La Tabla N° 3.2 muestra los resultados máximos absolutos obtenidos para la edificación aislada, donde se puede apreciar fácilmente que la interfaz de aislamiento es la que experimenta la mayor deformación en comparación con la superestructura. De igual modo, la Tabla N° 3.3 presenta los resultados máximos absolutos de la misma edificación en base fija. Asimismo, comparando las respuestas sísmicas de ambas tablas se observa que se logró una reducción del 72 %, 69 % y del 74 % en términos del desplazamiento relativo del último nivel, la aceleración absoluta del último nivel y de la fuerza cortante basal normalizada respectivamente. Estos resultados muestran la eficacia del uso del aislamiento de base.

TABLA N° 3.2: Resultados máximos de la edificación aislada

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Desplazamiento de la interfaz de aislamiento	u_b	68.33	mm
Desplazamiento relativo del último nivel	u_3	13.85	mm
Aceleración absoluta del último nivel	\ddot{u}_3	0.71	g
Fuerza cortante basal normalizada	V_b/P_{tot}	38.99	%

TABLA N° 3.3: Resultados máximos de la edificación en base fija

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Desplazamiento del último nivel	u_3	49.10	mm
Aceleración absoluta del último nivel	\ddot{u}_3	2.27	g
Fuerza cortante basal normalizada	V_b/P_{tot}	152.46	%

3.5 RESPUESTA SÍSMICA DE MODELOS SIMPLES

En esta sección se estudiarán modelos simplificados de edificaciones aisladas con diferente número de niveles, con el fin de conocer la eficiencia del aislamiento de base en la reducción de las respuestas sísmicas. Se usará la componente NS del sismo de Lima del 1966 como aceleración basal para todos los casos. Se compararán las respuestas sísmicas obtenidas para la edificación aislada contra las respuestas sísmicas para la misma edificación en base fija. La fuerza cortante basal se normalizó respecto al peso total, tanto para la edificación aislada así como para la edificación en base fija. Sin embargo, debido a que el peso total de la alternativa aislada es mayor al de la alternativa en base fija, ya que la primera alternativa incluye el peso de la interfaz de aislamiento, es fácil notar que el valor de normalización fue distinto para cada caso.

La reducción de la respuestas sísmicas se evaluará de la siguiente manera:

$$Reducción [\%] = \left(1 - \frac{Respuesta_{Base\ Aislada}}{Respuesta_{Base\ Fija}} \right) 100\% \quad (3.35)$$

A continuación, se presentan tablas con los parámetros que definen al comportamiento histerético bilineal para edificaciones con aislamiento de base con diferentes razones de aislamiento ($r = T_M/T_f$). Dichos parámetros se obtuvieron luego de aplicar el procedimiento descrito en la sección 3.3.

TABLA N° 3.4: Parámetros de la interfaz de aislamiento $r = 2$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_f	s	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
Q^*	g	0.191	0.095	0.064	0.047	0.030	0.022
K_p^*	$1/s^2$	75.16	18.79	8.51	4.70	3.01	2.19
K_e^*	$1/s^2$	751.59	187.90	85.12	46.97	30.06	21.91

TABLA N° 3.5: Parámetros de la interfaz de aislamiento $r = 3$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_f	s	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
Q^*	g	0.133	0.064	0.036	0.022	0.015	0.011
K_p^*	$1/s^2$	36.84	8.35	3.60	2.16	1.52	1.06
K_e^*	$1/s^2$	368.40	83.51	35.96	21.56	15.23	10.58

TABLA N° 3.6: Parámetros de la interfaz de aislamiento $r = 4$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_f	s	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
Q^*	g	0.095	0.048	0.022	0.014	0.009	0.006
K_p^*	$1/s^2$	18.79	4.81	2.19	1.36	0.89	0.62
K_e^*	$1/s^2$	187.90	48.11	21.91	13.62	8.94	6.21

TABLA N° 3.7: Parámetros de la interfaz de aislamiento $r = 5$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_f	s	0.30	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
Q^*	g	0.071	0.030	0.015	0.009	0.006	0.004
K_p^*	$1/s^2$	10.57	3.01	1.53	0.88	0.59	0.41
K_e^*	$1/s^2$	105.69	30.06	15.34	8.81	5.88	4.08

3.5.1 Importancia de la Razón de Aislamiento

La razón de aislamiento es el cociente que resulta de dividir el período de la edificación aislada entre el período de la edificación en base fija. Este parámetro es un buen indicador para medir el nivel de aislamiento que se le proporciona a una edificación, es decir, en un caso ideal se pretendería que la razón de aislamiento tome el mayor valor posible; sin embargo, desde un enfoque práctico y teniendo en cuenta ciertas limitaciones se suelen usar razones de aislamiento entre 2 y 5.

En las siguientes tablas se muestran los resultados máximos obtenidos para las edificaciones con diferente número de niveles y para cuatro razones de aislamiento diferentes. La reducción de la respuesta sísmica se medirá en función de la fuerza cortante basal normalizada, el desplazamiento relativo del último nivel respecto a la interfaz de aislamiento y la aceleración absoluta del último nivel. Además, también se presentan los resultados para la edificación en base fija.

Para obtener los valores que se muestran en las Tablas N° 3.8, N° 3.9, N° 3.10 y N° 3.11 se trabajó con gráficos similares a los presentados en el apartado 3.4.2 para cada uno de los casos. De estos gráficos, que muestran las respuestas del análisis tiempo historia, se obtuvieron los máximos valores absolutos.

TABLA N° 3.8: Fuerza cortante basal normalizada máxima

Fuerza cortante basal normalizada - V_b/P_{tot} [%]					
N° de niveles	Base fija	Razón de aislamiento			
		$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	152.46	49.80	38.99	22.72	17.16
6	101.47	25.09	16.06	13.99	10.46
9	71.77	14.08	12.24	7.98	6.84
12	51.07	14.09	7.89	6.39	4.93
15	37.73	9.38	6.45	4.81	3.51
18	30.08	7.48	5.28	3.60	2.63

TABLA N° 3.9: Desplazamiento relativo máximo del último nivel

Desplazamiento relativo del último nivel - u_n [mm]					
N° de niveles	Base fija	Razón de aislamiento			
		$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	49.10	14.96	13.85	9.58	7.95
6	129.46	37.45	28.94	19.14	12.34
9	193.77	50.00	32.05	21.76	18.67
12	250.72	82.75	39.41	32.34	22.86
15	318.32	81.64	63.11	42.96	28.36
18	376.77	102.36	66.39	45.95	28.83

TABLA N° 3.10: Aceleración absoluta máxima del último nivel

Aceleración absoluta del último nivel - \ddot{u}_n [g]					
N° de niveles	Base fija	Razón de aislamiento			
		$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	2.27	0.99	0.71	0.48	0.37
6	1.70	0.68	0.45	0.33	0.18
9	1.31	0.47	0.23	0.16	0.12
12	0.98	0.44	0.19	0.14	0.10
15	1.12	0.28	0.16	0.10	0.07
18	0.79	0.22	0.12	0.08	0.06

TABLA N° 3.11: Desplazamiento máximo de la interfaz de aislamiento

Desplazamiento de la interfaz de aislamiento - u_b [mm]				
N° de niveles	Razón de aislamiento			
	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	40.13	68.48	68.33	92.99
6	81.26	113.99	186.88	242.77
9	88.35	235.05	258.50	338.48
12	195.61	260.47	361.83	450.18
15	207.52	316.67	428.87	487.03
18	236.04	391.32	470.28	533.93

Con los resultados que se muestran en las tablas anteriores y haciendo uso de la ecuación 3.35 se obtuvieron los porcentajes de reducción para cada una de las respuestas sísmicas, los cuales se muestran a continuación.

TABLA N° 3.12: Reducción de la fuerza cortante basal normalizada

Reducción de la fuerza cortante basal [%]				
N° de niveles	Razón de aislamiento			
	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	67.34	74.43	85.10	88.74
6	75.27	84.18	86.22	89.69
9	80.38	82.95	88.89	90.48
12	72.40	84.54	87.48	90.35
15	75.13	82.90	87.25	90.70
18	75.15	82.43	88.02	91.25

TABLA N° 3.13: Reducción del desplazamiento relativo del último nivel

Reducción del desplazamiento relativo [%]				
N° de niveles	Razón de aislamiento			
	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	69.54	71.79	80.50	83.81
6	71.07	77.64	85.22	90.47
9	74.20	83.46	88.77	90.36
12	67.00	84.28	87.10	90.88
15	74.35	80.17	86.50	91.09
18	72.83	82.38	87.80	92.35

TABLA N° 3.14: Reducción de la aceleración absoluta del último nivel

Reducción de la aceleración absoluta [%]				
N° de niveles	Razón de aislamiento			
	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	56.45	68.72	78.98	83.83
6	59.88	73.57	80.54	89.18
9	64.07	82.55	88.11	90.53
12	54.80	80.90	85.55	89.34
15	75.13	85.86	91.12	93.56
18	71.83	84.47	89.56	92.76

Para un mejor entendimiento de los resultados presentados en las Tablas N° 3.12, N° 3.13 y N° 3.14 se procede a elaborar gráficos que muestren de manera visual la importancia de la razón de aislamiento en la reducción de las respuestas sísmicas de edificaciones aisladas. En la Figura N° 3.9 se observa que el desplazamiento de la interfaz de aislamiento se incrementa conforme se incrementa el número de niveles y también conforme la razón de aislamiento es mayor. Asimismo, un mayor desplazamiento de la interfaz de aislamiento implica que se deben usar aisladores sísmicos de mayor tamaño, por ende, desde un punto de vista práctico no es viable, en la mayoría de casos, usar una razón de aislamiento mayor a cinco o implementar una interfaz de aislamiento en edificaciones de gran altura.

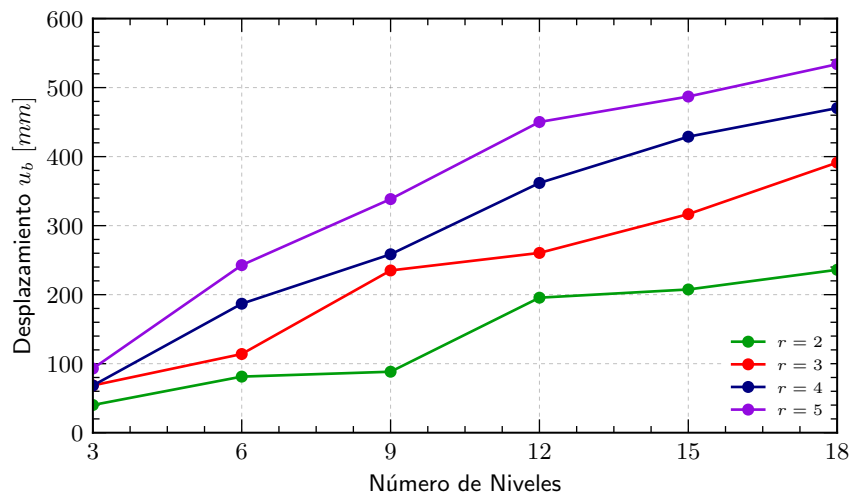


FIGURA N° 3.9: Desplazamiento máximo de la interfaz de aislamiento.

A continuación, en las Figuras N° 3.10, N° 3.11 y N° 3.12 se muestran gráficamente las reducciones alcanzadas para cada una de las respuestas sísmicas de interés.

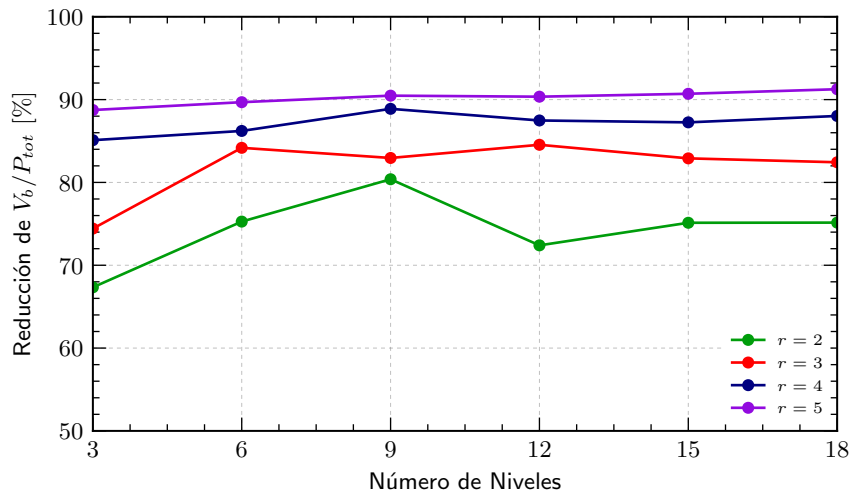


FIGURA N° 3.10: Reducción de la fuerza cortante basal normalizada.

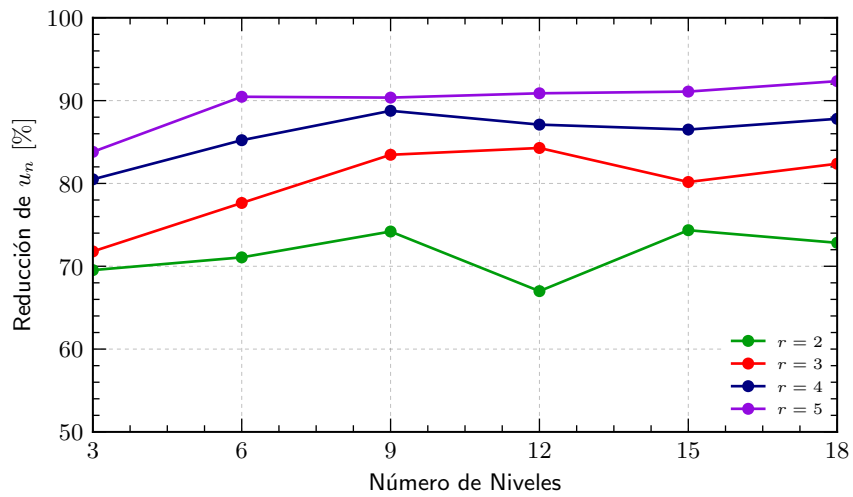


FIGURA N° 3.11: Reducción del desplazamiento relativo del último nivel.

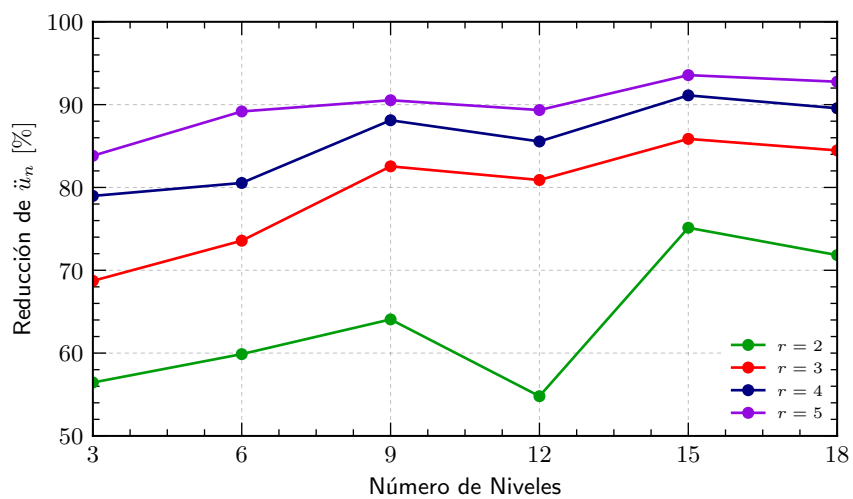


FIGURA N° 3.12: Reducción de la aceleración absoluta del último nivel.

De los gráficos anteriores se concluye que la reducción de las respuestas sísmicas, en líneas generales, se incrementan conforme la razón de aislamiento crece y además es poco susceptible a variar con el incremento del número de niveles. Por otro lado, en las tres figuras mostradas también se observa que la reducción de la fuerza cortante basal normalizada, del desplazamiento relativo del último nivel y la aceleración absoluta del último nivel para razones de aislamiento altas ($r = 4$ y $r = 5$) oscila entorno al 80 - 90 %. Además, observando la Figura N° 3.12 se evidencia que existe una ligera tendencia a que la aceleración absoluta del último nivel se reduzca más conforme se incrementa el número de pisos.

3.5.2 Propiedades Nominales, Máximas y Mínimas de la Interfaz de Aislamiento

De acuerdo con la norma E031 y la ASCE 7-16 además de analizar el comportamiento sísmico de una edificación aislada usando las propiedades nominales de la interfaz de aislamiento, se deben usar también las propiedades máximas y mínimas de la misma. Los valores máximos y mínimos del comportamiento histerético de los aisladores sísmicos se obtienen al multiplicar las propiedades nominales por los factores de modificación (λ_{min} y λ_{max}), los cuales a su vez se obtienen de la Tabla N° 3.15.

TABLA N° 3.15: Factores de modificación máximos y mínimos para fabricantes desconocidos

	Interfaz sin lubricación	Interfaz lubricada	LRD	LRB	LRB	HDR	HDR
Variable	u o Q_d	u o Q_d	K	K_d	Q_d	K_d	Q_d
Factor de modificación máximo λ_{max}	2.1	3.2	1.8	1.8	1.8	2.2	1.8
Factor de modificación mínimo λ_{min}	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Teniendo en cuenta la tabla anterior y considerando el uso de aisladores elastoméricos de tipo LRB se tiene:

$$\lambda_{min} = 0.8 \quad \wedge \quad \lambda_{max} = 1.8 \quad (3.36)$$

Luego:

$$K_p^*_{max} = 1.8K_p^* \quad \wedge \quad K_e^*_{max} = 1.8K_e^* \quad \wedge \quad Q_{max}^* = 1.8Q^* \quad (3.37a)$$

$$K_p^*_{min} = 0.8K_p^* \quad \wedge \quad K_e^*_{min} = 0.8K_e^* \quad \wedge \quad Q_{min}^* = 0.8Q^* \quad (3.37b)$$

A modo de ejemplo, a continuación se presenta la envolvente del ciclo histérico mostrado en la Figura N° 3.4 junto con las envolventes correspondientes a las propiedades mínimas y máximas. En la Figura N° 3.13 se puede apreciar además que el valor del desplazamiento máximo positivo suele diferir del valor del desplazamiento máximo negativo, tanto para las propiedades nominales así como para las propiedades mínimas y máximas.

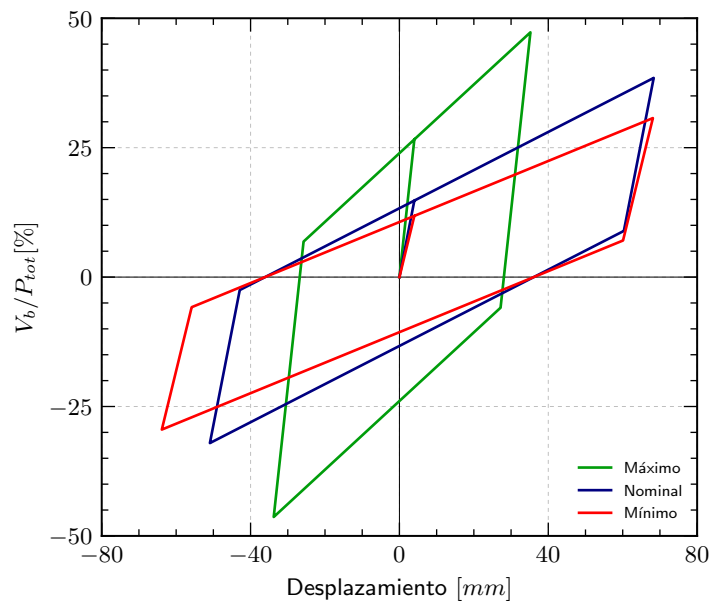


FIGURA N° 3.13: Envolventes de la histéresis de la interfaz de aislamiento.

Las tablas que se presentan en seguida muestran las respuestas sísmicas para las propiedades mínimas y máximas de la interfaz de aislamiento. Dichas propiedades mínimas y máximas que definen el comportamiento histérico de los aisladores sísmicos se obtuvieron al aplicar la ecuación 3.37 a los parámetros mostrados en las Tablas N° 3.4, N° 3.5, N° 3.6 y N° 3.7.

TABLA N° 3.16: Fuerza cortante basal normalizada - λ_{min} y λ_{max}

Fuerza cortante basal normalizada - V_b/P_{tot} [%]								
N° de niveles	Propiedades mínimas - λ_{min}				Propiedades máximas - λ_{max}			
	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	51.74	30.71	23.45	14.96	69.46	47.28	38.17	25.51
6	23.13	14.34	12.91	8.37	35.12	21.21	17.72	13.31
9	15.83	9.81	7.11	6.10	22.59	13.51	13.12	9.28
12	11.93	7.01	5.68	4.07	15.29	12.28	8.31	6.82
15	8.36	5.86	4.01	2.96	14.56	9.02	6.56	5.40
18	7.12	4.51	3.07	2.04	9.57	7.30	5.47	4.04

TABLA N° 3.17: Desplazamiento relativo del último nivel - λ_{min} y λ_{max}

Desplazamiento relativo del último nivel - u_n [mm]								
N° de niveles	Propiedades mínimas - λ_{min}				Propiedades máximas - λ_{max}			
	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	17.72	11.51	7.19	6.48	25.33	17.30	14.80	11.77
6	32.55	23.59	15.82	9.94	54.01	39.17	32.22	21.81
9	44.19	26.10	18.79	16.77	76.93	49.58	34.38	25.34
12	69.30	36.73	26.74	19.73	91.09	71.43	41.58	35.92
15	70.27	54.54	34.98	23.86	114.31	74.36	65.13	49.29
18	84.78	58.64	40.41	27.50	126.24	92.77	68.32	53.04

TABLA N° 3.18: Aceleración absoluta del último nivel - λ_{min} y λ_{max}

Aceleración absoluta del último nivel - \ddot{u}_n [g]								
N° de niveles	Propiedades mínimas - λ_{min}				Propiedades máximas - λ_{max}			
	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	0.84	0.56	0.37	0.31	1.44	0.90	0.86	0.60
6	0.53	0.38	0.26	0.14	1.02	0.66	0.50	0.37
9	0.41	0.19	0.14	0.10	0.82	0.46	0.29	0.19
12	0.34	0.16	0.14	0.09	0.62	0.36	0.20	0.16
15	0.23	0.13	0.08	0.06	0.50	0.25	0.16	0.12
18	0.19	0.10	0.07	0.05	0.48	0.20	0.13	0.10

TABLA N° 3.19: Desplazamiento de la interfaz de aislamiento - λ_{min} y λ_{max}

Desplazamiento de la interfaz de aislamiento - u_b [mm]								
N° de niveles	Propiedades mínimas - λ_{min}				Propiedades máximas - λ_{max}			
	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	59.5	68.1	103.3	107.3	25.5	35.2	61.0	65.2
6	101.2	136.0	230.8	242.7	52.1	63.8	102.4	142.6
9	154.1	236.0	299.4	389.0	70.7	106.1	227.7	231.2
12	212.6	299.8	412.7	467.9	78.7	211.9	233.7	323.4
15	242.5	373.0	451.1	519.7	165.3	224.1	300.7	402.0
18	299.7	423.7	507.1	515.8	139.4	277.4	381.6	440.4

Con los resultados que se muestran en las tablas anteriores y haciendo uso de la ecuación 3.35 se obtuvo los porcentaje de reducción para cada una de las respuestas sísmicas, para las propiedades mínimas y máximas.

TABLA N° 3.20: Reducción de la fuerza cortante basal normalizada - λ_{min} y λ_{max}

Reducción de la fuerza cortante basal normalizada [%]								
N° de niveles	Propiedades mínimas - λ_{min}				Propiedades máximas - λ_{max}			
	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	66.06	79.86	84.62	90.19	54.44	68.99	74.96	83.27
6	77.21	85.86	87.27	91.75	65.39	79.10	82.54	86.88
9	77.95	86.33	90.09	91.50	68.52	81.17	81.72	87.07
12	76.65	86.28	88.88	92.03	70.05	75.95	83.73	86.64
15	77.83	84.47	89.37	92.15	61.40	76.08	82.63	85.69
18	76.34	85.02	89.80	93.20	68.18	75.73	81.80	86.58

TABLA N° 3.21: Reducción del desplazamiento relativo del último nivel - λ_{min} y λ_{max}

Reducción del desplazamiento relativo del último nivel [%]								
N° de niveles	Propiedades mínimas - λ_{min}				Propiedades máximas - λ_{max}			
	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	63.91	76.55	85.36	86.80	48.41	64.77	69.86	76.02
6	74.86	81.77	87.78	92.32	58.28	69.74	75.11	83.15
9	77.19	86.53	90.30	91.34	60.30	74.41	82.26	86.93
12	72.36	85.35	89.34	92.13	63.67	71.51	83.42	85.67
15	77.92	82.87	89.01	92.50	64.09	76.64	79.54	84.52
18	77.50	84.44	89.27	92.70	66.49	75.38	81.87	85.92

TABLA N° 3.22: Reducción de la aceleración absoluta del último nivel - λ_{min} y λ_{max}

Reducción de la aceleración absoluta del último nivel [%]								
N° de niveles	Propiedades mínimas - λ_{min}				Propiedades máximas - λ_{max}			
	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	63.17	75.13	83.72	86.26	36.70	60.15	62.00	73.60
6	68.91	77.61	84.69	91.57	40.11	60.86	70.27	78.41
9	68.56	85.46	89.70	92.16	37.38	65.09	78.19	85.88
12	65.17	83.79	85.99	90.98	37.07	63.72	79.21	83.96
15	79.47	88.38	92.50	94.80	55.72	77.47	85.32	89.66
18	75.93	87.58	91.26	94.17	39.62	74.28	83.63	87.85

A continuación, en las Figuras N° 3.14, N° 3.15 y N° 3.16 se muestran gráficamente las reducciones alcanzados tanto para las propiedades nominales así como para las propiedades mínimas y máximas.

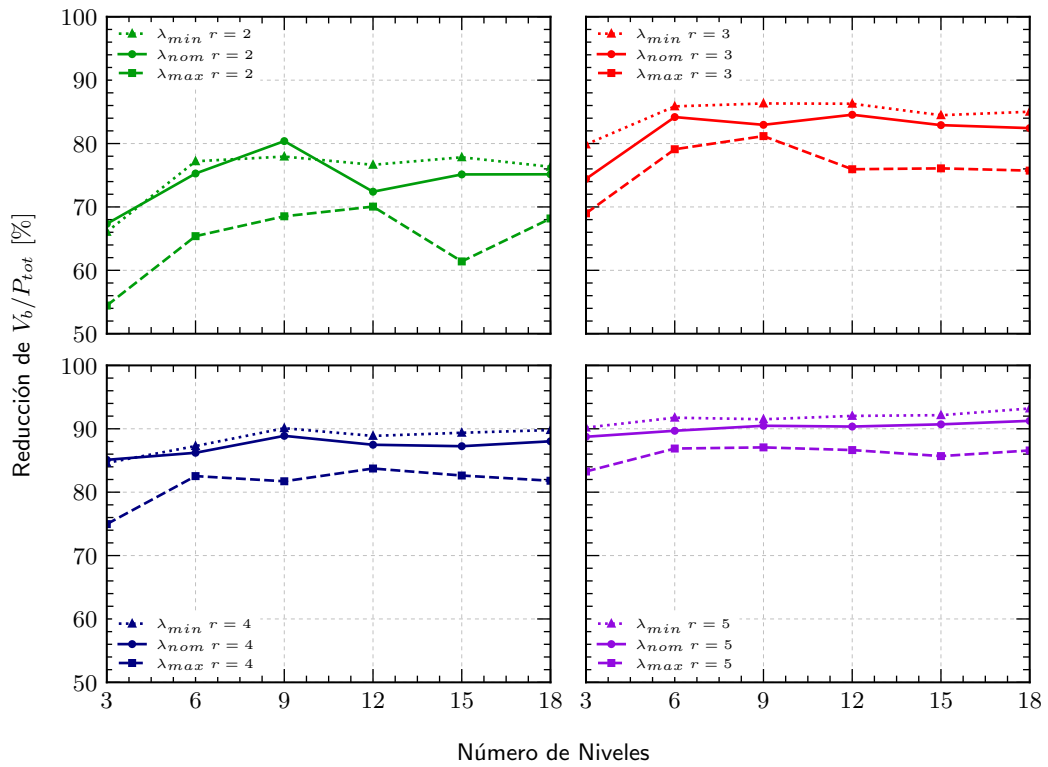


FIGURA N° 3.14: Reducción de la cortante basal - λ_{min} , λ_{nom} y λ_{max} .

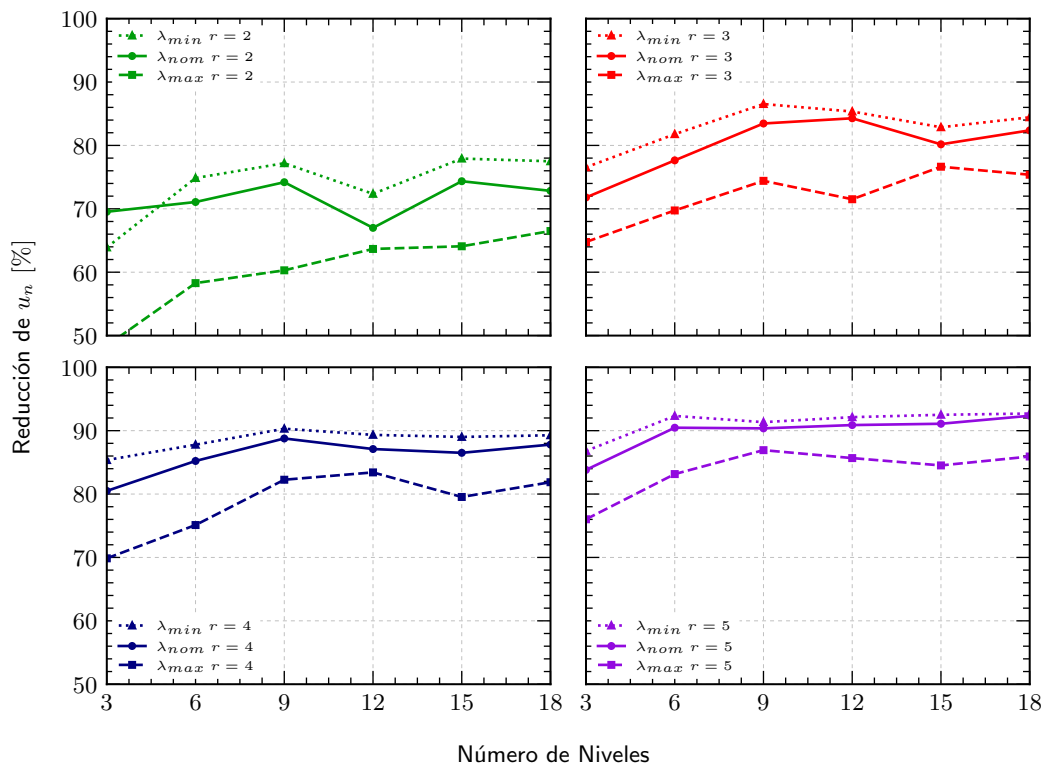


FIGURA N° 3.15: Reducción del desplazamiento u_n - λ_{min} , λ_{nom} y λ_{max} .

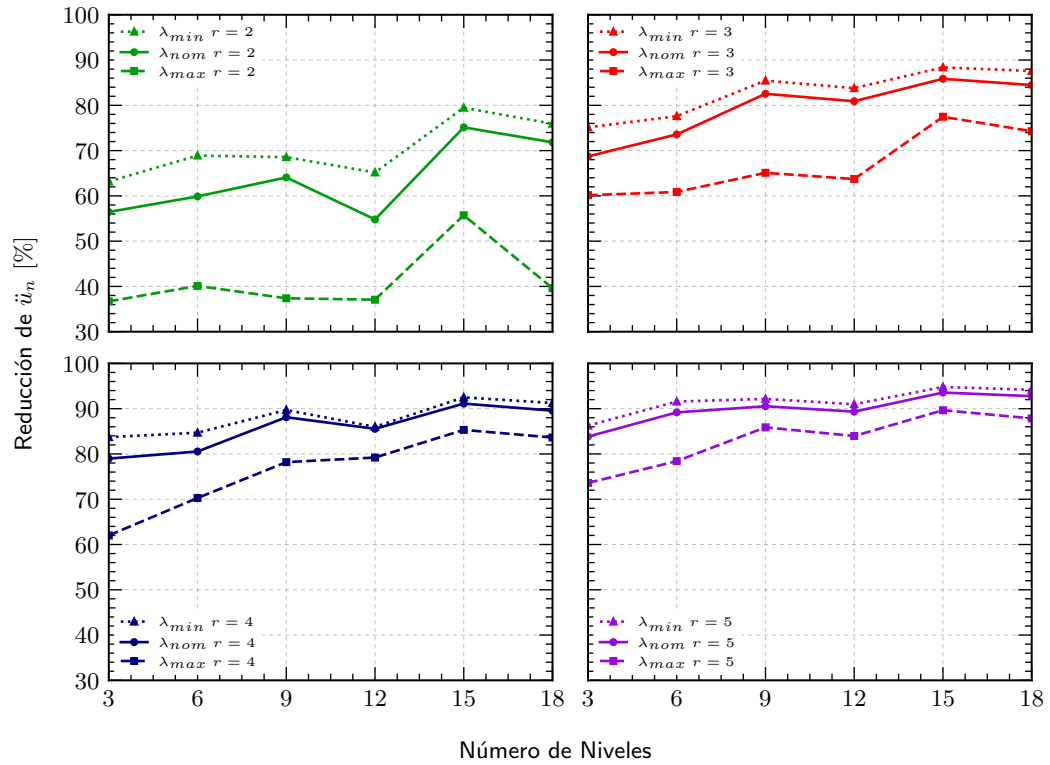


FIGURA N° 3.16: Reducción de la aceleración \ddot{u}_n - λ_{min} , λ_{nom} y λ_{max} .

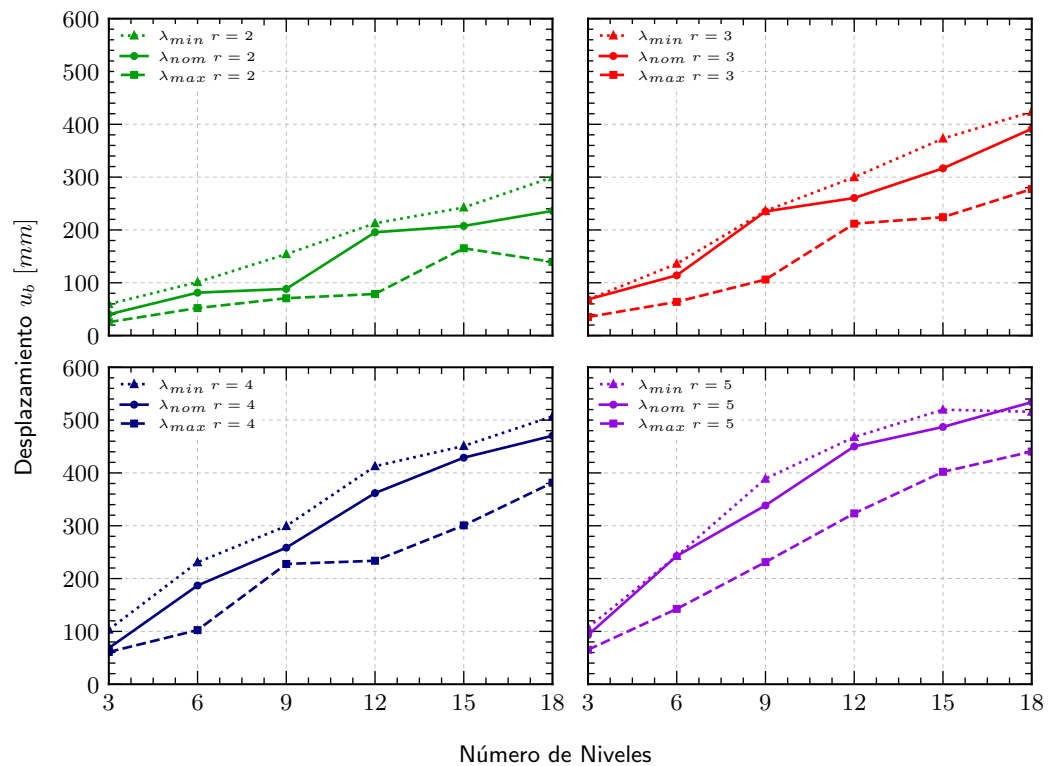


FIGURA N° 3.17: Desplazamiento u_b - λ_{min} , λ_{nom} y λ_{max} .

En las Figuras N° 3.14, N° 3.15 y N° 3.16 se puede apreciar que para razones de aislamiento de 2 y 3, la reducción de las respuestas sísmicas para las propiedades nominales, mínimas y máximas presenta una alta dispersión. Sin embargo, para razones de aislamiento de 4 y 5 los niveles de reducción son muy similares tanto para propiedades nominales, así como para las propiedades mínimas y máximas. Por otro lado, se puede apreciar que la tendencia general (tal como era de esperarse) muestra que las propiedades máximas producen los menores niveles de reducción, mientras que por el contrario las propiedades mínimas son las que generan las mayores reducciones de las respuestas sísmicas.

La Figura N° 3.17 muestra los desplazamientos máximos de la interfaz de aislamiento para las propiedades nominales, mínimas y máximas. En dicha figura se puede apreciar que la marcada diferencia entre los resultados obtenidos usando las propiedades nominales y las propiedades máximas, se mantiene incluso para razones de aislamiento altas ($r = 4$ y $r = 5$).

3.5.3 Consideraciones Relativas al Amortiguamiento de la Superestructura

De acuerdo con Chopra (2016) las fracciones de amortiguamiento en las edificaciones dependen de los niveles de esfuerzos y deformaciones alcanzados (a mayor deformación el amortiguamiento es mayor) así como también de los materiales estructurales usados.

TABLA N° 3.23: Valores de amortiguamiento recomendados. Fuente: Newmark y Hall (1982)

Nivel de esfuerzo	Tipo y condición de la estructura	β [%]
Esfuerzo de trabajo menor de aproximadamente la mitad del punto de cedencia	Acero con conexiones soldadas, concreto presforzado, concreto debidamente reforzado (sólo agrietamiento leve)	2-3
	Concreto reforzado con grietas considerables	3-5
	Acero con conexiones atornilladas o remachadas, estructuras de madera con uniones clavadas o atornilladas	5-7
En el punto de cedencia o justo debajo de éste	Acero con conexiones soldadas, concreto presforzado (sin pérdida completa en el presfuerzo)	5-7
	Concreto presforzado con pérdida total del presfuerzo	7-10
	Concreto reforzado	7-10
	Acero con conexiones atornilladas o remachadas, estructuras de madera con uniones atornilladas	10-15
	Estructuras de madera con uniones clavadas	15-20

La Tabla N° 3.23 elaborada por Newmark y Hall (1982) muestra los valores recomendados para las fracciones de amortiguamiento en edificaciones de acuerdo al nivel de esfuerzo y al tipo y condición de la estructura. Las normas de diseño de edificaciones indican que se debe usar un porcentaje de amortiguamiento de 5%; sin embargo, dado que que las edificaciones aisladas experimentan deformaciones considerablemente menores que una edificación en base fija, se puede pensar en usar otro valor para el porcentaje de amortiguamiento. La Tabla N° 3.23 muestra que la superestructura de una edificación aislada podría ser clasificada como una estructura de concreto debidamente reforzada que presenta sólo agrietamiento leve, es decir, le correspondería una fracción de amortiguamiento de 2%.

En esta subsección se estudiará la influencia que tiene el amortiguamiento de la superestructura en las respuestas sísmicas de una edificación aislada. Para lograr este objetivo, se obtendrán las respuestas sísmicas de dos grupos de edificaciones aisladas idénticas, con la única diferencia que las edificaciones del primer grupo consideran $\beta = 2\%$ mientras que las del segundo grupo usan $\beta = 5\%$.

Las Tablas N° 3.24, N° 3.25, N° 3.26 y N° 3.27 muestran las respuestas sísmicas y las reducciones para edificaciones aisladas suponiendo $\beta = 2\%$.

TABLA N° 3.24: Fuerza cortante V_b/P_{tot} y la reducción de V_b para $\beta = 2\%$

N° de niveles	Fuerza cortante V_b/P_{tot} [%]				Reducción de V_b [%]			
	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	50.45	37.02	22.99	17.23	66.91	75.72	84.92	88.70
6	25.68	15.67	14.05	10.51	74.69	84.56	86.15	89.64
9	14.39	12.18	8.02	6.83	79.95	83.03	88.83	90.48
12	13.89	7.84	6.34	4.92	72.79	84.65	87.59	90.36
15	9.89	6.37	4.79	3.48	73.78	83.12	87.31	90.77
18	7.66	5.32	3.61	2.65	74.52	82.31	88.01	91.20

TABLA N° 3.25: Desplazamiento relativo u_n y la reducción de u_n para $\beta = 2\%$

N° de niveles	Desplazamiento u_n [mm]				Reducción de u_n [%]			
	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	17.73	17.42	11.79	8.68	63.89	64.53	75.99	82.31
6	43.56	31.50	23.05	14.29	66.35	75.67	82.20	88.96
9	54.59	34.13	24.07	19.55	71.83	82.38	87.58	89.91
12	92.30	42.30	33.80	24.60	63.19	83.13	86.52	90.19
15	86.93	77.23	50.56	33.44	72.69	75.74	84.12	89.49
18	118.35	71.36	50.99	33.76	68.59	81.06	86.47	91.04

TABLA N° 3.26: Aceleración absoluta \ddot{u}_n y la reducción de \ddot{u}_n para $\beta = 2\%$

N° de niveles	Aceleración absoluta \ddot{u}_n [g]				Reducción de \ddot{u}_n [%]			
	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	0.96	0.83	0.65	0.41	57.54	63.46	71.46	81.94
6	0.92	0.59	0.48	0.20	45.76	65.23	71.43	88.00
9	0.61	0.30	0.18	0.15	53.21	77.42	86.01	88.31
12	0.56	0.24	0.18	0.13	42.73	75.35	81.65	86.56
15	0.42	0.24	0.14	0.11	62.84	78.70	87.45	90.45
18	0.28	0.15	0.11	0.08	64.76	81.00	86.60	89.40

TABLA N° 3.27: Desplazamiento de la interfaz de aislamiento u_b para $\beta = 2\%$

N° de niveles	Desplazamiento u_b [mm]			
	$r = 2$	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$
3	41.0	71.4	70.3	93.6
6	84.3	109.4	188.2	244.4
9	92.0	233.5	260.4	338.3
12	191.5	258.1	358.0	449.7
15	224.1	311.4	426.5	482.5
18	244.5	395.0	470.8	537.5

Las reducciones en las respuestas sísmicas mostradas en las tablas anteriores se obtuvieron usando la ecuación 3.35, estas reducciones se presentan de manera gráfica en las Figuras N° 3.18, N° 3.19 y N° 3.20. Asimismo, la Figura N° 3.21 muestra los desplazamientos de la interfaz de aislamiento de edificaciones aisladas con $\beta = 2\%$ y $\beta = 5\%$.

En las Figuras N° 3.18 y N° 3.21 se puede apreciar que tanto la fuerza cortante basal normalizada así como el desplazamiento de la interfaz de aislamiento son respuestas sísmicas que permanecen prácticamente inalteradas por la variación del amortiguamiento de la superestructura. Por otro lado, la Figura N° 3.19 muestra que la reducción del desplazamiento relativo del último nivel varía muy poco para los dos niveles de amortiguamiento usados en la superestructura, siendo la mayor diferencia entre ambas reducciones de aproximadamente un 6%, el cual se produce tanto cuando la razón de aislamiento así como el número de niveles tienen valores bajos. Por último, la Figura N° 3.20 evidencia que la reducción de la aceleración absoluta del último nivel se ve afectada por la variación del amortiguamiento de la superestructura, donde la diferencia entre las reducciones presenta un valor máximo alrededor de 15% y se produce para estructuras con $r = 2$.

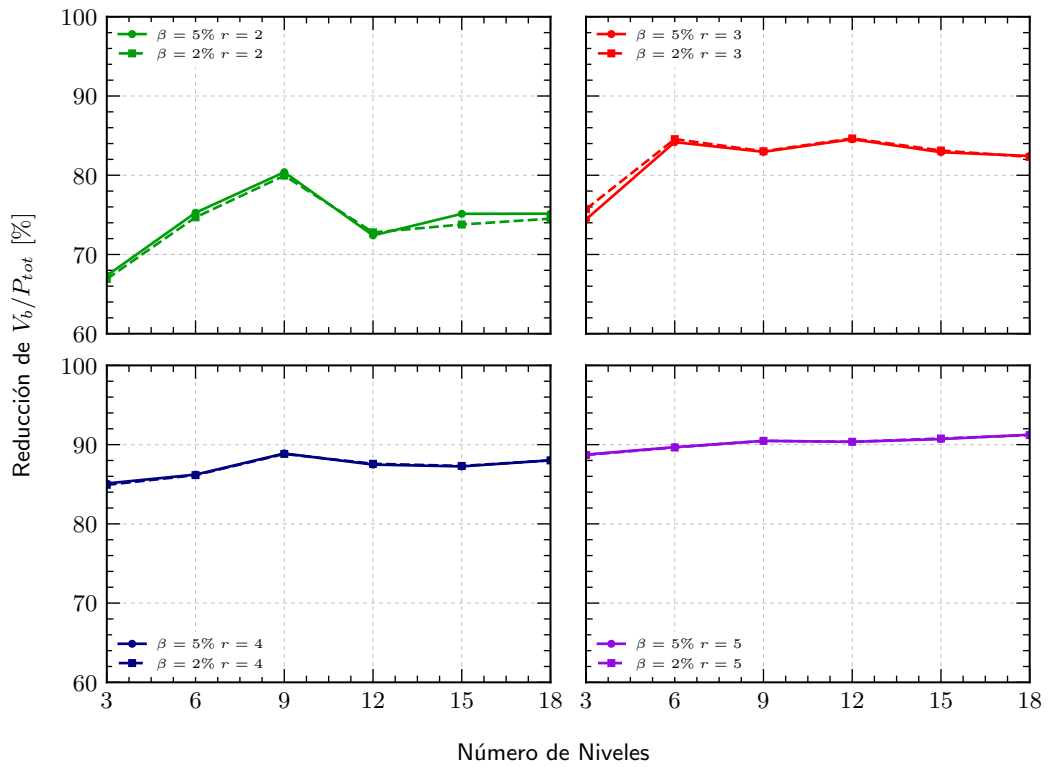


FIGURA N° 3.18: Reducción de la cortante basal - $\beta = 2\%$ y $\beta = 5\%$.

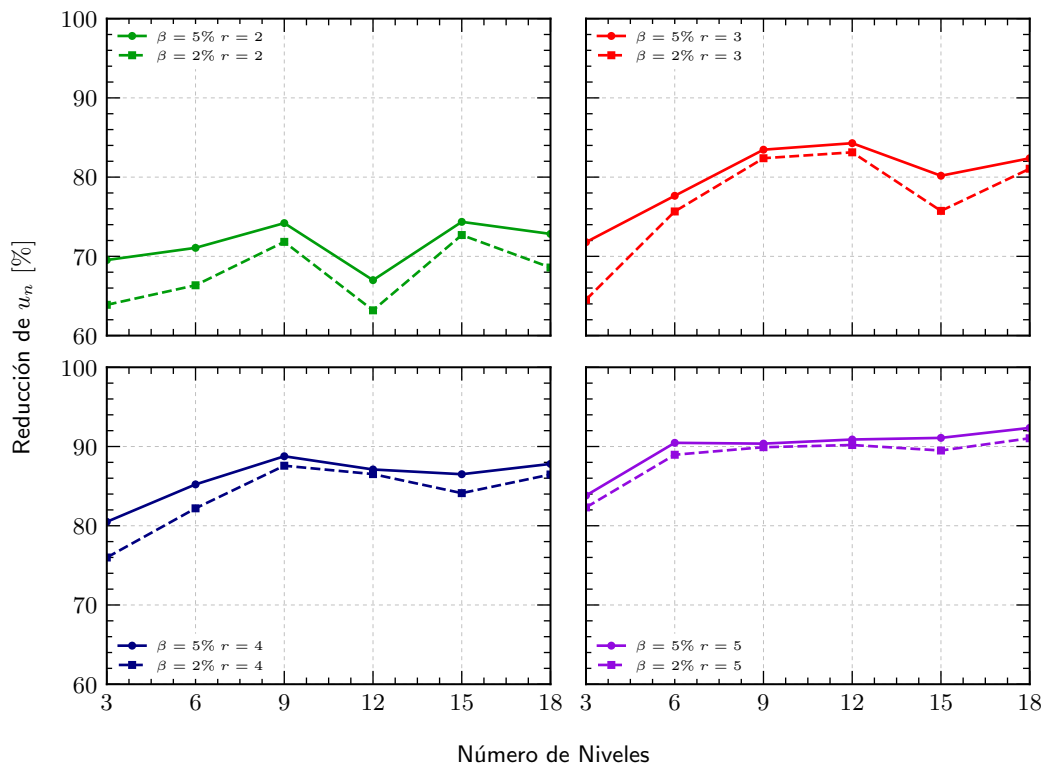


FIGURA N° 3.19: Reducción del desplazamiento u_n - $\beta = 2\%$ y $\beta = 5\%$.

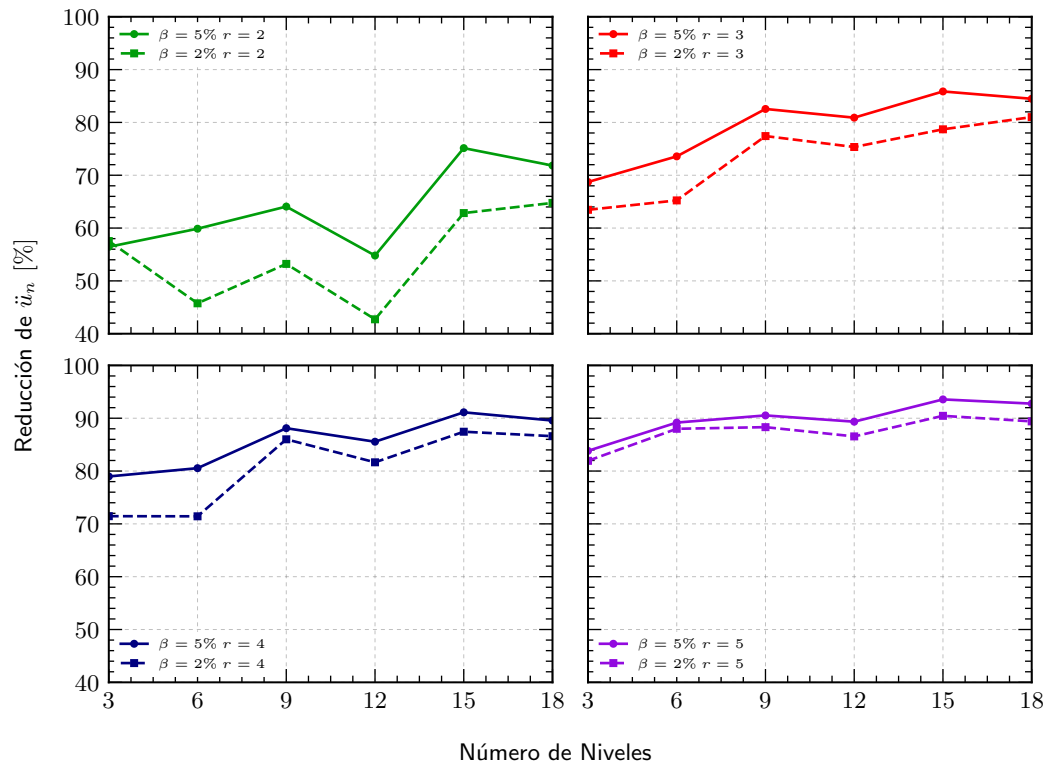


FIGURA N° 3.20: Reducción de la aceleración \ddot{u}_n - $\beta = 2\%$ y $\beta = 5\%$.

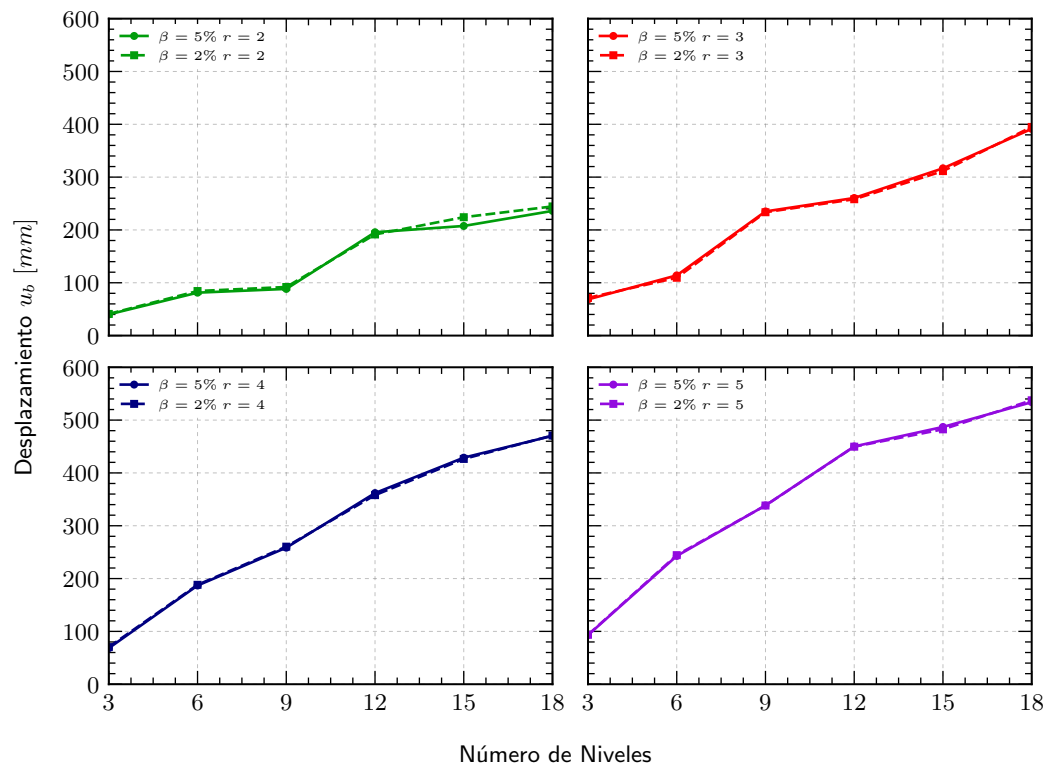


FIGURA N° 3.21: Desplazamiento u_b - $\beta = 2\%$ y $\beta = 5\%$.

3.6 COMENTARIOS FINALES

En este capítulo se estudiaron modelos simplificados bidimensionales de edificaciones aisladas con diferente número de niveles y con cuatro razones de aislamiento distintas. Con base en los resultados obtenidos se puede afirmar lo siguiente.

- El uso de aisladores sísmicos permite reducir de manera significativa las respuestas sísmicas de una edificación.
- La reducción de las respuestas sísmicas se incrementa conforme la razón de aislamiento crece. Sin embargo, desde un enfoque práctico no es viable usar una razón de aislamiento alta en edificaciones de muchos niveles.
- En líneas generales, las reducciones obtenidas por las propiedades mínimas (λ_{min}) son mayores a las obtenidas con propiedades nominales (λ_{nom}), las cuales a su vez son mayores a las obtenidas con las propiedades máximas (λ_{max}). Sin embargo, es preciso indicar que estas diferencias en las reducciones disminuyen conforme se usa una razón de aislamiento mayor.
- Las respuestas sísmicas de una edificación aislada prácticamente se ven inalteradas si se cambia el porcentaje de amortiguamiento crítico que se usa para modelar la superestructura.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS SÍSMICO DE EDIFICACIONES CON DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO

En este capítulo se estudiarán modelos simplificados de edificaciones que incorporen disipadores de fluidos viscoso (DFV). Se usará un modelo de masas concentradas con n *GDL* con comportamiento lineal y elástico, donde las masas contiguas están conectadas por elementos de tipo *link* que tienen el comportamiento histérico característico de los disipadores de fluido viscoso (mostrado en el apartado 2.2.3). El objetivo de este capítulo es observar la incidencia en la respuesta sísmica que tienen variables como el factor de amplificación de los desplazamientos relativos en los DFV y el factor de reducción objetivo, así como también mostrar las reducciones en las fuerzas cortantes basales, las aceleraciones y los desplazamientos para edificaciones de diferentes niveles que incorporen DFV.

4.1 ECUACIONES DE EQUILIBRIO

La Figura N° 4.1 representa a una edificación con disipadores de fluido viscoso sujeta a una aceleración horizontal del suelo dada por \ddot{u}_g . La estructura tiene n *GDL* dinámicos, que representan el desplazamiento de los n niveles respecto del suelo, los cuales se recogen en el vector $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)]^T$. La fuerza de entrepiso producida por los disipadores de fluido viscoso viene dada por F_i y es capaz de incursionar en el rango no lineal.

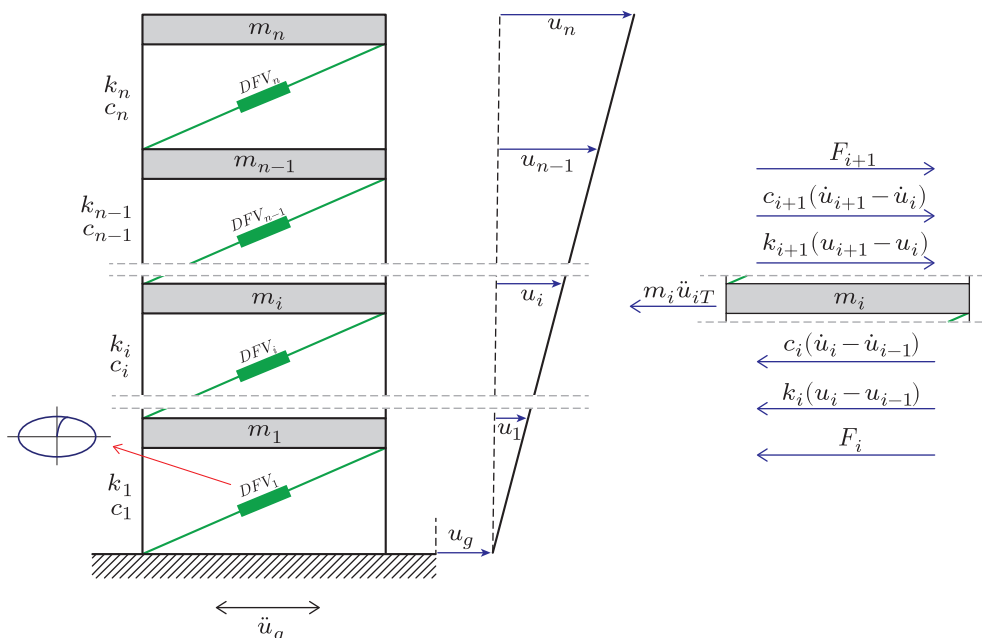


FIGURA N° 4.1: Edificación con disipadores de fluido viscoso.

En la figura anterior se observa que:

$$u_{iT} = u_g + u_i \quad \rightarrow \quad \ddot{u}_{iT} = \ddot{u}_g + \ddot{u}_i \quad (4.1)$$

Además, del diagrama de cuerpo libre de la i ésima masa de la Figura N° 4.1 se tiene:

$$0 = m_i \ddot{u}_{iT} + c_i (\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}) + k_i (u_i - u_{i-1}) + F_i - c_{i+1} (\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i) - k_{i+1} (u_{i+1} - u_i) - F_{i+1} \quad (4.2)$$

El valor de F_i en la ecuación 4.2 viene dado por:

$$F_i = f_{A i} F_{D i} \quad (4.3)$$

Donde f_A es el factor de amplificación y $F_{D i}$ es la fuerza axial del DFV.

$$f_{A i} = \frac{u_{D i}}{u_i} \quad (4.4)$$

$$F_{D i} = f_{A i}^{\alpha_i} C_i \operatorname{sgn}(\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}) |\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}|^{\alpha_i} \quad (4.5)$$

Reemplazando la ecuación 4.5 en 4.3 se tiene:

$$F_i = f_{A i}^{1+\alpha_i} C_i \operatorname{sgn}(\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}) |\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}|^{\alpha_i} \quad (4.6)$$

Por otro lado, reemplazando la ecuación 4.1 en 4.2, reordenando y simplificando se puede llegar a una expresión matricial de la forma:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) + \mathbf{F}(t) = -\mathbf{M}\boldsymbol{\tau}\ddot{u}_g(t) \quad (4.7)$$

Donde \mathbf{M} es la matriz de masa de la estructura y se obtiene de la ecuación 2.25, \mathbf{C} es la matriz de amortiguamiento expresada por la ecuación 2.28, \mathbf{K} es la matriz de rigidez producto de la ecuación 2.26, $\boldsymbol{\tau} = [1, 1, \dots, 1]^T$ es un vector de $n \times 1$ y \mathbf{F} es un vector que recoge las diferencias de las fuerzas producidas por los DFV.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_1 - F_2 \\ \vdots \\ F_i - F_{i+1} \\ \vdots \\ F_{n-1} - F_n \\ F_n \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

4.2 ALGORITMO DE INTEGRACIÓN NUMÉRICA

4.2.1 Formulación Incremental del Método de Diferencia Central

De acuerdo con Bathe (2014) el método de diferencia central supone que:

$$\ddot{\mathbf{u}}_i \approx \frac{1}{(\Delta t)^2} (\mathbf{u}_{i-1} - 2\mathbf{u}_i + \mathbf{u}_{i+1}) \quad (4.9)$$

Siendo el error de truncamiento en la expresión 4.9 del orden de $(\Delta t)^2$. Para tener un error similar en la expansión de la velocidad, se puede usar:

$$\dot{\mathbf{u}}_i \approx \frac{1}{2\Delta t} (\mathbf{u}_{i+1} - \mathbf{u}_{i-1}) \quad (4.10)$$

El desplazamiento en el tiempo $\Delta t + t$ se obtiene al sustituir las relaciones para $\ddot{\mathbf{u}}_i$ y $\dot{\mathbf{u}}_i$, dadas en las ecuaciones 4.9 y 4.10, dentro de la ecuación 4.7.

$$\mathbf{u}_{i+1} (a_0 \mathbf{M} + a_1 \mathbf{C}) = -\mathbf{M} \tau \ddot{\mathbf{u}}_{g_i} - \mathbf{F}_i - (\mathbf{K} - a_2 \mathbf{M}) \mathbf{u}_i - (a_0 \mathbf{M} - a_1 \mathbf{C}) \mathbf{u}_{i-1} \quad (4.11)$$

Siendo:

$$a_0 = \frac{1}{(\Delta t)^2}; \quad a_1 = \frac{1}{2\Delta t}; \quad a_2 = 2a_0; \quad a_3 = \frac{1}{a_2} \quad (4.12)$$

Despejando \mathbf{u}_{i+1} de la ecuación 4.11 se obtiene:

$$\mathbf{u}_{i+1} = [\hat{\mathbf{M}}]^{-1} [-\mathbf{M} \tau \ddot{\mathbf{u}}_{g_i} - \mathbf{F}_i - (\mathbf{K} - a_2 \mathbf{M}) \mathbf{u}_i - (a_0 \mathbf{M} - a_1 \mathbf{C}) \mathbf{u}_{i-1}] \quad (4.13)$$

En la ecuación 4.13, $\hat{\mathbf{M}} = a_0 \mathbf{M} + a_1 \mathbf{C}$ es una matriz constante de orden $n \times n$.

Observando la ecuación 4.13 se puede notar que para calcular el valor de \mathbf{u}_{i+1} se necesita conocer los valores de \mathbf{u}_i y \mathbf{u}_{i-1} . Por lo tanto, para calcular el valor de \mathbf{u}_1 se debe usar un procedimiento de inicio especial. Se sabe que los valores de \mathbf{u}_0 , $\dot{\mathbf{u}}_0$ y $\ddot{\mathbf{u}}_0$ son conocidos (condiciones iniciales), entonces, usando las ecuaciones 4.9 y 4.10 se tiene:

$$\mathbf{u}_{-1} = \mathbf{u}_0 - \Delta t \cdot \dot{\mathbf{u}}_0 + a_3 \cdot \ddot{\mathbf{u}}_0 \quad (4.14)$$

Una importante consideración a tener en cuenta es que el método de diferencia central requiere que el intervalo Δt sea menor que el valor crítico Δt_{cr} .

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \frac{T_n}{\pi} \quad (4.15)$$

Donde T_n es el periodo más pequeño de la estructura con n grados de libertad.

4.2.2 Algoritmo de Solución para Edificaciones con Disipadores de Fluido Viscoso

A continuación se describe el algoritmo numérico seguido para calcular la respuesta sísmica de una edificación que incorpora DFV.

1. Definir los parámetros dinámicos de la estructura, como son el número de niveles, el periodo fundamental y el porcentaje de amortiguamiento crítico.

$$n, T, \beta$$

2. Definir los parámetros del modelo histerético de los DFV de cada nivel, tales como la constante de amortiguamiento y el exponente de amortiguamiento.

$$C_i, \alpha_i \quad \forall i \in [1; n]$$

3. Definir el registro sísmico que se usará.

$$\ddot{\mathbf{u}}_g; N = \text{len}(\ddot{\mathbf{u}}_g)$$

4. Asignar los valores iniciales del sistema.

$$\mathbf{u}_0 = \dot{\mathbf{u}}_0 = \ddot{\mathbf{u}}_0 = \mathbf{0}; \quad \mathbf{F}_0 = \mathbf{0}$$

5. Asignar la condición inicial para calcular el primer valor del desplazamiento.

$$\mathbf{u}_{-1} = \mathbf{u}_0 - \Delta t \cdot \dot{\mathbf{u}}_0 + a_3 \cdot \ddot{\mathbf{u}}_0$$

6. Formar la matriz de masa efectiva.

$$\hat{\mathbf{M}} = a_0 \mathbf{M} + a_1 \mathbf{C}$$

Para $i \in [1; N]$ se realizarán los pasos del 7 al 9.

7. Calcular el desplazamiento para el tiempo $\Delta t + t$ (ecuación 4.13).

$$\mathbf{u}_{i+1} = [\hat{\mathbf{M}}]^{-1} [-\mathbf{M}\tau\ddot{\mathbf{u}}_g - \mathbf{F}_i - (\mathbf{K} - a_2\mathbf{M})\mathbf{u}_i - (a_0\mathbf{M} - a_1\mathbf{C})\mathbf{u}_{i-1}]$$

8. Calcular la velocidad y aceleración para el tiempo t (ecuaciones 4.9 y 4.10).

$$\ddot{\mathbf{u}}_i \approx \frac{1}{(\Delta t)^2} (\mathbf{u}_{i-1} - 2\mathbf{u}_i + \mathbf{u}_{i+1})$$

$$\dot{\mathbf{u}}_i \approx \frac{1}{2\Delta t} (\mathbf{u}_{i+1} - \mathbf{u}_{i-1})$$

9. Actualizar el vector F_i que reúne las fuerzas de los DFV (ecuación 4.8).
10. Determinar los valores máximos de interés y almacenarlos.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo del algoritmo usado en esta tesis para calcular la respuesta sísmica de una edificación con disipadores de fluido viscoso.

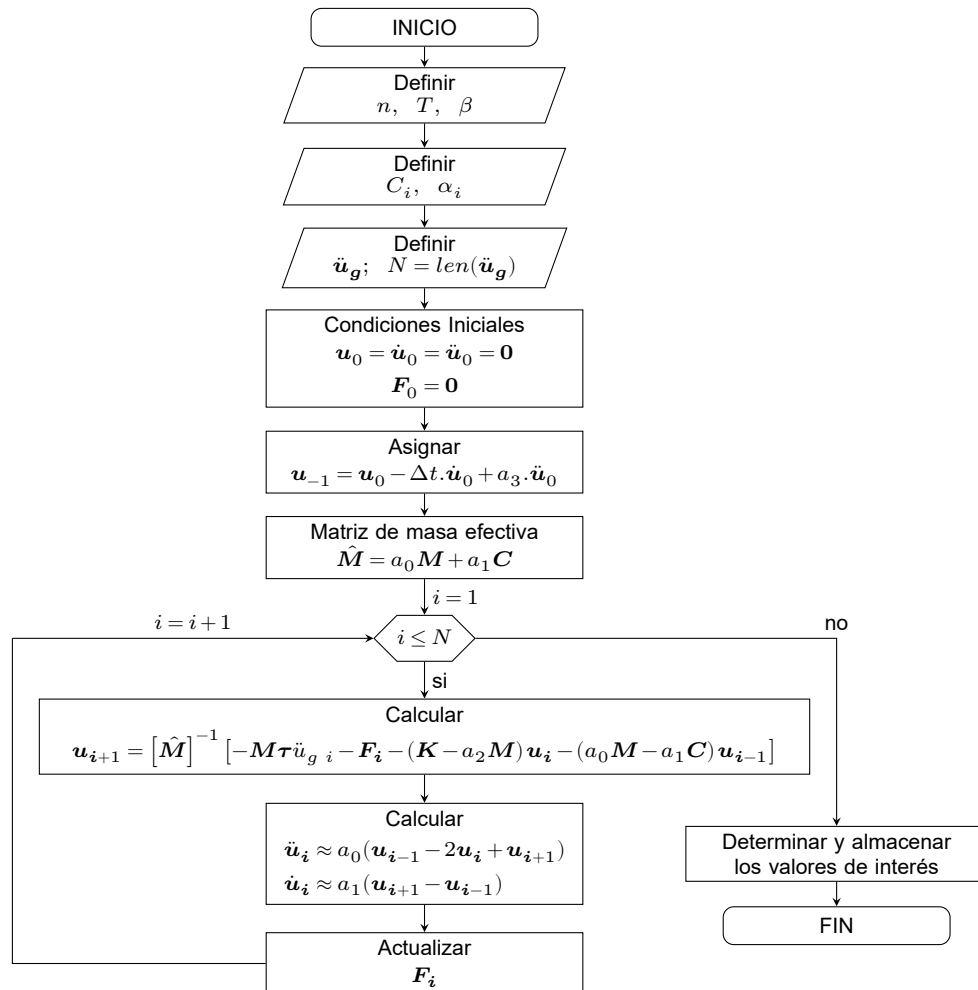


FIGURA N° 4.2: Algoritmo de solución para edificaciones con DFV.

4.3 PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS

A continuación se describe el procedimiento de cinco pasos planteado por Silvestri et al. (2010) para realizar el predimensionamiento de los disipadores de fluido viscoso instalados en una edificación. Es preciso indicar que este procedimiento fue planteado considerando que los DFV se instalan en todos los niveles y que presentan un comportamiento histerético similar al mostrado en el apartado 2.2.3.

- Asignar el valor del periodo fundamental de la edificación, el porcentaje de

amortiguamiento crítico y el número de niveles.

$$T_1; \beta; n \quad (4.16)$$

- Definir el valor del factor de amplificación ($f_{A i}$) de los DFV.
- Seguir los cinco pasos planteados por Silvestri et al. (2010).

– *Paso 1: Identificación del amortiguamiento objetivo de la estructura.*

En las edificaciones que incorporan DFV existe una correlación entre el porcentaje de amortiguamiento crítico β' y el correspondiente factor de reducción $\eta(\beta')$ en la respuesta sísmica. Siendo $\eta(\beta')$ la razón esperada entre la respuesta sísmica de un sistema caracterizado por un porcentaje de amortiguamiento crítico de β' y la respuesta sísmica esperada para un sistema con $\beta' = 5\%$. Por ejemplo, con referencia al desplazamiento:

$$\eta_\delta(\beta') = \frac{\delta_{max}(\beta')}{\delta_{max}(\beta' = 5\%)} \quad (4.17)$$

Donde $\delta_{max}(\beta')$ y $\delta_{max}(\beta' = 5\%)$ indican el máximo desplazamiento de edificaciones caracterizados por porcentajes de amortiguamiento iguales a β' y $\beta' = 5\%$ respectivamente. Por otro lado, con relación a la aceleración absoluta se tiene:

$$\eta_a(\beta') = \frac{a_{max}(\beta')}{a_{max}(\beta' = 5\%)} \quad (4.18)$$

Donde $a_{max}(\beta')$ y $a_{max}(\beta' = 5\%)$ indican la máxima aceleración absoluta de edificaciones caracterizados por porcentajes de amortiguamiento iguales a β' y $\beta' = 5\%$ respectivamente.

La Figura N° 4.3 muestra gráficos que relacionan el porcentaje de amortiguamiento crítico β' y los factores de reducción $\eta(\beta')$ tanto para el desplazamiento así como también para la aceleración absoluta.

– *Paso 2: Identificación de las características preliminares de los disipadores de fluido viscoso (disipadores lineales).*

Las características mecánicas de los disipadores de fluido viscoso que se usarán con fines de diseño preliminar son definidas con referencia a un modelo constitutivo lineal ($\alpha = 1.0$). Considerando que el amortiguamiento es proporcional a la matriz de masa y rigidez y además asumiendo que este se distribuye de manera uniforme en todos los niveles, se

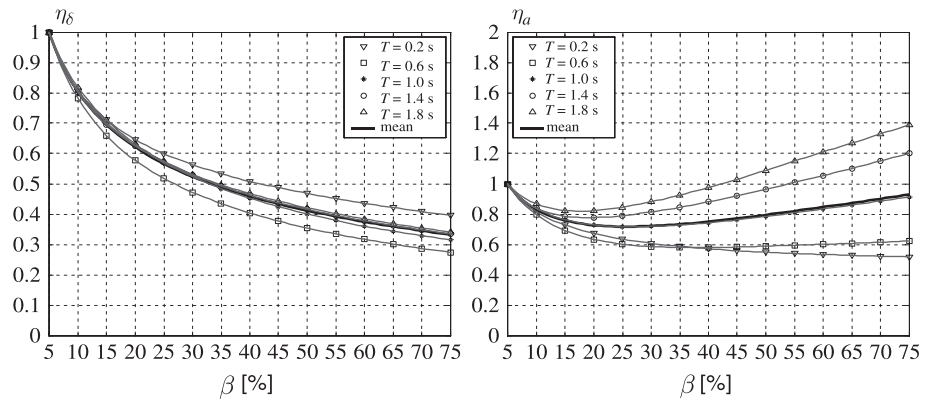


FIGURA N° 4.3: η_δ y η_α como función de β' . Fuente: Silvestri et al. (2010)

puede calcular la constante de amortiguamiento de entrepiso como:

$$C_{Nivel} = \beta' \cdot \omega_1 \cdot m_{tot} \cdot (n + 1) \quad (4.19)$$

Donde β' es el porcentaje de amortiguamiento crítico (Figura N° 4.3), ω_1 es la frecuencia angular correspondiente al periodo fundamental, m_{tot} es la masa total de la edificación y n es el número de niveles. Con los resultados de la ecuación 4.19 y considerando el factor de amplificación correspondiente a la forma de instalación de los disipadores, se puede calcular la constante de amortiguamiento de los dispositivos en cada entrepiso.

$$C_{Nivel, Inclinado} = \frac{C_{Nivel}}{f_{A i}^2} \quad (4.20)$$

– Paso 3: Análisis tiempo historia preliminar.

Con las características lineales tentativas se puede realizar un análisis tiempo historia preliminar. Este análisis preliminar es llevado a cabo para “calibrar” los coeficientes de amortiguamiento de los disipadores lineales, hasta que se obtengan los niveles de reducción deseados. Además, se deben estimar las velocidades relativas máximas que desarrollan los disipadores lineales (Δv_{max}).

– Paso 4: Identificación de las características “equivalentes” de los disipadores viscosos no lineales.

Las características de los disipadores no lineales que son equivalentes a los disipadores lineales, en términos de proveer la mismas respuestas sísmicas ante el mismo sismo de entrada, se pueden calcular usando la siguiente expresión:

$$C_{NL i} = C_L (\chi_i \cdot \Delta v_{max i})^{1-\alpha_i} \quad (4.21)$$

Donde $C_{NL\ i}$ es la constante de amortiguamiento no lineal del i -ésimo entrepiso, $C_{L\ i}$ es la constante de amortiguamiento lineal de entrepiso (Paso 2), χ_i es un parámetro que depende de la variable α : los resultados indican que χ permanece prácticamente constante alrededor del valor de 0.8. ($0.790 < \chi < 0.821$) para un amplio rango del parámetro α ($0.10 < \alpha < 0.90$), $\Delta v_{max\ i}$ es la velocidad relativa máxima del i -ésimo entrepiso que incorpora disipadores lineales (Paso 3) y finalmente α_i es el exponente de amortiguamiento del i -ésimo entrepiso.

– *Paso 5: Análisis tiempo historia final.*

Se realizará un análisis tiempo historia final con el objetivo de verificar que el sistema presente un comportamiento similar tanto para las propiedades lineales como para las propiedades no lineales. Por otro lado, este análisis también permitirá obtener los valores finales para las acciones en los elementos estructurales.

4.4 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS

En esta sección se presenta a modo de ejemplo el predimensionamiento, el análisis y los resultados obtenidos para un modelo bidimensional de una edificación de tres niveles que incorpora disipadores de fluido viscoso con comportamiento no lineal. Se empleará la componente NS del registro sísmico de Lima de 1966, mostrado en la Figura N° 2.14, como aceleración en la base.

4.4.1 Predimensionamiento

Para realizar el predimensionamiento de la edificación en cuestión se hicieron algunas suposiciones. Por ejemplo, se consideró que los pesos de todos los niveles son iguales. Por otro lado, también se asumió que todos los modos de vibración de la estructura poseen un factor de amortiguamiento constante. Asimismo, se calculó el período de la edificación usando la ecuación 2.20, para $f = 0.1$. Por último, se supuso que los exponentes de amortiguamiento tienen el mismo valor para todos los disipadores. A continuación, se muestran los cálculos realizados en el proceso de predimensionamiento.

- Datos iniciales.

$$T_1 = 0.3\text{ s}; \quad \beta = 5\%; \quad n = 3$$

- Factor de amplificación de los DFV.

$$f_{A\ i} = \cos(\arctan(0.5)) = 0.89$$

Nota: Se consideró que los disipadores se encuentran en disposición diagonal (por ser la disposición más común) formando un ángulo $\varphi = \arctan(0.5)$ con la horizontal.

- Cinco pasos planteados por Silvestri et al. (2010).
 - Paso 1: Identificación del Amortiguamiento Objetivo de la Estructura.

$$\eta_{\delta} = 0.5 \quad \rightarrow \quad \beta' \cong 33\%$$

Nota: Se usó la Figura N° 4.3 para obtener el valor de β' .

- Paso 2: Identificación de las Características Preliminares de los Disipadores de Fluido Viscoso (Disipadores Lineales).

La constante de amortiguamiento lineal de entrepiso se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 20.94 \text{ rad/s}; \quad m_{tot} = 3m \\ C_{Nivel}^{**} &= \beta' \cdot \omega_1 \cdot m_{tot} \cdot (n + 1) = 75 \frac{1}{s} \\ C_{Nivel, Inclinado}^{**} &= \frac{C_{Nivel}^{**}}{f_{Ai}^2} = 94 \frac{1}{s} \end{aligned}$$

Nota: Es preciso indicar que algunas propiedades fueron normalizadas respecto a la masa típica de cada nivel m . Estas propiedades normalizadas son fácilmente identificables pues tienen un superíndice en forma de dos asteriscos (**). Por ejemplo, C_{Nivel}^{**} es la constante de amortiguamiento lineal de entrepiso normalizada respecto de la masa del entrepiso, por lo tanto $C_{Nivel}^{**} = C_{Nivel}/m$.

- Paso 3: Análisis Tiempo Historia Preliminar.

Luego de realizar el análisis tiempo historia con las propiedades lineales se obtiene las siguientes velocidades relativas máximas:

$$\Delta v_{max\ 1} = 55 \text{ mm/s}; \quad \Delta v_{max\ 2} = 53 \text{ mm/s}; \quad \Delta v_{max\ 3} = 29 \text{ mm/s}$$

- Paso 4: Identificación de las Características “Equivalentes” de los Disipadores Viscosos No Lineales.

Considerando $\alpha = 0.50$ (valor usual en DFV comerciales) y $\chi = 0.80$, se pueden obtener las constantes de amortiguamiento no lineales para cada uno de los niveles de la siguiente manera:

$$C_{NL\ 1}^{**} = C_L^{**} (\chi \cdot \Delta v_{max\ 1})^{1-\alpha} = 625 \frac{mm^{0.5}}{s^{1.5}}$$

$$C_{NL\ 2}^{**} = C_L^{**} (\chi \cdot \Delta v_{max\ 2})^{1-\alpha} = 613 \frac{mm^{0.5}}{s^{1.5}}$$

$$C_{NL\ 3}^{**} = C_L^{**} (\chi \cdot \Delta v_{max\ 3})^{1-\alpha} = 453 \frac{mm^{0.5}}{s^{1.5}}$$

Sin embargo, para el análisis se usará:

$$C_{NL\ 1}^{**} = 620 \frac{mm^{0.5}}{s^{1.5}}; \quad C_{NL\ 2}^{**} = 610 \frac{mm^{0.5}}{s^{1.5}}; \quad C_{NL\ 3}^{**} = 450 \frac{mm^{0.5}}{s^{1.5}}$$

– *Paso 5: Análisis Tiempo Historia Final.*

Se realizó un análisis tiempo historia final para obtener las respuestas sísmicas de la edificación.

A continuación, se muestra la Tabla N° 4.1 con los parámetros necesarios para definir el comportamiento histerético de los disipadores de fluido viscoso de cada nivel.

TABLA N° 4.1: Parámetros de los DFV

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	
Constante de amortiguamiento no lineal normalizada	Primer nivel	$C_{NL\ 1}^{**}$	$\frac{mm^{0.5}}{s^{1.5}}$	
	Segundo nivel	$C_{NL\ 2}^{**}$		
	Tercer nivel	$C_{NL\ 3}^{**}$		
Exponente de amortiguamiento	Todos los niveles	α	0.50	-

4.4.2 Resultados

Luego de aplicar el algoritmo mostrado en la Figura N° 4.2 usando los parámetros de la Tabla N° 4.1 se obtuvieron las respuestas sísmicas de la edificación. La Figura N° 4.4a muestra las derivas máximas tanto para la edificación que incorpora DFV así como también para una edificación con las mismas propiedades pero sin DFV. Asimismo, la Figura N° 4.4b presenta las relaciones entre las derivas de cada nivel, en dicha imagen se puede apreciar que el mayor valor de $\eta_\delta = 0.43$, siendo conservador ya que el objetivo del predimensionamiento era obtener una valor de $\eta_\delta = 0.50$. Sin embargo, siguiendo el *Paso 3* del procedimiento planteado por Silvestri et al. (2010) se puede “calibrar” los coeficientes de amortiguamiento de los disipadores hasta que se obtenga el nivel de reducción deseado.

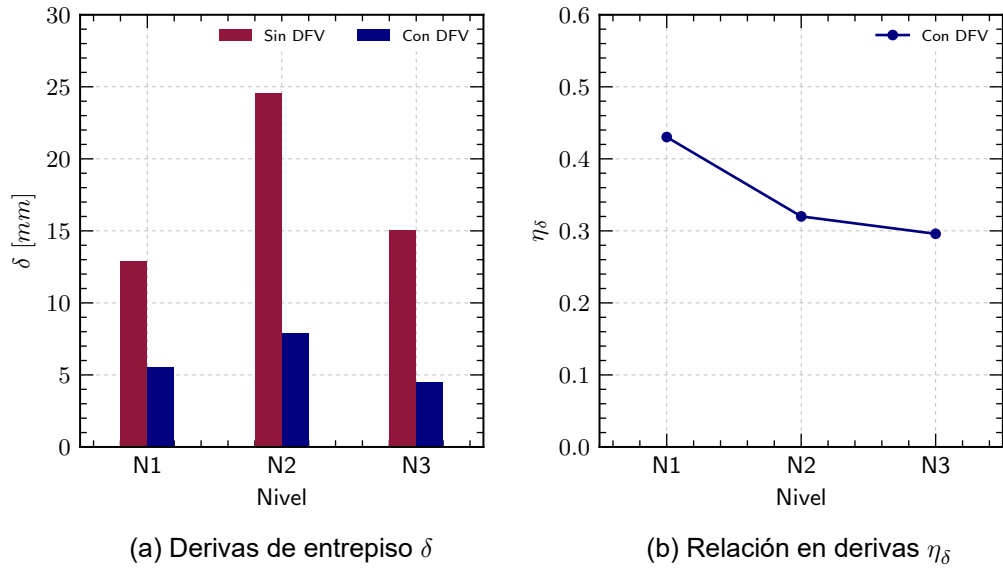


FIGURA N° 4.4: δ y η_δ en edificaciones con DFV.

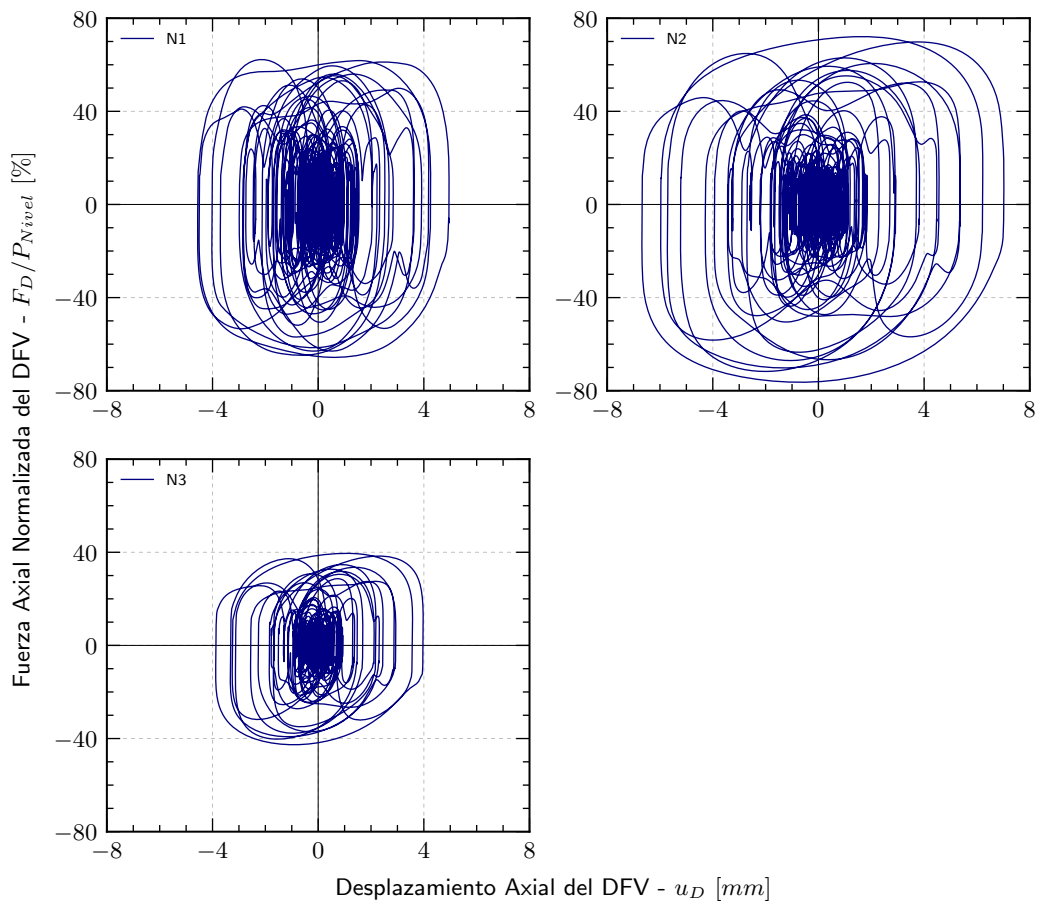


FIGURA N° 4.5: Histéresis de los DFV.

La Figura N° 4.5 presenta los diagrama de histéresis de los DFV no lineales instalados en cada uno de los tres niveles de la edificación. En dicha imagen se puede evidenciar que el disipador del segundo nivel es el que presenta la mayor fuerza y el mayor desplazamiento; además se aprecia que los disipadores del primer y tercer nivel sufren desplazamientos similares. Por otro lado, las Figuras N° 4.6, N° 4.7 y N° 4.8 presentan las respuestas sísmicas de la edificación con DFV en superposición con las respuestas de la misma edificación sin DFV, con el objetivo de evidenciar de manera visual la reducción en las respuestas sísmicas.

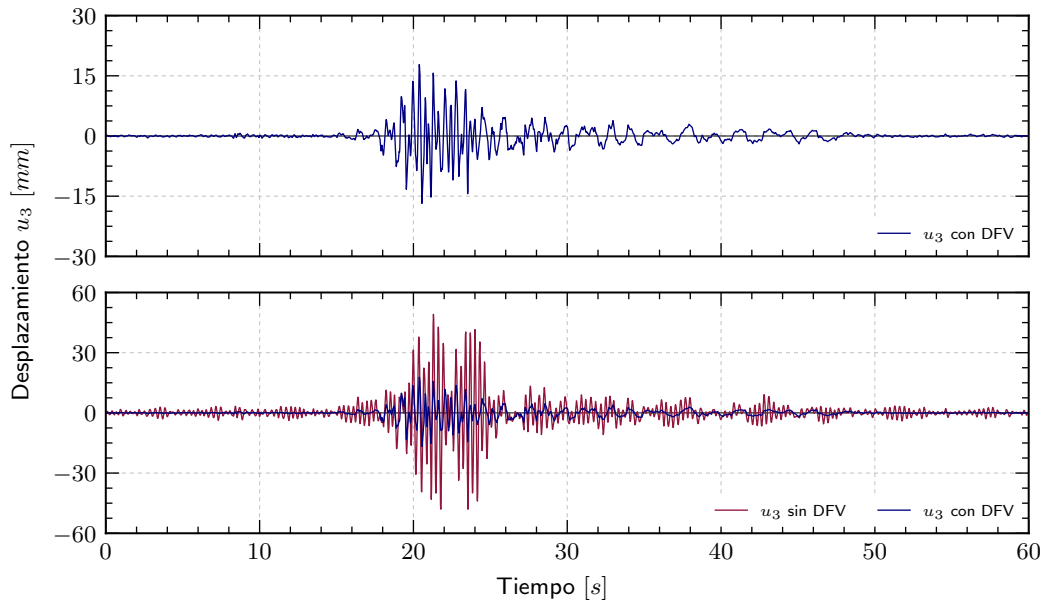


FIGURA N° 4.6: Desplazamiento del último nivel.

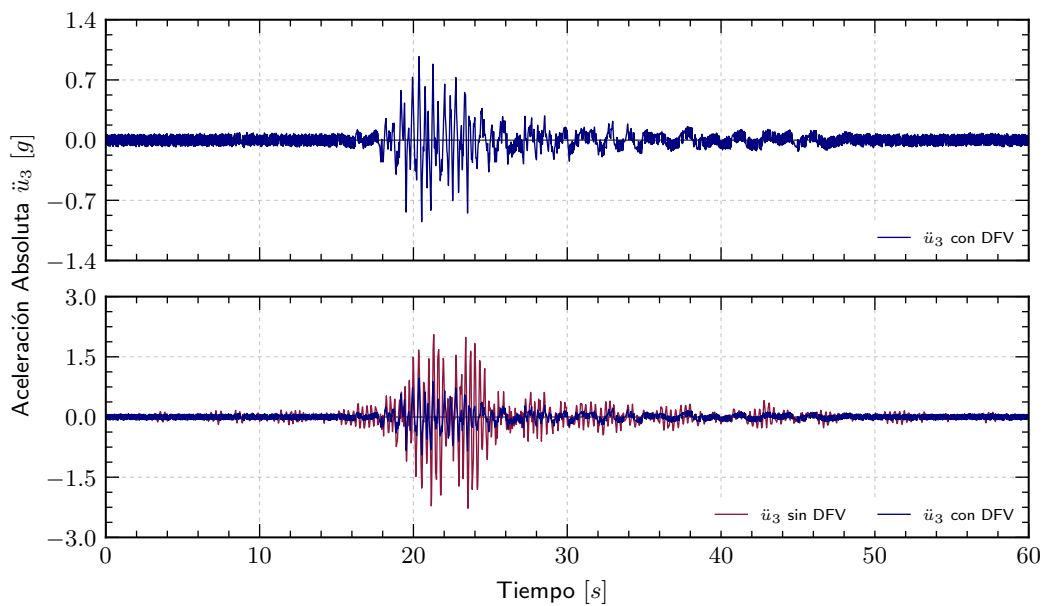


FIGURA N° 4.7: Aceleración absoluta del último nivel.

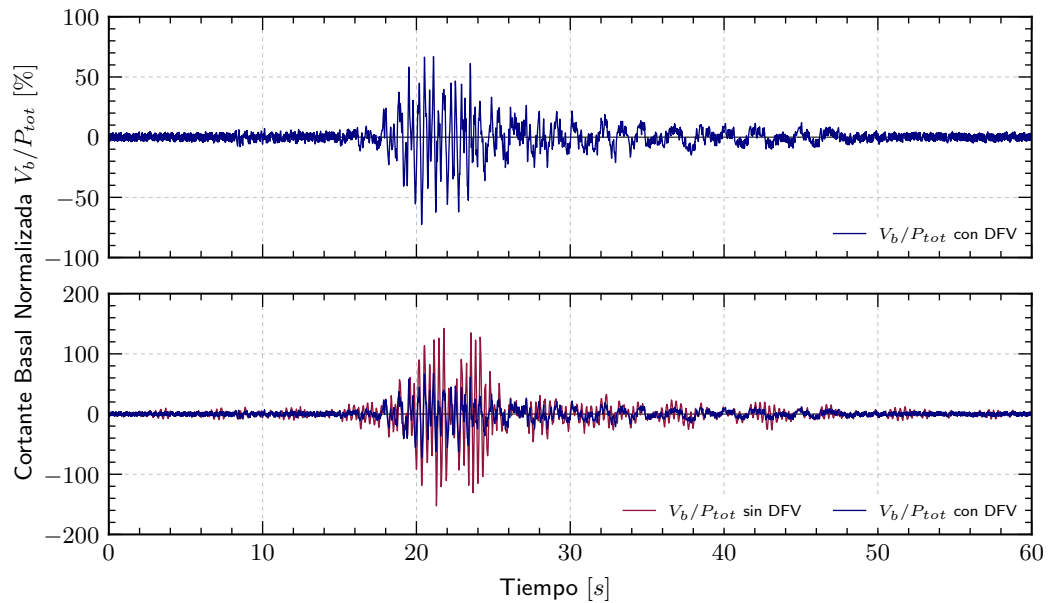


FIGURA N° 4.8: Fuerza cortante basal normalizada.

La Tabla N° 4.2 muestra los resultados máximos, en valor absoluto, obtenidos para la edificación que incorpora disipadores de fluido viscoso. De igual modo, la Tabla N° 3.3 presenta los resultados máximos de la misma edificación sin DFV. Comparando las respuestas sísmicas de ambas tablas se observa que se logró una reducción del 64 %, 57 % y del 52 % en términos del desplazamiento del último nivel, la aceleración absoluta del último nivel y de la fuerza cortante basal normalizada respectivamente, estos resultados muestran la eficacia del uso de los DFV.

TABLA N° 4.2: Resultados máximos de la edificación con DFV

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Desplazamiento del último nivel	u_3	17.82	mm
Aceleración absoluta del último nivel	\ddot{u}_3	0.97	g
Fuerza cortante basal normalizada	V_b/P_{tot}	72.90	%

4.5 RESPUESTA SÍSMICA DE MODELOS SIMPLES

En esta sección se estudiarán modelos simplificados de edificaciones con diferente número de niveles que incorporan disipadores de fluido viscoso, con el fin de conocer la eficiencia de este sistema de control pasivo en la reducción de las respuestas sísmicas. Se usará nuevamente la componente NS del sismo de Lima de 1966 como aceleración basal para todos los casos. Se compararán las respuestas sísmicas obtenidas para la edificación con DFV contra las respuestas sísmicas para la misma edificación sin DFV. La fuerza cortante basal se normalizó respecto al peso total para ambos casos.

La reducción de la respuestas sísmicas se evaluará de la siguiente manera:

$$Reducción [\%] = \left(1 - \frac{Respuesta_{Con\ DFV}}{Respuesta_{Sin\ DFV}} \right) 100\% \quad (4.22)$$

A continuación, se presentan tablas con los parámetros que definen al comportamiento histerético de los DFV para diferentes relaciones de deriva objetivo (η_δ). Dichos parámetros se obtuvieron luego de aplicar el procedimiento descrito en la sección 4.3.

TABLA N° 4.3: Parámetros de los DFV para $\eta_\delta = 0.4$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_1	s	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
$C_{NL\ G1}^{**}$	$\frac{mm^{0.5}}{s^{1.5}}$	630	760	1500	1660	1980	2850
$C_{NL\ G2}^{**}$		550	660	1340	1500	1660	2370
$C_{NL\ G3}^{**}$		470	570	1190	1260	1340	1900
α	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

TABLA N° 4.4: Parámetros de los DFV para $\eta_\delta = 0.5$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_1	s	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
$C_{NL\ G1}^{**}$	$\frac{mm^{0.5}}{s^{1.5}}$	350	470	820	870	920	1260
$C_{NL\ G2}^{**}$		320	430	760	820	850	1110
$C_{NL\ G3}^{**}$		280	380	550	600	600	950
α	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

TABLA N° 4.5: Parámetros de los DFV para $\eta_\delta = 0.6$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_1	s	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
$C_{NL\ G1}^{**}$	$\frac{mm^{0.5}}{s^{1.5}}$	220	280	470	570	630	660
$C_{NL\ G2}^{**}$		190	250	430	490	510	520
$C_{NL\ G3}^{**}$		160	220	380	380	380	410
α	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

TABLA N° 4.6: Parámetros de los DFV para $\eta_\delta = 0.7$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_1	s	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
$C_{NL\ G1}^{**}$	$\frac{mm^{0.5}}{s^{1.5}}$	135	160	250	350	400	410
$C_{NL\ G2}^{**}$		130	140	220	320	350	360
$C_{NL\ G3}^{**}$		110	130	190	280	290	300
α	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Es preciso indicar que los valores mostrados en las Tablas N° 4.3, N° 4.4, N° 4.5 y N° 4.6 se obtuvieron al considerar un factor de amplificación $f_A = 0.89$ constante en todos los niveles (correspondiente a disipadores inclinados con un ángulo $\varphi = \arctan(0.5)$ respecto de la horizontal).

Los DFV se colocarán en todos los niveles de la edificación, por tanto, para evitar usar muchos tipos de disipadores se optó por agruparlos, es así que en todas las edificaciones se usaron tres grupos de disipadores (cada grupo con las mismas características mecánicas). A continuación, se muestra como están conformados los grupos.

$$\begin{aligned}
 3 \text{ Niveles} &= \begin{cases} C_{NL\ G1}^{**} \rightarrow \text{Nivel: } 1 \\ C_{NL\ G2}^{**} \rightarrow \text{Nivel: } 2 \\ C_{NL\ G3}^{**} \rightarrow \text{Nivel: } 3 \\ \vdots \end{cases} \\
 9 \text{ Niveles} &= \begin{cases} C_{NL\ G1}^{**} \rightarrow \text{Niveles: } 1, 2, 3 \\ C_{NL\ G2}^{**} \rightarrow \text{Niveles: } 4, 5, 6 \\ C_{NL\ G3}^{**} \rightarrow \text{Niveles: } 7, 8, 9 \\ \vdots \end{cases} \\
 18 \text{ Niveles} &= \begin{cases} C_{NL\ G1}^{**} \rightarrow \text{Niveles: } 1, 2, 3, 4, 5, 6 \\ C_{NL\ G2}^{**} \rightarrow \text{Niveles: } 7, 8, 9, 10, 11, 12 \\ C_{NL\ G3}^{**} \rightarrow \text{Niveles: } 13, 14, 15, 16, 17, 18 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Finalmente, se debe precisar que el factor de reducción η_δ considerado para el predimensionamiento se midió en todos los casos respecto al primer nivel, ya que

como muestra la Figura N° 4.4b es en este nivel donde η_δ toma su mayor valor. Asimismo, el exponente de amortiguamiento α se consideró con un valor constante en todos los niveles de la edificación.

4.5.1 Importancia del Factor de Reducción

El factor de reducción η_δ es el cociente que resulta de dividir la deriva máxima de la edificación que incorpora DFV entre la deriva máxima de la misma edificación sin DFV. Este parámetro resulta ser un buen indicador para medir el nivel de reducción de las respuestas sísmicas que proveen los DFV a la edificación. En un caso ideal se pretendería que el factor de reducción tome el menor valor posible; sin embargo, desde un enfoque práctico y considerando ciertas limitaciones se suelen usar factores de reducción entre 0.4 y 0.7 como objetivo de diseño.

En las siguientes tablas se muestran las respuestas sísmicas máximas obtenidas para edificaciones con diferentes números de niveles y usando cuatro factores de reducción distintos.

TABLA N° 4.7: Fuerza cortante basal normalizada máxima

Fuerza cortante basal normalizada - V_b/P_{tot} [%]					
N° de niveles	Sin DFV	Factor de reducción			
		$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	152.46	72.88	82.19	96.01	109.10
6	101.47	46.03	54.75	64.44	73.78
9	71.77	37.65	42.10	47.30	53.23
12	51.07	24.77	27.80	32.56	37.36
15	37.73	23.06	22.69	24.49	27.77
18	30.08	21.59	19.72	18.93	17.84

TABLA N° 4.8: Desplazamiento máximo del último nivel

Desplazamiento del último nivel - u_n [mm]					
N° de niveles	Sin DFV	Factor de reducción			
		$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	49.10	18.09	24.93	31.80	36.99
6	129.46	52.17	69.38	86.58	102.57
9	193.77	62.47	94.69	124.35	151.83
12	250.72	95.42	127.51	159.18	189.79
15	318.32	82.76	153.63	190.17	222.30
18	376.77	77.81	115.36	152.08	161.76

TABLA N° 4.9: Aceleración absoluta máxima del último nivel

Aceleración absoluta del último nivel - \ddot{u}_n [g]					
N° de niveles	Sin DFV	Factor de reducción			
		$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	2.27	0.98	1.24	1.51	1.74
6	1.70	0.72	0.93	1.19	1.42
9	1.31	0.57	0.52	0.62	0.84
12	0.98	0.41	0.40	0.45	0.53
15	1.12	0.43	0.36	0.40	0.44
18	0.79	0.57	0.23	0.29	0.32

Para obtener los valores que se muestran en las Tablas N° 4.7, N° 4.8 y N° 4.9 se trabajó con gráficos similares a los presentados en el apartado 4.4.2 para cada uno de los casos. De estos gráficos, que muestran las respuestas sísmicas que se obtienen como resultado de un análisis tiempo historia, se obtuvieron los máximos valores (en valor absoluto). Además las tablas precedentes también presentan las respuestas sísmicas para edificaciones con diferentes número de niveles pero que no incorporan disipadores de fluido viscoso.

Valiéndose de los resultados mostrados en esas tablas y haciendo uso de la ecuación 4.22 se obtuvieron los porcentajes de reducción para cada una de las respuestas sísmicas, medidos en función de la fuerza cortante basal normalizada, el desplazamiento del último nivel y la aceleración absoluta del último nivel de las edificaciones. Dichos porcentajes de reducción se muestran a continuación en las Tablas N° 4.10, N° 4.11 y N° 4.12.

TABLA N° 4.10: Reducción de la fuerza cortante basal normalizada

Reducción de la fuerza cortante basal [%]				
N° de niveles	Factor de reducción			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	52.20	46.09	37.03	28.44
6	54.64	46.04	36.50	27.29
9	47.55	41.34	34.10	25.84
12	51.49	45.56	36.23	26.85
15	38.88	39.86	35.08	26.41
18	28.22	34.44	37.08	40.70

TABLA N° 4.11: Reducción del desplazamiento del último nivel

Reducción del desplazamiento [%]				
N° de niveles	Factor de reducción			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	63.16	49.22	35.24	24.66
6	59.70	46.41	33.12	20.77
9	67.76	51.14	35.83	21.65
12	61.94	49.14	36.51	24.30
15	74.00	51.74	40.26	30.17
18	79.35	69.38	59.64	57.07

TABLA N° 4.12: Reducción de la aceleración absoluta del último nivel

Reducción de la aceleración absoluta [%]				
N° de niveles	Factor de reducción			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	56.96	45.48	33.30	23.40
6	57.83	45.44	29.84	16.43
9	56.55	60.20	52.73	35.65
12	58.35	59.00	53.65	46.10
15	61.44	68.05	63.86	60.82
18	27.72	70.80	63.72	60.15

Para un mejor entendimiento de los resultados presentados en las Tablas N° 4.10, N° 4.11 y N° 4.12 se procede a elaborar gráficos que muestren de manera visual la importancia del factor de reducción en las respuestas sísmicas de edificaciones que incorporan DFV. De las Figuras N° 4.9, N° 4.10 y N° 4.11 se concluye que la reducción de las respuestas sísmicas, en líneas generales, se incrementa conforme disminuye el factor de reducción. Por otro lado, se puede observar también que para edificaciones con periodos bajos (pocos niveles) el porcentaje de reducción de la fuerza cortante basal normalizada y del desplazamiento del último nivel se mantienen prácticamente constantes para cada factor de reducción independientemente de número de niveles. Asimismo, las Figuras N° 4.10 y N° 4.11 muestran que existe una ligera tendencia al incremento de la reducción del desplazamiento relativo del último nivel y la aceleración absoluta del último nivel conforme el número de pisos se incrementa.

Por último, en las Figuras N° 4.9 y N° 4.11 se puede apreciar que para valores bajos del factor de reducción, $\eta_\delta \leq 0.4$, (es decir para amortiguamientos altos) y para

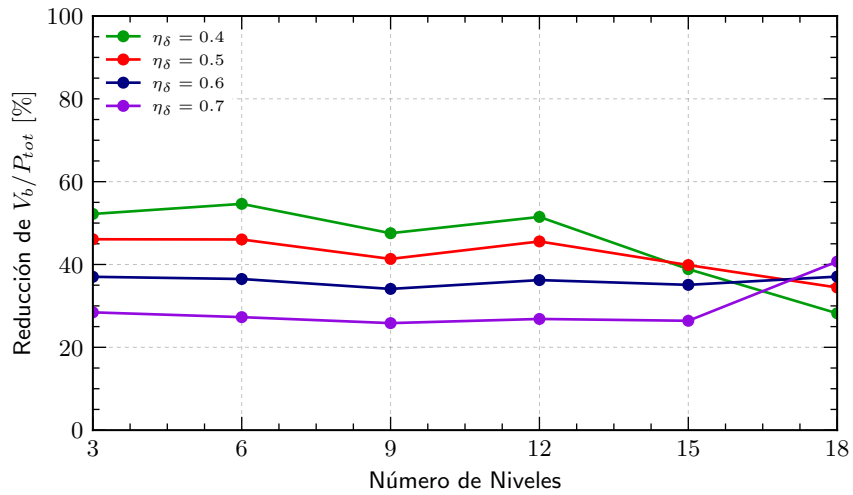


FIGURA N° 4.9: Reducción de la fuerza cortante basal normalizada.

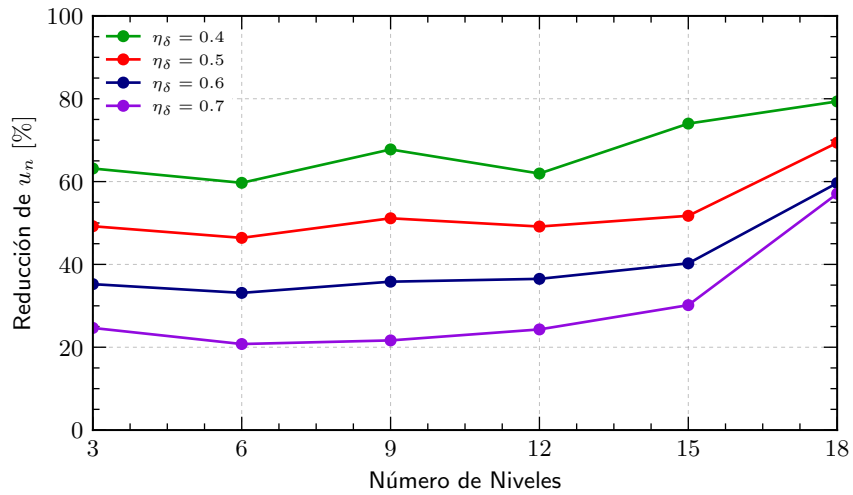


FIGURA N° 4.10: Reducción del desplazamiento del último nivel.

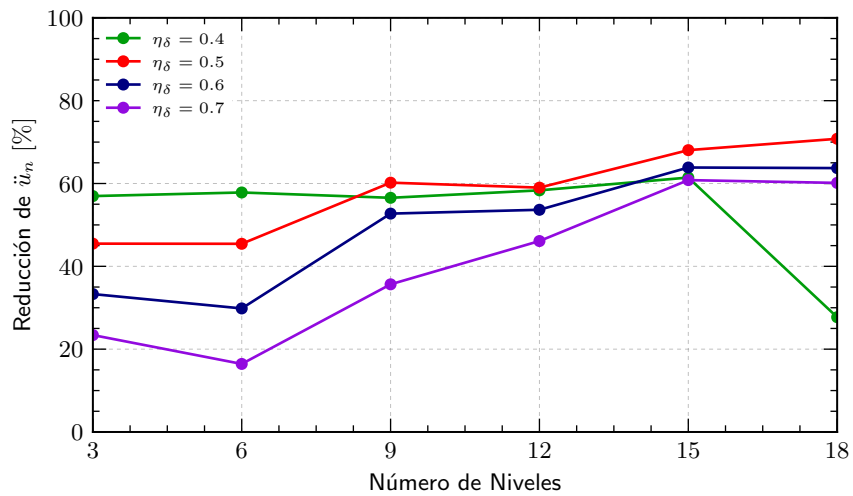


FIGURA N° 4.11: Reducción de la aceleración absoluta del último nivel.

edificaciones con periodos altos (mayor número de niveles) el porcentaje de reducción respecto a la aceleración absoluta del último nivel y de la fuerza cortante basal decrecen. Este resultado es esperado y se debe a las bien conocidas propiedades de *Transmisibilidad para excitación armónica TR* (Chopra, 2016) que crece cuando se incrementa el valor del porcentaje de amortiguamiento crítico β' en la región de frecuencias caracterizadas por $\omega/\omega_n > \sqrt{2}$, donde ω_n es la frecuencia natural circular del sistema y ω es la frecuencia circular de la excitación. Un comportamiento similar se aprecia en la Figura N° 4.3 donde se puede ver que cuando β' y el periodo de la edificación tienen valores altos, el factor de reducción de la aceleración η_a crece, superando incluso la unidad.

4.5.2 Influencia del Factor de Amplificación

El factor de amplificación f_A es el cociente que resulta de dividir el desplazamiento axial del disipador de fluido viscoso u_D entre el desplazamiento transversal relativo del entrepiso u (tal como se muestra en la ecuación 4.4). De acuerdo con Polat y Constantinou (2017) el factor de amplificación depende de la configuración que se usa al momento de instalar los DFV; es así que considerando la ecuación 4.3 se tiene que para un mismo valor de la fuerza axial del disipador se pueden obtener valores de fuerzas transversales de entrepiso diferentes según la disposición que tengan los disipadores. A continuación, se muestran los factores de amplificación para diferentes configuraciones de los DFV.

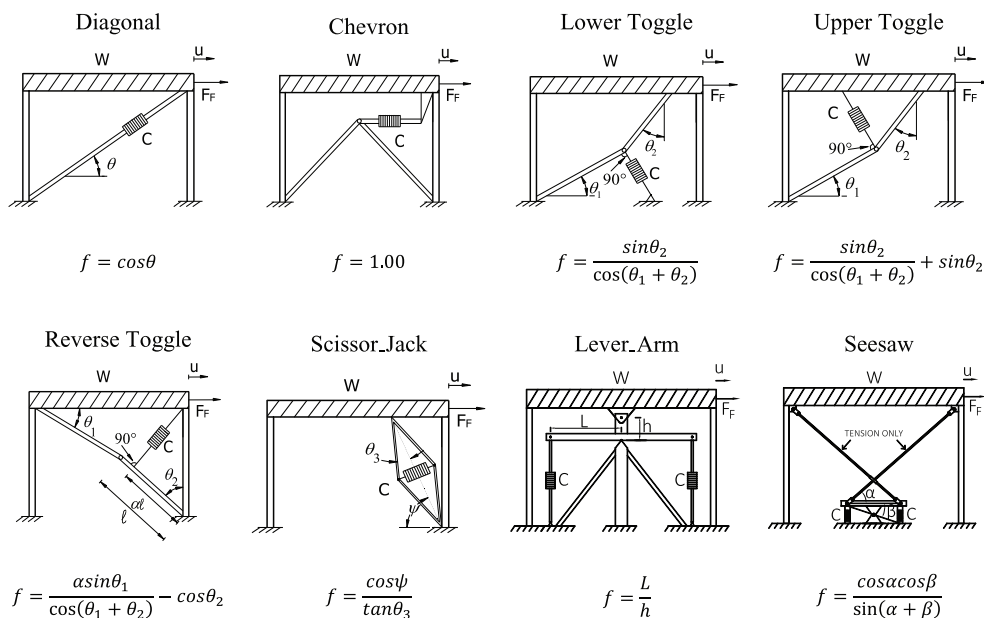


FIGURA N° 4.12: Factor de amplificación para diferentes configuraciones.

Fuente: Polat y Constantinou (2017)

En esta subsección se estudiará la influencia que tiene el factor de amplificación en las respuestas sísmicas y en el porcentaje de reducción de las mismas. Para lograr dicho objetivo se obtendrán las respuestas sísmicas para tres grupos diferentes de edificaciones que tienen incorporados DFV. En el primer grupo los DFV usarán un $f_A = 0.89$, en el segundo grupo $f_A = 1$ y en el tercer grupo $f_A = 2$. Es preciso indicar que los DFV incorporados tienen las propiedades dadas en las Tablas N° 4.3, N° 4.4, N° 4.5 y N° 4.6 para cada uno de los grupos, es decir los disipadores son los mismos y la única variable a considerar es el factor de amplificación.

$$f_A = \begin{cases} 0.89 \rightarrow \text{Diagonal} & \text{con } \theta = \arctan(0.5) \\ 1 \rightarrow \text{Chevron} \\ 2 \rightarrow \text{Lower Toggle} & \text{con } \theta_1 = 43^\circ \wedge \theta_2 = 31.7^\circ \end{cases}$$

A continuación, se presentan las respuestas sísmicas obtenidas para los tres factores de amplificación y considerando cuatro factores de reducción distintos.

TABLA N° 4.13: Fuerza cortante basal normalizada - $f_A = 1$ y $f_A = 2$

Fuerza cortante basal normalizada - V_b/P_{tot} [%]								
N° de niveles	$f_A = 1$				$f_A = 2$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	70.94	79.01	90.43	104.44	67.64	67.75	71.09	77.80
6	44.05	51.48	61.43	71.35	52.76	45.25	43.46	52.63
9	36.40	40.84	45.64	51.82	89.98	39.64	37.22	42.06
12	25.22	25.60	30.52	35.79	54.82	27.91	26.08	24.68
15	24.50	22.56	23.22	26.61	79.81	29.01	24.19	22.48
18	30.26	19.90	19.26	20.29	120.13	37.55	20.80	19.90

TABLA N° 4.14: Desplazamiento del último nivel - $f_A = 1$ y $f_A = 2$

Desplazamiento del último nivel - u_n [mm]								
N° de niveles	$f_A = 1$				$f_A = 2$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	16.21	22.91	29.50	35.15	7.09	10.54	16.58	21.64
6	45.64	63.09	81.50	98.28	22.50	27.45	42.91	65.34
9	53.41	85.72	115.76	145.69	64.30	52.85	59.31	94.71
12	81.42	112.54	145.92	179.83	102.74	80.92	63.97	94.48
15	113.22	137.12	175.50	210.47	123.19	113.48	85.41	116.00
18	191.20	142.37	202.30	239.84	180.61	191.20	135.46	149.16

TABLA N° 4.15: Aceleración absoluta del último nivel - $f_A = 1$ y $f_A = 2$

Aceleración absoluta del último nivel - \ddot{u}_n [g]								
N° de niveles	$f_A = 1$				$f_A = 2$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	0.92	1.16	1.42	1.66	1.00	0.77	0.93	1.12
6	0.65	0.84	1.11	1.36	1.28	0.71	0.62	0.87
9	0.71	0.49	0.59	0.78	4.08	1.56	0.58	0.52
12	0.44	0.38	0.42	0.50	2.45	1.28	0.58	0.44
15	0.86	0.36	0.39	0.43	5.46	1.28	0.58	0.43
18	1.51	0.51	0.33	0.37	11.34	2.77	0.67	0.42

Con los resultados que se muestran en las tablas anteriores y haciendo uso de la ecuación 4.22 se obtuvieron los porcentajes de reducción para cada una de las respuestas sísmicas, para los diferentes factores de amplificación.

TABLA N° 4.16: Reducción de la fuerza cortante basal - $f_A = 1$ y $f_A = 2$

Reducción de la fuerza cortante basal normalizada [%]								
N° de niveles	$f_A = 1$				$f_A = 2$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	53.5	48.2	40.7	31.5	55.6	55.6	53.4	49.0
6	56.6	49.3	39.5	29.7	48.0	55.4	57.2	48.1
9	49.3	43.1	36.4	27.8	-25.4	44.8	48.1	41.4
12	50.6	49.9	40.2	29.9	-7.4	45.3	48.9	51.7
15	35.1	40.2	38.5	29.5	-111.5	23.1	35.9	40.4
18	-0.6	33.9	36.0	32.5	-299	-24.8	30.8	33.8

TABLA N° 4.17: Reducción del desplazamiento del último nivel - $f_A = 1$ y $f_A = 2$

Reducción del desplazamiento del último nivel [%]								
N° de niveles	$f_A = 1$				$f_A = 2$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	67.0	53.3	39.9	28.4	85.6	78.5	66.2	55.9
6	64.7	51.3	37.0	24.1	82.6	78.8	66.9	49.5
9	72.4	55.8	40.3	24.8	66.8	72.7	69.4	51.1
12	67.5	55.1	41.8	28.3	59.0	67.7	74.5	62.3
15	64.4	56.9	44.9	33.9	61.3	64.3	73.2	63.6
18	49.3	62.2	46.3	36.3	52.1	49.3	64.0	60.4

TABLA N° 4.18: Reducción de la aceleración del último nivel - $f_A = 1$ y $f_A = 2$

Reducción de la aceleración absoluta del último nivel [%]								
N° de niveles	$f_A = 1$				$f_A = 2$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	59.4	48.8	37.5	27.0	56.1	66.3	58.9	50.8
6	61.8	50.8	34.6	19.8	24.4	58.2	63.4	48.9
9	46.2	62.5	54.9	40.6	-211	-18.8	56.1	60.3
12	55.4	60.8	56.8	48.6	-149	-30.3	40.6	55.4
15	23.6	67.5	65.4	61.7	-387	-14.2	47.9	62.0
18	-89.8	36.2	58.7	53.2	-1328	-249	15.8	47.4

En las Tablas N° 4.16 y N° 4.18 se observan que en muchos casos el porcentaje de reducción tanto de la fuerza cortante basal así como de la aceleración absoluta del último nivel adoptan valores negativos, esto indica que las respuestas sísmicas son mayores en las edificaciones con DFV que en las edificaciones sin DFV.

A continuación, en las Figuras N° 4.13, N° 4.14 y N° 4.15 se muestran gráficamente las reducciones alcanzadas tanto para el factor de amplificación $f_A = 0.89$ así como para los factores de amplificación $f_A = 1$ y $f_A = 2$.

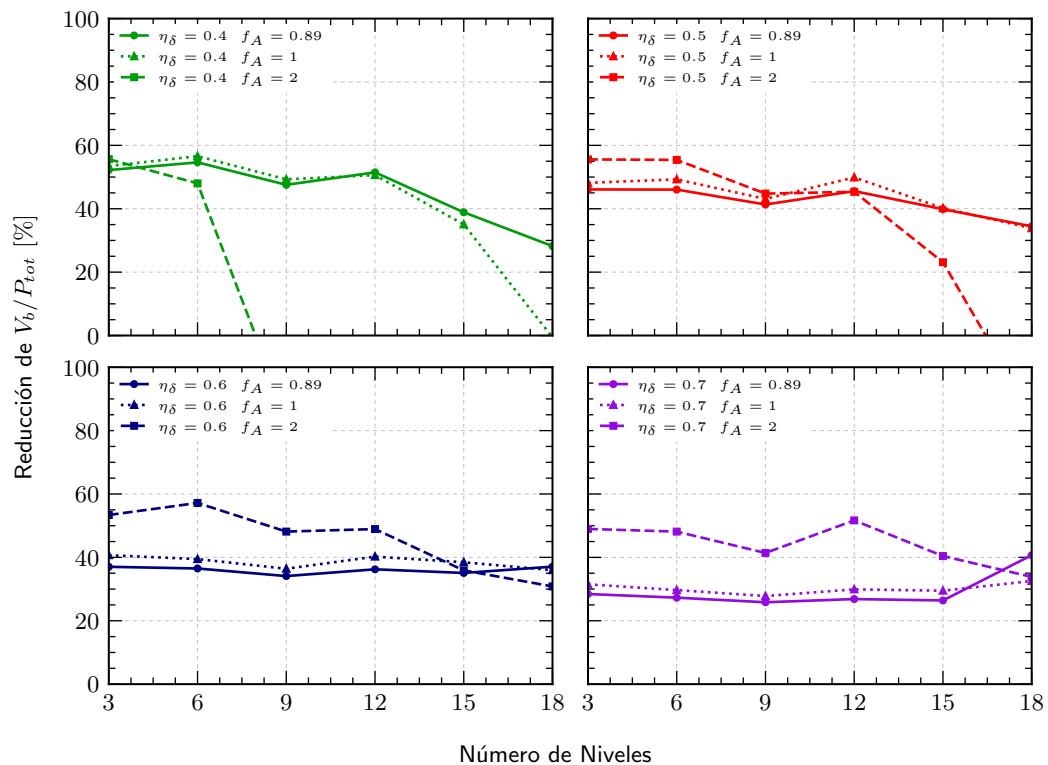


FIGURA N° 4.13: Reducción de la cortante basal - $f_A = 0.89$, $f_A = 1$ y $f_A = 2$.

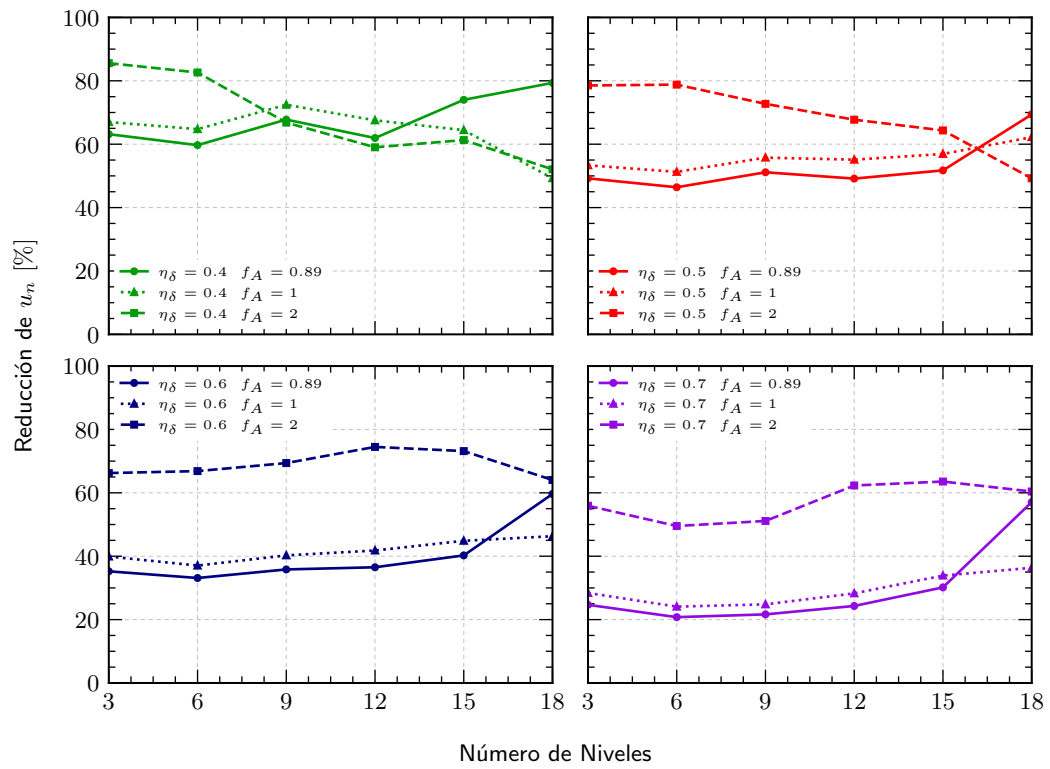


FIGURA N° 4.14: Reducción desplazamiento u_n - $f_A = 0.89$, $f_A = 1$ y $f_A = 2$.

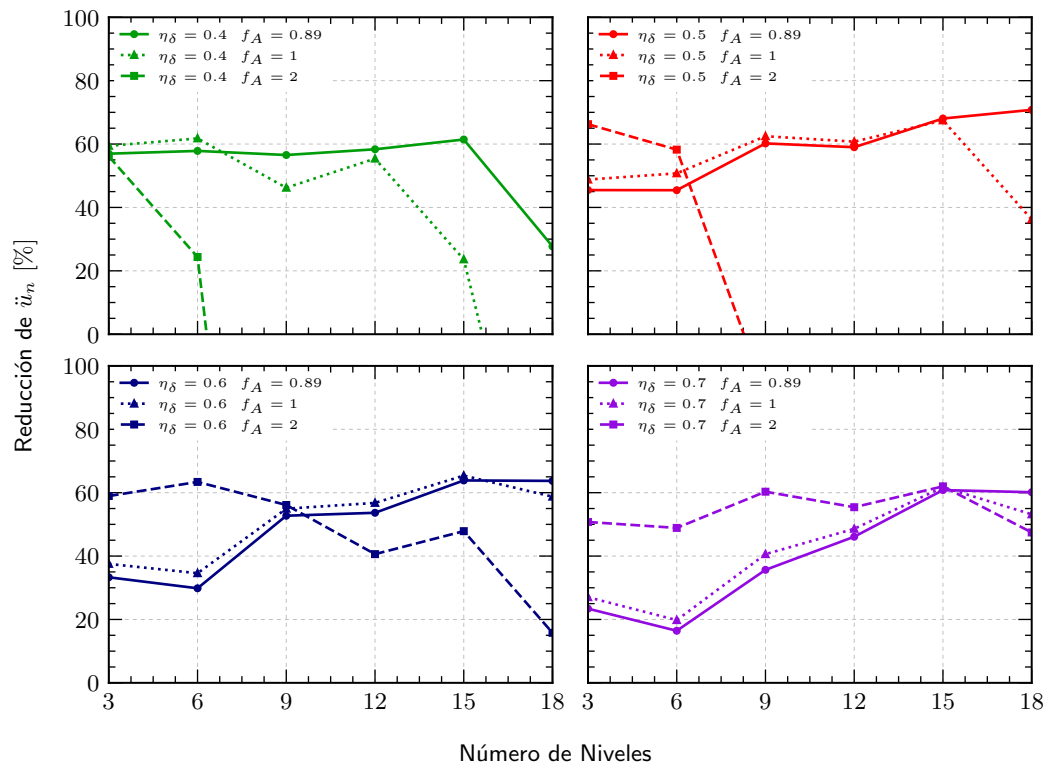


FIGURA N° 4.15: Reducción de la aceleración \ddot{u}_n - $f_A = 0.89$, $f_A = 1$ y $f_A = 2$.

En las Figuras N° 4.13 y N° 4.15 se puede apreciar que para factores de reducción bajos ($\eta_\delta \leq 0.5$) y para $f_A = 2$ en muchos casos no se consiguen reducciones en términos de la fuerza cortante basal y de aceleración absoluta del último nivel, especialmente en edificaciones con periodos altos. Sin embargo, existe una leve tendencia de incremento en las reducciones de las respuestas sísmicas en edificaciones con periodo bajo. Por otro lado, en las Figuras N° 4.13 y N° 4.14 se aprecia que para factores de reducción altos ($\eta_\delta \geq 0.6$) existe una tendencia de obtener mayores porcentajes de reducción cuanto mayor sea el factor de amplificación y menor periodo tenga la edificación. Por ejemplo en cuanto a la reducción del desplazamiento del último nivel la Figura N° 4.15 muestra que se pueden obtener reducciones de hasta el doble de valor usando $f_A = 2$ en comparación a las obtenidas usando $f_A = 1$.

4.5.3 Influencia del Período Fundamental de la Edificación

Los disipadores de fluido viscoso pueden instalarse en edificaciones rígidas así como también en edificaciones flexibles; por lo tanto, resulta de interés estudiar como afecta la rigidez de la edificación a la reducción de las respuestas sísmicas en edificaciones con DFV. El periodo fundamental (T) se puede usar como parámetro para representar de cierto modo la rigidez de una edificación. En este sentido, un periodo fundamental bajo se asocia con una alta rigidez y por el contrario una periodo fundamental alto se asocia con una alta flexibilidad. La presente subsección estudiará edificaciones que cumplan lo siguiente:

$$T = \begin{cases} 0.05n & \rightarrow \text{Edificaciones con Muros Estructurales} \\ 0.10n & \rightarrow \text{Edificaciones Duales} \\ 0.15n & \rightarrow \text{Edificaciones Aporticadas} \end{cases}$$

En la expresión anterior T es el periodo fundamental y n es el número de niveles de la edificación.

En todos los casos que se estudiarán el único parámetro que se variará es el periodo fundamental de la edificación. Se usará un factor de amplificación $f_A = 0.89$ para todos los niveles y además los disipadores de fluido viscoso tendrán las propiedades dadas en las Tablas N° 4.3, N° 4.4, N° 4.5 y N° 4.6.

En la Tabla N° 4.19 se muestra las repuestas sísmicas de edificaciones con diferente número de niveles sin disipadores de fluido viscoso tanto para $T = 0.05n$ así como para $T = 0.15n$. Asimismo, las Tablas N° 4.20, N° 4.21 y N° 4.22 presentan las respuestas sísmicas para edificaciones que incorporan DFV y tienen periodos fundamentales $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$.

TABLA N° 4.19: Respuestas sísmicas de edificaciones sin DFV - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$

Respuestas sísmicas de edificaciones sin DFV						
N° de niveles	$T = 0.05n$			$T = 0.15n$		
	V_b/P_{tot}	u_n	\ddot{u}_n	V_b/P_{tot}	u_n	\ddot{u}_n
	[%]	[mm]	[g]	[%]	[mm]	[g]
3	160.93	12.89	2.26	142.48	98.24	2.20
6	145.98	51.57	2.58	72.87	194.05	1.35
9	149.09	96.23	2.08	42.77	317.14	1.04
12	102.03	130.64	1.94	30.16	377.44	0.78
15	74.99	165.96	1.80	25.48	492.35	0.87
18	70.45	194.22	1.32	20.95	532.20	0.71

TABLA N° 4.20: Fuerza cortante basal normalizada - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$

Fuerza cortante basal normalizada - V_b/P_{tot} [%]								
N° de niveles	$T = 0.05n$				$T = 0.15n$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	98.3	107.3	110.0	122.1	59.1	72.4	90.2	100.1
6	85.6	99.8	112.5	122.2	38.9	42.6	47.8	53.6
9	74.9	93.5	106.5	123.0	26.6	23.9	25.4	31.4
12	56.5	63.2	69.4	76.9	20.5	20.0	20.0	19.7
15	49.3	56.3	60.9	64.9	18.8	15.7	15.4	17.3
18	48.8	47.6	53.9	56.4	18.1	14.4	13.4	14.0

TABLA N° 4.21: Desplazamiento del último nivel - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$

Desplazamiento del último nivel - u_n [mm]								
N° de niveles	$T = 0.05n$				$T = 0.15n$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	6.7	7.9	8.7	9.7	29.0	44.6	57.6	66.3
6	27.8	34.0	39.5	43.5	69.5	93.9	121.6	147.4
9	46.7	61.5	72.6	83.8	76.9	92.1	148.9	205.1
12	73.4	84.8	96.0	107.8	103.2	136.8	171.2	209.1
15	88.2	124.3	136.9	146.4	118.1	205.6	266.3	325.2
18	112.9	128.1	157.5	167.5	175.5	234.5	273.1	291.5

TABLA N° 4.22: Aceleración absoluta del último nivel - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$

Aceleración absoluta del último nivel - \ddot{u}_n [g]								
N° de niveles	$T = 0.05n$				$T = 0.15n$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	1.21	1.39	1.64	1.81	0.74	1.03	1.21	1.45
6	1.40	1.69	1.95	2.17	0.43	0.51	0.60	0.80
9	1.07	1.30	1.57	1.75	0.47	0.28	0.37	0.48
12	1.01	1.21	1.41	1.57	0.30	0.22	0.27	0.34
15	1.02	1.12	1.24	1.35	0.57	0.22	0.25	0.29
18	1.59	0.74	0.90	1.01	1.02	0.32	0.20	0.24

Con los resultados que se muestran en las tablas anteriores y haciendo uso de la ecuación 4.22 se obtuvo los porcentajes de reducción para cada una de las respuestas sísmicas para periodos fundamentales $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$.

TABLA N° 4.23: Reducción de la fuerza cortante basal - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$

Reducción de la fuerza cortante basal normalizada [%]								
N° de niveles	$T = 0.05n$				$T = 0.15n$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	38.9	33.4	31.7	24.1	58.5	49.2	36.7	29.8
6	41.4	31.6	22.9	16.3	46.6	41.5	34.5	26.5
9	49.7	37.3	28.5	17.5	37.9	44.2	40.6	26.5
12	44.6	38.1	32.0	24.6	32.0	33.7	33.6	34.6
15	34.3	24.9	18.7	13.4	26.0	38.2	39.4	32.1
18	30.7	32.4	23.5	19.9	13.4	31.2	36.0	33.1

TABLA N° 4.24: Reducción del desplazamiento del último nivel - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$

Reducción del desplazamiento del último nivel [%]								
N° de niveles	$T = 0.05n$				$T = 0.15n$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	47.7	38.9	32.2	24.8	70.5	54.6	41.4	32.5
6	46.1	34.1	23.5	15.6	64.2	51.6	37.3	24.0
9	51.5	36.1	24.5	12.9	75.8	70.9	53.1	35.3
12	43.8	35.1	26.5	17.5	72.7	63.8	54.7	44.6
15	46.9	25.1	17.5	11.8	76.0	58.2	45.9	34.0
18	41.9	34.0	18.9	13.8	67.0	55.9	48.7	45.2

TABLA N° 4.25: Reducción de la aceleración del último nivel - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$

Reducción de la aceleración absoluta del último nivel [%]								
N° de niveles	$T = 0.05n$				$T = 0.15n$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	46.4	38.5	27.7	20.0	66.1	53.1	44.8	34.0
6	45.7	34.7	24.3	16.1	67.9	61.9	55.4	40.4
9	48.7	37.6	24.8	16.2	54.5	73.2	64.2	53.6
12	47.7	37.9	27.5	18.8	61.9	71.8	64.8	56.8
15	43.4	37.9	31.0	25.1	34.4	74.1	71.7	66.7
18	-20.3	43.9	31.7	24.0	-43.6	54.9	71.8	66.8

En la Tabla N° 4.25 se observa que algunos porcentajes de reducción toman valores negativos, lo cual indica que la respuesta sísmica es mayor en las edificaciones con DFV que en las edificaciones sin DFV.

A continuación, en las Figuras N° 4.16, N° 4.17 y N° 4.18 se muestran gráficamente las reducciones alcanzadas por edificaciones que incorporan DFV y tienen periodos fundamentales $T = 0.05n$, $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$.

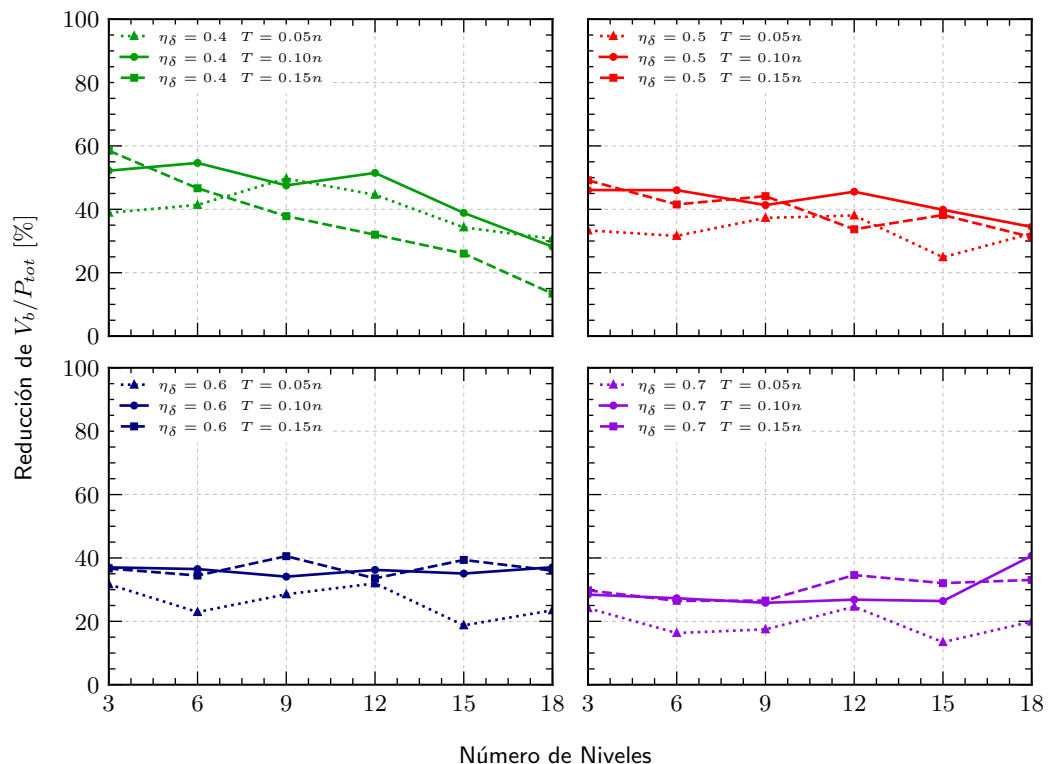


FIGURA N° 4.16: Reducción de la cortante basal - $T = 0.05n$, $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$.

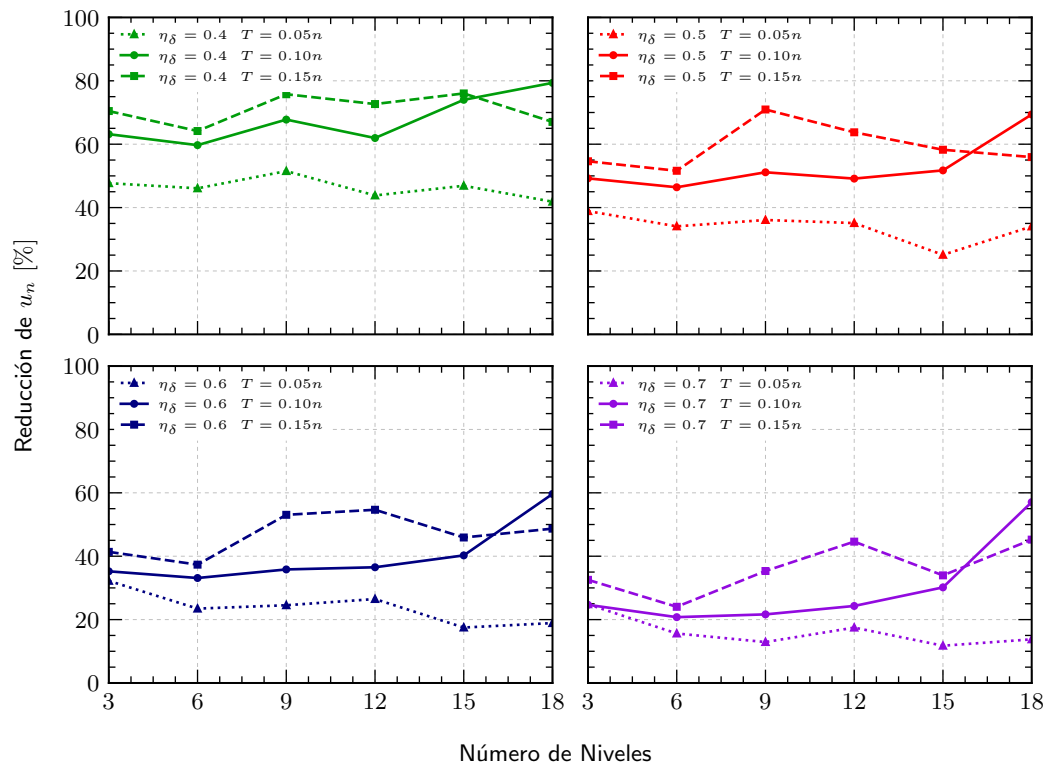


FIGURA N° 4.17: Reducción de u_n - $T = 0.05n$, $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$.

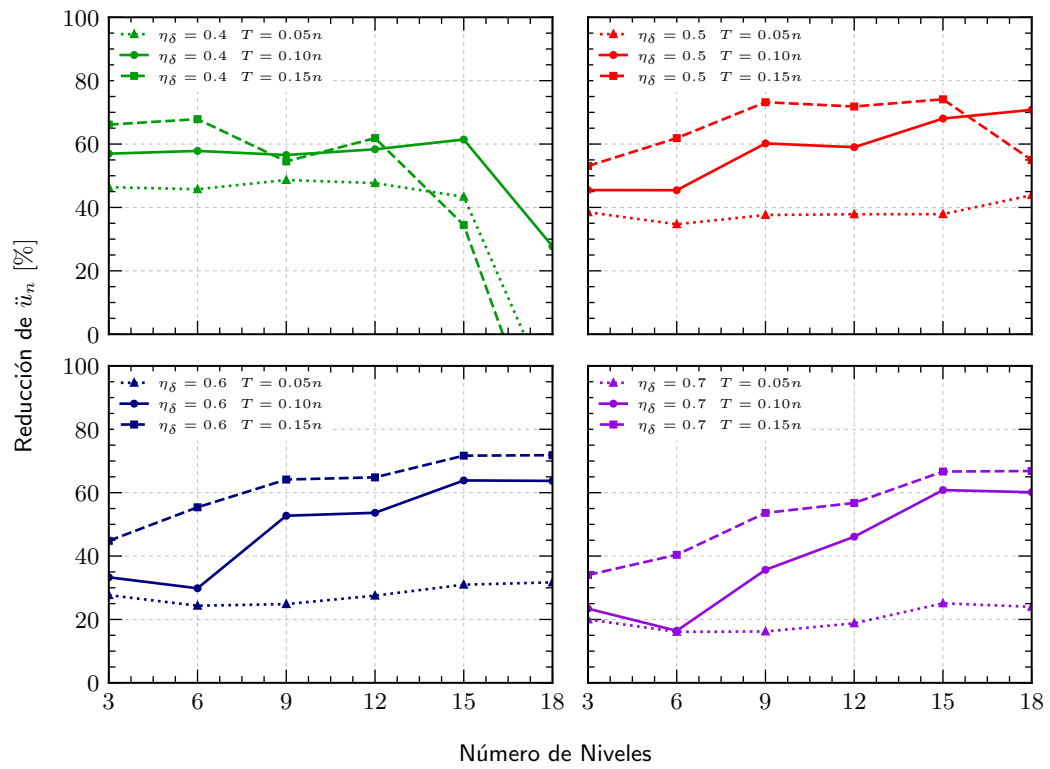


FIGURA N° 4.18: Reducción de \dot{u}_n - $T = 0.05n$, $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$.

En la Figura N° 4.16 no se observa una clara tendencia con relación al porcentaje de reducción alcanzado respecto de la fuerza cortante basal normalizada. Sin embargo, en las Figuras N° 4.17 y N° 4.18 se aprecia claramente que se logra mayores reducciones, con respecto al desplazamiento y la aceleración absoluta del último nivel, para edificaciones flexibles (mayores periodos) en comparación con las edificaciones rígidas (menores periodos). Esto se explica por el hecho que los disipadores de fluido viscoso funcionan gracias a las velocidades relativas entre sus extremos y en edificaciones flexibles se logran mayores velocidades.

4.6 COMENTARIOS FINALES

En este capítulo se estudiaron modelos simplificados bidimensionales de edificaciones que incorporan DFV, para cuatro factores de reducción objetivo distintos. Con base en los resultados obtenidos se puede afirmar lo siguiente.

- El uso de DFV permite reducir las respuestas sísmicas de las edificaciones. Siendo estas reducciones, en la mayoría de casos, independientes del número de niveles e indirectamente proporcionales a los factores de reducción objetivo (η_δ). Sin embargo, usar valores muy bajos de η_δ puede generar un efecto contraproducente en edificaciones con muchos niveles, incrementando las aceleraciones y la fuerza cortante basal.
- La tendencia general es obtener mayores porcentajes de reducción para factores de amplificación (f_A) más altos. Sin embargo, esta tendencia no se mantiene para edificaciones con periodos fundamentales altos que a su vez tengan factores de reducción objetivo (η_δ) bajos. Presentándose incluso casos para los cuales no se obtiene ninguna reducción sino por el contrario hay un incremento en la aceleración del último nivel y la fuerza cortante basal.
- Los porcentajes de reducción que se obtienen para edificaciones flexibles (periodos altos) que incorporan DFV son mayores en comparación a los obtenidos por edificaciones rígidas (periodos bajos) con DFV.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS SÍSMICO DE EDIFICACIONES CON DISIPADORES HISTERÉTICOS

En este capítulo se estudiarán modelos simplificados de edificaciones que incorporen disipadores histeréticos metálicos (DH). Se usará un modelo de masas concentradas con n GDL con comportamiento lineal y elástico, donde las masas contiguas están conectadas por elementos de tipo *link* con comportamiento histerético de Bouc-Wen (mostrado en el apartado 2.2.2). El objetivo de este capítulo es generar gráficos y plantear una metodología que ayuden en el predimensionamiento de los disipadores histeréticos. Además, se busca observar la incidencia en la respuesta sísmica que tienen variables como el factor de reducción objetivo y el periodo fundamental de la edificación, así como también mostrar las reducciones en las fuerzas cortantes basales, las aceleraciones y los desplazamientos para edificaciones con diferente número de niveles que incorporen DH.

5.1 ECUACIONES DE EQUILIBRIO

La Figura N° 5.1 representa a una edificación con disipadores histeréticos sujeta a una aceleración horizontal del suelo dada por \ddot{u}_g . La estructura tiene n GDL dinámicos, que representan el desplazamiento de los n niveles respecto del suelo, los cuales se recogen en el vector $\mathbf{u}(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)]^T$. La fuerza de entrepi-so producida por los disipadores histeréticos, con comportamiento no lineal, viene dada por F_i .

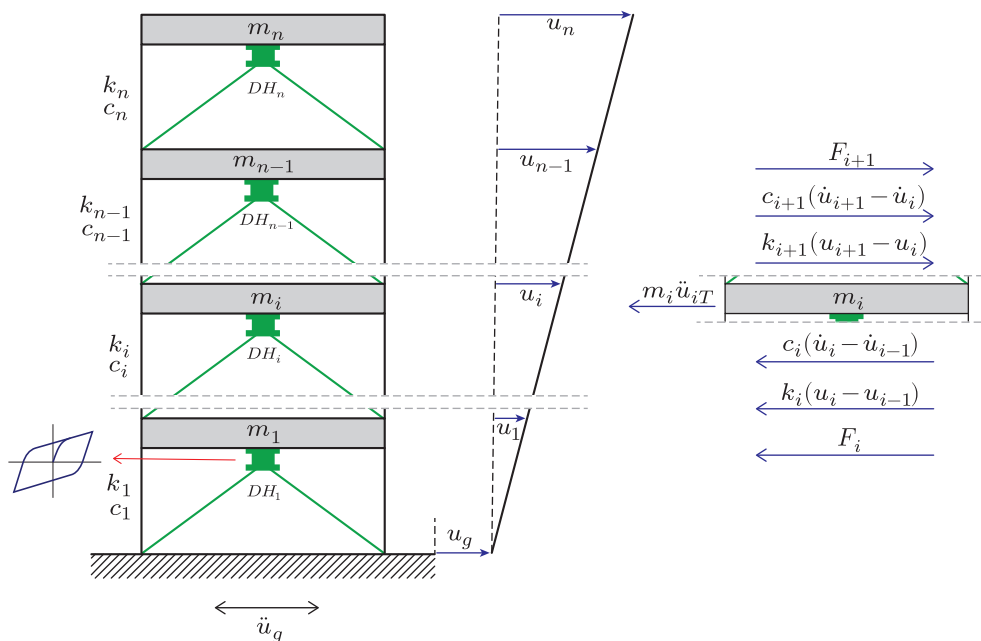


FIGURA N° 5.1: Edificación con disipadores histeréticos.

En la figura anterior se observa que:

$$u_{iT} = u_g + u_i \quad \rightarrow \quad \ddot{u}_{iT} = \ddot{u}_g + \ddot{u}_i \quad (5.1)$$

Además, del diagrama de cuerpo libre de la *i*ésima masa de la Figura N° 5.1 se tiene:

$$0 = m_i \ddot{u}_{iT} + c_i (\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}) + k_i (u_i - u_{i-1}) + F_i - c_{i+1} (\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i) - k_{i+1} (u_{i+1} - u_i) - F_{i+1} \quad (5.2)$$

El valor de F_i en la ecuación 5.2 viene dado por:

$$F_i = \alpha_i \frac{F_{yi}}{D_{yi}} (u_i - u_{i-1}) + (1 - \alpha_i) F_{yi} z_i \quad (5.3)$$

Donde z_i es un parámetro histerético que se obtiene luego de resolver la siguiente ecuación diferencial:

$$\dot{z}_i = [1 - |z_i|^{n_i} \operatorname{sgn}((\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1})z_i)] \frac{(\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1})}{D_{yi}} \quad (5.4)$$

Para resolver 5.4 se debe considerar que la ecuación diferencial en cuestión tiene condiciones iniciales iguales a cero, $z_i(0) = 0$.

Por otro lado, reemplazando la ecuación 5.1 en 5.2, reordenando y simplificando se puede llegar a una expresión matricial de la forma:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) + \mathbf{F}(t) = -\mathbf{M}\boldsymbol{\tau}\ddot{u}_g(t) \quad (5.5)$$

Donde \mathbf{M} es la matriz de masa de la estructura y se obtiene de la ecuación 2.25, \mathbf{C} es la matriz de amortiguamiento y viene dado por la ecuación 2.28, \mathbf{K} es la matriz de rigidez producto de la ecuación 2.26, $\boldsymbol{\tau} = [1, 1, \dots, 1]^T$ es un vector de $n \times 1$ y \mathbf{F} es un vector que recoge las diferencias de las fuerzas producidas por los disipadores histeréticos.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_1 - F_2 \\ F_2 - F_3 \\ \vdots \\ F_i - F_{i+1} \\ \vdots \\ F_{n-1} - F_n \\ F_n \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

5.2 ALGORITMO DE INTEGRACIÓN NUMÉRICA

5.2.1 Formulación Incremental del Método de Runge-Kutta de Cuarto Orden

De acuerdo con Burden y Faires (2011) una ecuación diferencial de la forma:

$$\mathbf{y}' = f(t, \mathbf{y}) \quad \mathbf{y}(0) = \mathbf{y}_0 \quad (5.7)$$

Puede ser resuelta usando el método Runge-Kutta de cuarto orden (RK4):

$$\mathbf{y}_{i+1} = \mathbf{y}_i + \frac{1}{6} \Delta t (\mathbf{k}_1 + 2\mathbf{k}_2 + 2\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4) \quad (5.8)$$

Donde:

$$\begin{cases} \mathbf{k}_1 = f(t_i, \mathbf{y}_i) \\ \mathbf{k}_2 = f(t_i + \frac{1}{2}\Delta t, \mathbf{y}_i + \frac{1}{2}\mathbf{k}_1\Delta t) \\ \mathbf{k}_3 = f(t_i + \frac{1}{2}\Delta t, \mathbf{y}_i + \frac{1}{2}\mathbf{k}_2\Delta t) \\ \mathbf{k}_4 = f(t_i + \Delta t, \mathbf{y}_i + \mathbf{k}_3\Delta t) \end{cases} \quad (5.9)$$

Por otro lado, la ecuación 5.5 puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{M}^{-1} [-\mathbf{M}\boldsymbol{\tau}\ddot{u}_g(t) - \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) - \mathbf{K}\mathbf{u}(t) - \mathbf{F}(t)] \quad (5.10)$$

Se define el vector $\mathbf{y} = [\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, \mathbf{z}]^T$ de orden $3n \times 1$, entonces la ecuación 5.7 queda de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{u}(t) \\ \dot{\mathbf{u}}(t) \\ \mathbf{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}(t) \\ \mathbf{M}^{-1} [-\mathbf{M}\boldsymbol{\tau}\ddot{u}_g(t) - \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) - \mathbf{K}\mathbf{u}(t) - \mathbf{F}(t)] \\ \dot{\mathbf{z}}(t) \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

De la ecuación anterior se puede observar que $f(t, \mathbf{y}) = [\dot{\mathbf{u}}, \ddot{\mathbf{u}}, \dot{\mathbf{z}}]^T$, asimismo, se tiene que $\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_n]^T$ el cual un vector de orden $n \times 1$. Finalmente, el vector $\dot{\mathbf{z}}$ que se muestra en la parte derecha de la ecuación 5.11 se forma usando la ecuación 5.4 para cada uno de los niveles.

5.2.2 Algoritmo de Solución para Edificaciones con Disipadores Histeréticos

A continuación se describe el algoritmo numérico seguido para calcular la respuesta sísmica de una edificación que incorpora DH.

1. Definir los parámetros dinámicos de la estructura, como son el número de

niveles, el periodo fundamental y el porcentaje de amortiguamiento crítico.

$$n, T, \beta$$

- Definir los parámetros del modelo histerético de Bouc-Wen de los DH de cada nivel, tales como la rigidez elástica, la rigidez postfluencia, la fuerza de fluencia y el parámetro que controla la forma del lazo histerético.

$$K_{ei}, K_{pi}, F_{yi}, \eta_i \quad \forall i \in [1; n]$$

- Definir el registro sísmico que se usará.

$$\ddot{u}_g; N = \text{len}(\ddot{u}_g)$$

- Asignar los valores iniciales del sistema.

$$\mathbf{u}_0 = \dot{\mathbf{u}}_0 = \ddot{\mathbf{u}}_0 = \mathbf{z}_0 = \mathbf{0}; \quad \mathbf{F}_0 = \mathbf{0}$$

Para $i \in [1; N]$ se realizarán los pasos del 5 al 9.

- Actualizar el vector \mathbf{F}_i que reúne las fuerzas de los disipadores histeréticos, usando las ecuaciones 5.3 y 5.6.
- Formar los vectores por bloques $\mathbf{y}_i = [\mathbf{u}_i, \dot{\mathbf{u}}_i, \mathbf{z}_i]^T$ y $f(t_i, \mathbf{y}_i) = [\dot{\mathbf{u}}_i, \ddot{\mathbf{u}}_i, \dot{\mathbf{z}}_i]^T$ de orden $3n \times 1$, usando la ecuación 5.11.
- Calcular los valores de $\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3$ y \mathbf{k}_4 , haciendo uso de la ecuación 5.9.
- Calcular el valor del vector \mathbf{y} para el tiempo $\Delta t + t$ (ecuación 5.8).

$$\mathbf{y}_{i+1} = \mathbf{y}_i + \frac{1}{6} \Delta t (\mathbf{k}_1 + 2\mathbf{k}_2 + 2\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4)$$

- Calcular los desplazamientos, las velocidades y las aceleraciones para el tiempo $\Delta t + t$.

$$\mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{y}_{i+1}[1]$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{i+1} = f(t_{i+1}, \mathbf{y}_{i+1})[1]$$

$$\ddot{\mathbf{u}}_{i+1} = f(t_{i+1}, \mathbf{y}_{i+1})[2]$$

- Determinar los valores máximos de interés y almacenarlos.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo del algoritmo usado en esta tesis para calcular la respuesta sísmica de una edificación con disipadores histeréticos.

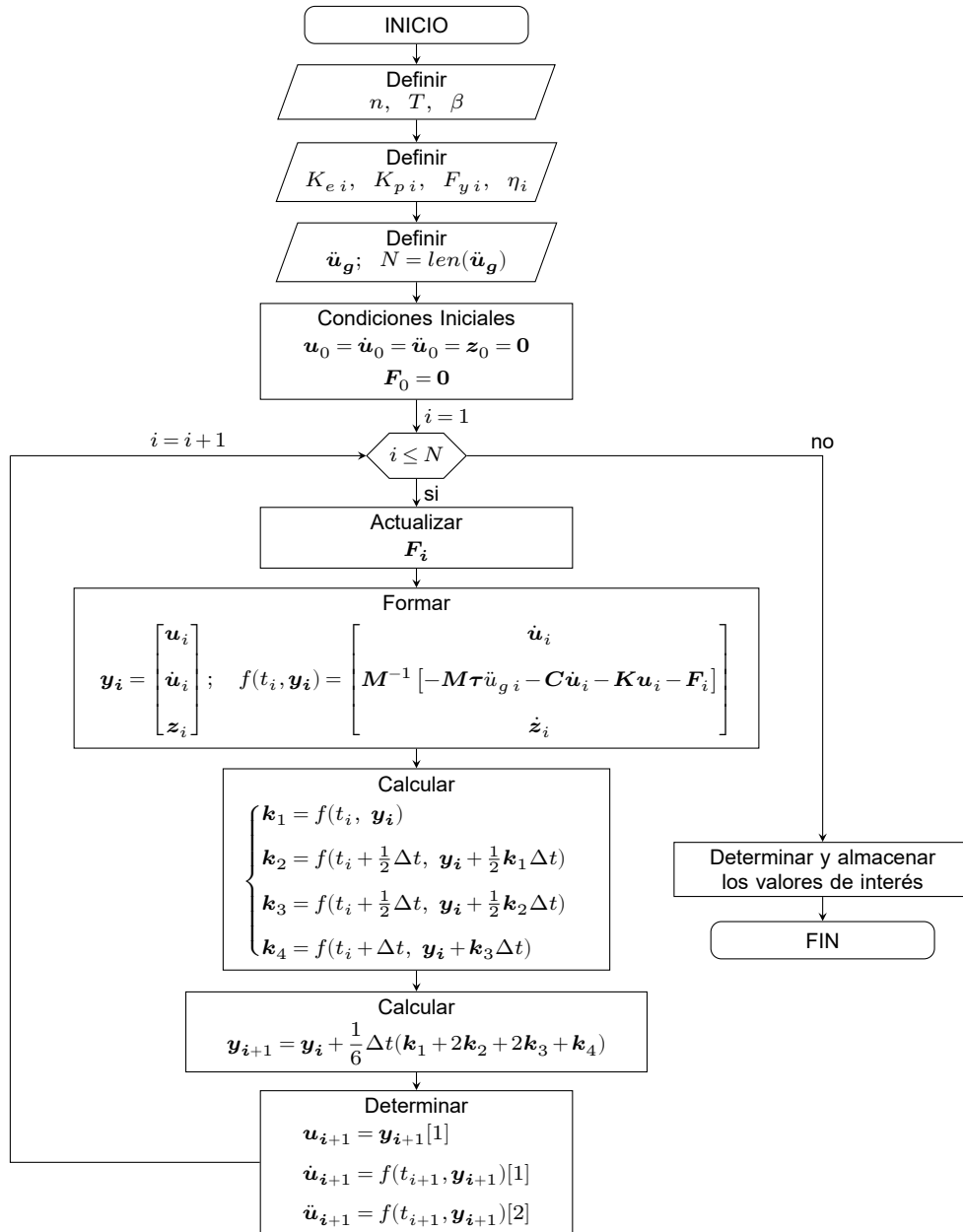


FIGURA N° 5.2: Algoritmo de solución para edificaciones con DH.

5.3 PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS

La inexistencia de un procedimiento estandarizado para el predimensionamiento de los disipadores histeréticos que se instalarán en una edificación ocasiona que en muchos casos el proceso de predimensionamiento termine siendo el resultado de un proceso de prueba y error. Por tal motivo, a continuación se presenta un procedimiento de cuatro pasos para realizar el predimensionamiento de los disipadores histeréticos. Es preciso indicar que este procedimiento fue planteado considerando que los DH se instalarán en todos los niveles y que presentan un comportamiento

histerético de Bouc-Wen.

- Asignar el valor del periodo fundamental de la edificación, el porcentaje de amortiguamiento crítico y el número de niveles.

$$T_1; \beta; n \quad (5.12)$$

- Seguir los siguientes cuatro pasos:

– *Paso 1: Identificación del factor de reducción objetivo.*

El factor de reducción (η) se define como la relación entre la respuesta sísmica de un sistema con disipadores histeréticos y la respuesta sísmica esperada para un sistema sin disipadores. Por ejemplo, con referencia a la deriva de entrepiso:

$$\eta_\delta = \frac{\delta_{max}(Con\ DH)}{\delta_{max}(Sin\ DH)} \quad (5.13)$$

Por otro lado, con relación a la fuerza cortante basal se tiene:

$$\eta_{Vb} = \frac{Vb_{max}(Con\ DH)}{Vb_{max}(Sin\ DH)} \quad (5.14)$$

– *Paso 2: Análisis tiempo historia de la edificación sin disipadores histeréticos.*

Se realizará un análisis tiempo historia en la edificación sin disipadores histeréticos con el fin de obtener las fuerzas cortantes de cada entrepiso V_i , la fuerza cortante basal V_b y las rigideces de entrepiso K_i de cada nivel.

– *Paso 3: Identificación de los parámetros que definen a los disipadores histeréticos no lineales.*

Los parámetros que definen el comportamiento histerético de Bouc-Wen de los disipadores de cada uno de los niveles se puede calcular de la siguiente manera:

$$K_{e\ i} = \kappa_1 K_i \quad \wedge \quad F_{y\ i} = \kappa_2 V_i \quad \forall i \in [1; n] \quad (5.15)$$

Donde κ_1 y κ_2 son factores que se obtienen de las Figuras N° 5.3, N° 5.4, N° 5.5, N° 5.6, N° 5.7 y N° 5.8 con la ayuda de los factores de reducción objetivos η_δ o η_{Vb} .

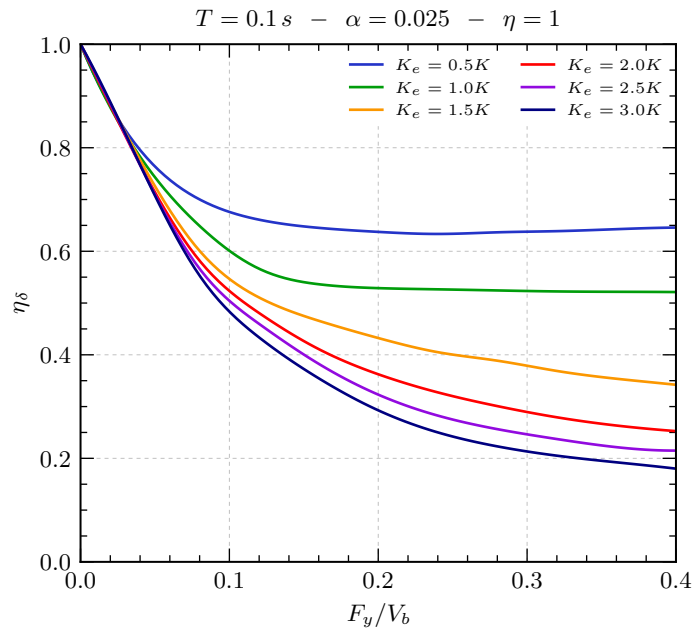


FIGURA N° 5.3: η_δ en función de K_e y F_y - $n = 1$.

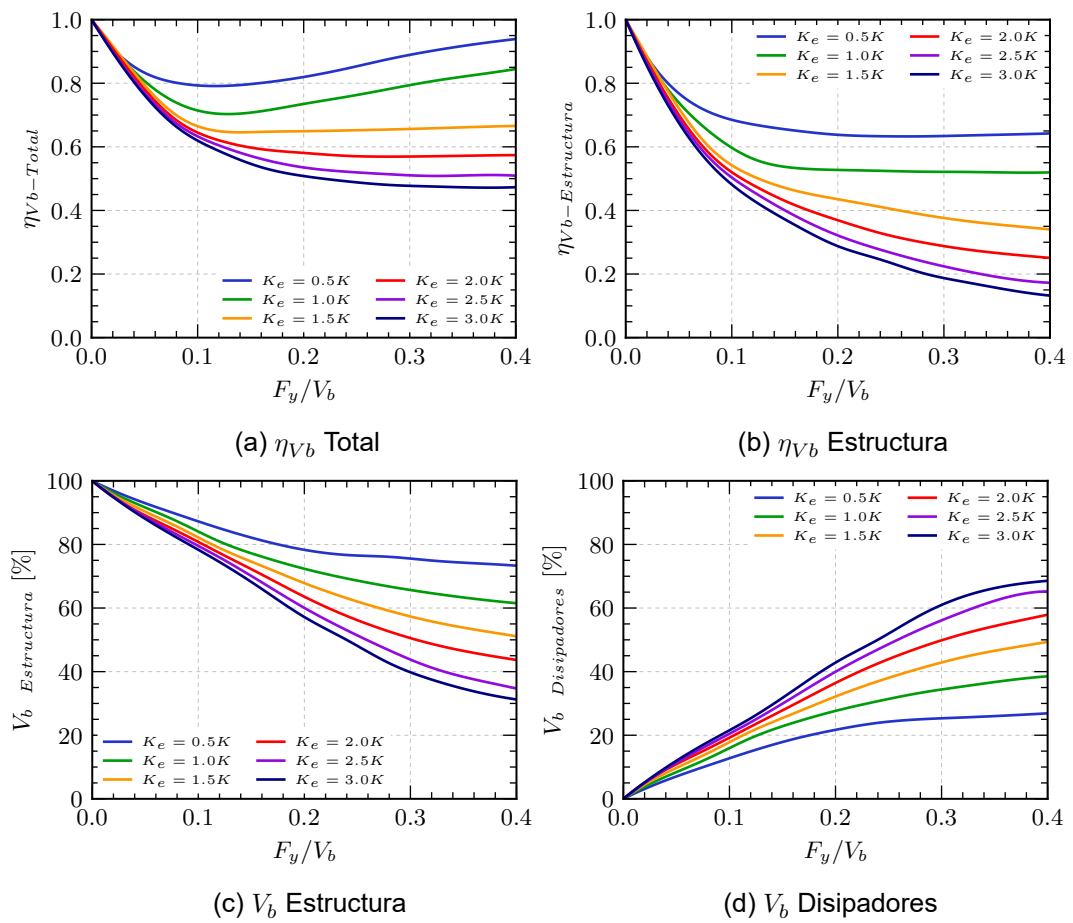


FIGURA N° 5.4: η_{V_b} en función de K_e y F_y - $n = 1$.

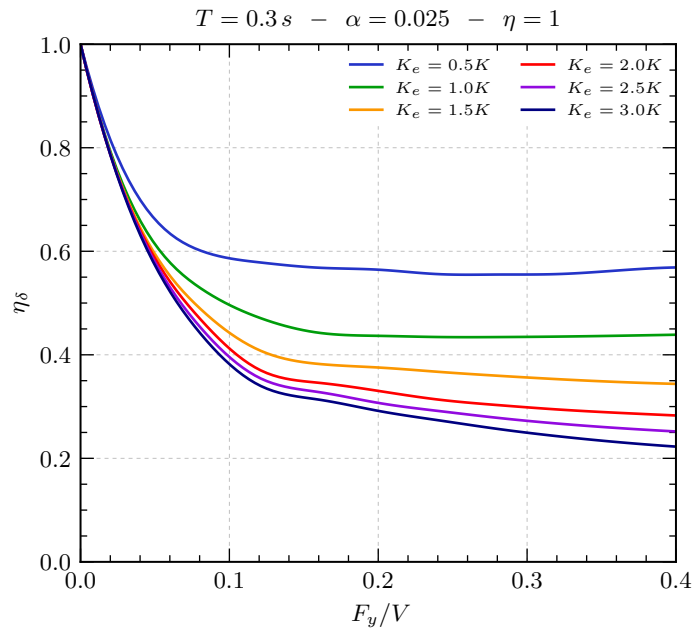


FIGURA N° 5.5: η_δ en función de K_e y F_y - $n = 3$.

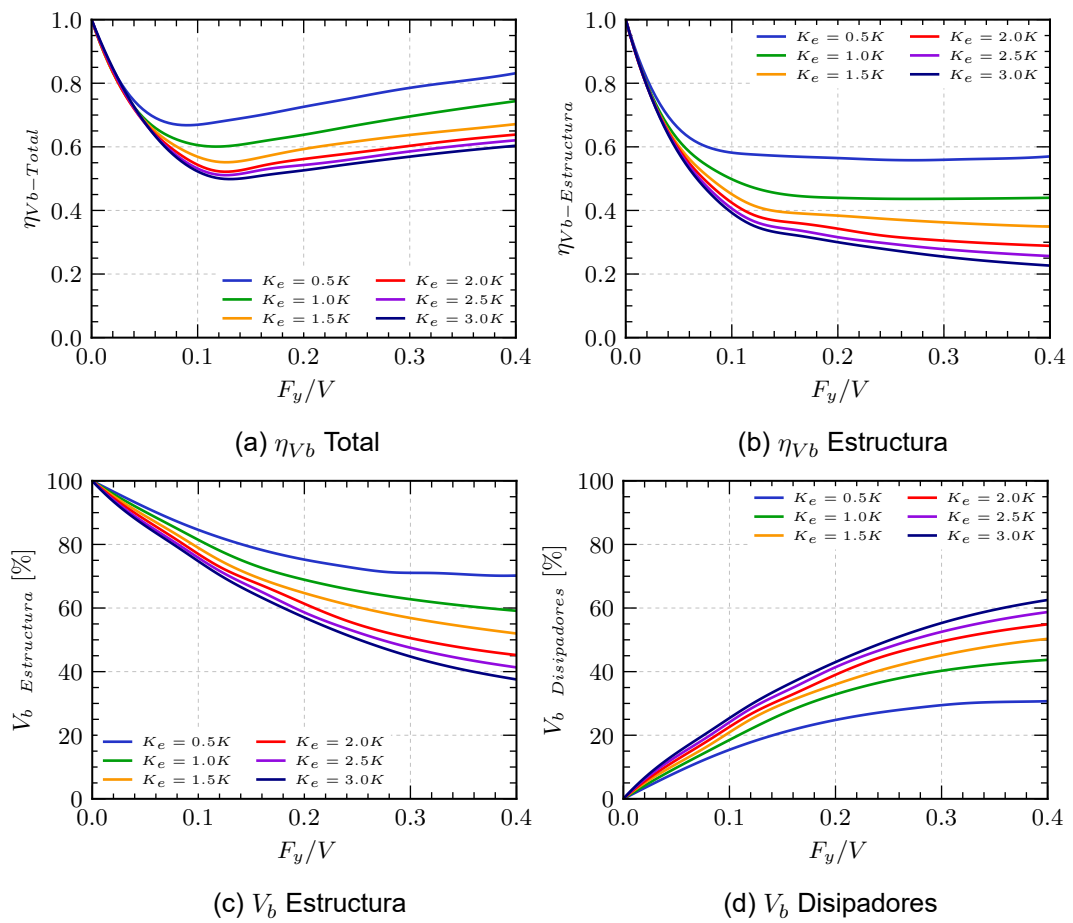


FIGURA N° 5.6: η_{V_b} en función de K_e y F_y - $n = 3$.

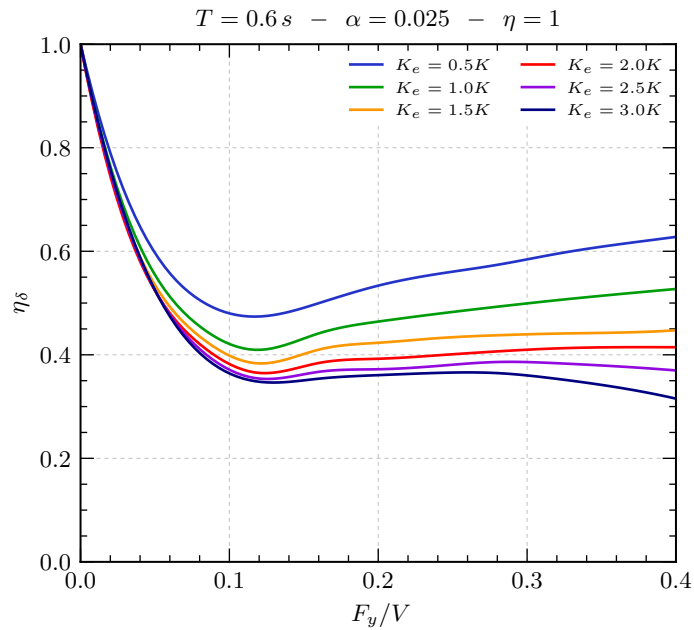


FIGURA N° 5.7: η_δ en función de K_e y F_y - $n = 6$.

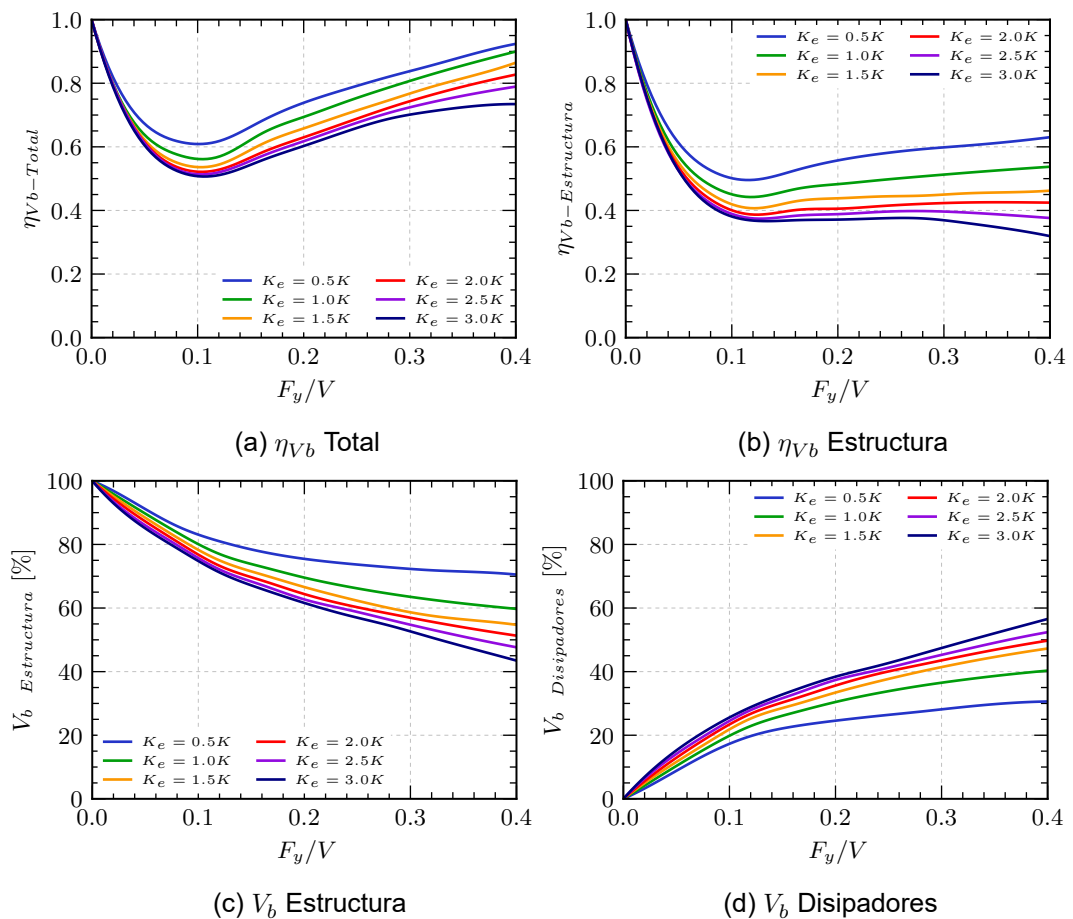


FIGURA N° 5.8: η_{V_b} en función de K_e y F_y - $n = 6$.

Asimismo, el parámetro α que representa la relación entre la rigidez postfluencia y la rigidez elástica de un disipador histerético toma, en la mayor parte de los disipadores que se pueden encontrar de manera comercial, valores tales que $\alpha \in [0.015; 0.025]$. Por último, el parámetro adimensional η que controla la forma del lazo histerético se puede suponer como $\eta \geq 1$ (valor recomendado por algunos fabricantes de disipadores histeréticos (Bozzo et al., 2019)).

– *Paso 4: Análisis tiempo historia final.*

Se realizará un análisis tiempo historia final considerando la incorporación de los disipadores histeréticos no lineales, con el fin de calcular las respuestas sísmicas y además para verificar si se logró alcanzar el factor de reducción objetivo del *Paso 1*.

Nota: Los gráficos mostrados en las Figuras N° 5.3 y N° 5.4 son el resultado de realizar muchos análisis tiempo historia a un sistema de 1 *GDL* que incorpora un disipador histerético con comportamiento no lineal. Para dichos análisis se ha usado la componente NS del registro sísmico de Lima de 1966, mostrado en la Figura N° 2.14, como aceleración en la base.

La Figura N° 5.3 muestra el factor de reducción de la deriva de entrepiso como una función de la fuerza de fluencia del disipador histerético normalizado respecto de la fuerza cortante basal, para diferentes valores de la rigidez elástica del disipador, que van desde $K_e = 0.5K$ a $K_e = 3.0K$, siendo K la rigidez lateral elástica del sistema sin DH. La Figura N° 5.4a y la Figura N° 5.4b presentan el factor de reducción de la fuerza cortante basal total y de la fuerza cortante basal que toma exclusivamente la estructura, respectivamente. En estas imágenes se puede apreciar que la fuerza cortante basal total tiende a incrementarse cuando se incorpora disipadores con fuerzas de fluencia altas, sin embargo, la fuerza que termina soportando la estructura tiende a reducirse. La fuerza cortante basal total se compone de una fuerza cortante basal que soporta la estructura y una fuerza cortante basal que soportan los disipadores histeréticos. En la Figura N° 5.4c y la Figura N° 5.4d se muestra como varían los porcentajes que representan cada fuerza cortante basal respecto de la fuerza cortante basal total. En dichas imágenes se aprecia claramente que el porcentaje de fuerza cortante basal que toman los disipadores histeréticos se incrementa conforme los DH tienen mayor fuerza de fluencia y mayor rigidez elástica.

Las Figuras N° 5.5 y N° 5.6 así como las Figuras N° 5.7 y N° 5.8 muestran gráficos similares a los descritos anteriormente con la única diferencia que fueron elaborados usando edificaciones de tres y seis niveles respectivamente.

5.4 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS

En esta sección se presenta a modo de ejemplo el predimensionamiento, el análisis y los resultados obtenidos para un modelo bidimensional de una edificación de tres niveles que incorpora disipadores histeréticos con comportamiento no lineal. Se empleará la componente NS del registro sísmico de Lima de 1966, mostrado en la Figura N° 2.14 , como aceleración en la base.

5.4.1 Predimensionamiento

Para realizar el predimensionamiento de la edificación en cuestión se hicieron algunas hipótesis; por ejemplo, se supuso igual peso para todos los niveles de la estructura. Por otro lado, también se supuso que todos los modos de vibración de la estructura tienen la misma fracción del amortiguamiento crítico. Asimismo, se fijó el periodo de la edificación usando la ecuación 2.20 con $f = 0.1$. Se supuso que la razón entre la rigidez postfluencia y la rigidez elástica (α) de todos los disipadores tiene el mismo valor. Además se usó que $\eta = 1$ para los DH de todos los niveles. A continuación, se muestran los cálculos realizados en el proceso de predimensionamiento.

- Datos iniciales.

$$T_1 = 0.3 \text{ s}; \quad \beta = 5\%; \quad n = 3$$

- Seguir los siguientes cuatro pasos:

– *Paso 1: Identificación del Factor de Reducción Objetivo.*

Se buscará reducir las derivas a la mitad, por lo tanto:

$$\eta_\delta = 0.5$$

– *Paso 2: Análisis Tiempo Historia de la Edificación sin Disipadores Histeréticos.*

Luego de realizar el análisis tiempo historia se obtiene:

$$V_1^{**} = 4.59 \text{ g}; \quad V_2^{**} = 3.98 \text{ g}; \quad V_3^{**} = 2.45 \text{ g}$$

$$K_1^{**} = 3200 \frac{1}{\text{s}^2}; \quad K_2^{**} = 1600 \frac{1}{\text{s}^2}; \quad K_3^{**} = 1600 \frac{1}{\text{s}^2}$$

Donde: V_i^{**} y K_i^{**} representa la fuerza cortante y la rigidez elástica del i -ésimo entrepiso.

Nota: Es preciso indicar que algunas propiedades fueron normalizadas respecto a la masa típica de cada nivel m . Estas propiedades normalizadas son fácilmente identificables pues tienen un superíndice en forma

de dos asteriscos (**). Por ejemplo, K_i^{**} es la rigidez de entrepiso normalizado respecto de la masa del entrepiso, por lo tanto $K_i^{**} = K_i/m$.

– *Paso 3: Identificación de los Parámetros que Definen a los Disipadores Histeréticos no Lineales.*

Observando la Figura N° 5.5 y teniendo $\eta_\delta = 0.5$ como factor de reducción objetivo, se tiene que $\kappa_1 = 1.0$ y $\kappa_2 = 0.10$. Entonces, al aplicar la ecuación 5.15 se obtiene:

$$\begin{aligned} F_{y1}^{**} &= \kappa_2 V_1 = 0.46 \text{ g} & K_{e1}^{**} &= \kappa_1 K_1 = 3200 \frac{1}{s^2} \\ F_{y2}^{**} &= \kappa_2 V_2 = 0.39 \text{ g} & K_{e2}^{**} &= \kappa_1 K_2 = 1600 \frac{1}{s^2} \\ F_{y3}^{**} &= \kappa_2 V_3 = 0.24 \text{ g} & K_{e3}^{**} &= \kappa_1 K_3 = 1600 \frac{1}{s^2} \end{aligned}$$

Asimismo, se considerará los parámetros $\alpha = 0.025$ y $\eta = 1$ para los disipadores histeréticos de cada uno de los niveles.

– *Paso 4: Análisis Tiempo Historia Final.*

Se realizó un análisis tiempo historia final, considerando el comportamiento no lineal de los disipadores, para obtener las respuestas sísmicas de la edificación.

A continuación, se muestra la Tabla N° 5.1 con los parámetros necesarios para definir el comportamiento histerético de Bouc-Wen de los disipadores histeréticos de cada nivel.

TABLA N° 5.1: Parámetros de los disipadores histeréticos

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Fuerza de fluencia normalizada	Primer nivel	F_{y1}^{**}	0.46
	Segundo Nivel	F_{y2}^{**}	0.39
	Tercer nivel	F_{y3}^{**}	0.24
Rigidez elástica normalizada	Primer nivel	K_{e1}^{**}	3200
	Segundo Nivel	K_{e2}^{**}	1600
	Tercer nivel	K_{e3}^{**}	1600
Relación de rigideces	Todos los niveles	α	0.025
Parámetro adimensional	Todos los niveles	η	1.0

5.4.2 Resultados

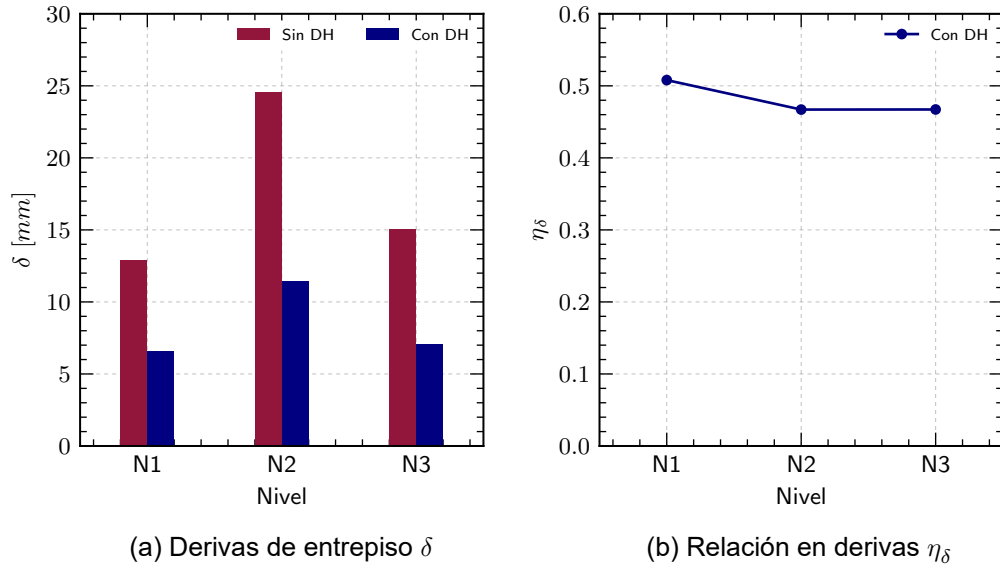


FIGURA N° 5.9: δ y η_δ en edificaciones con DH.

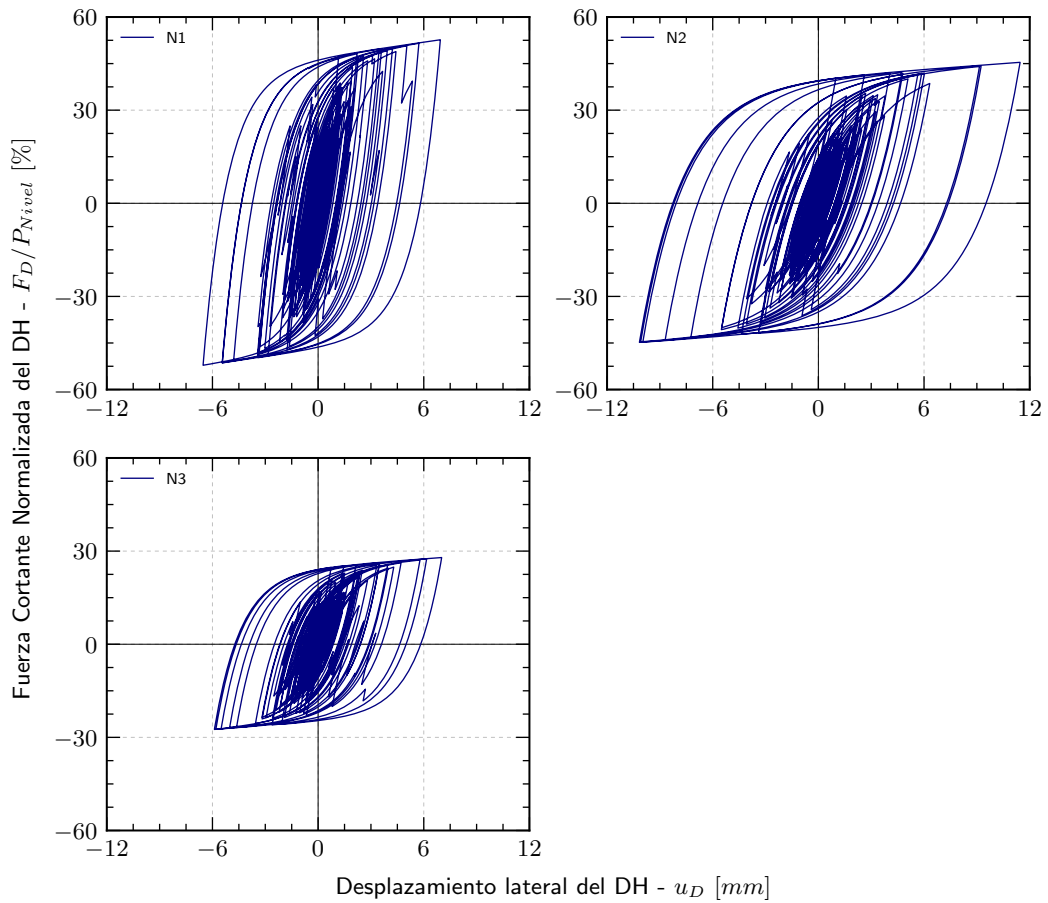


FIGURA N° 5.10: Histéresis de los DH.

Luego de aplicar el algoritmo mostrado en la Figura N° 5.2 usando los parámetros de la Tabla N° 5.1 se obtuvieron las respuestas sísmicas de la edificación. La Figura N° 5.9a muestra las derivas máximas tanto para la edificación que incorpora DH así como también para una edificación con las mismas propiedades pero sin DH. Asimismo, la Figura N° 5.9b presenta las relaciones entre las derivas de cada nivel. En dicha imagen se puede apreciar que el mayor valor de $\eta_\delta = 0.51$ con lo cual se demuestra que se logró obtener el factor de reducción objetivo.

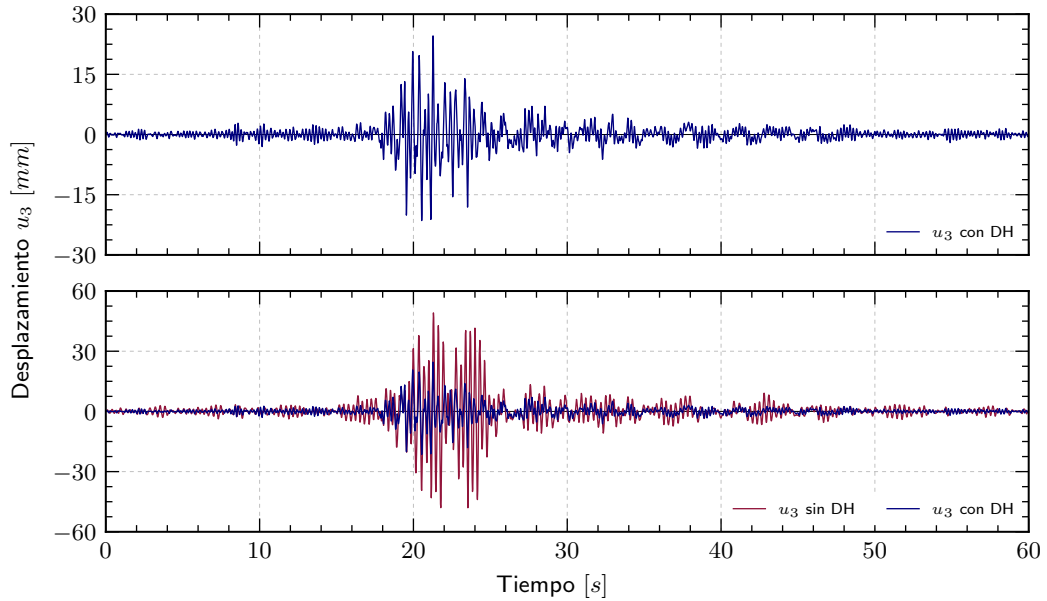


FIGURA N° 5.11: Desplazamiento del último nivel.

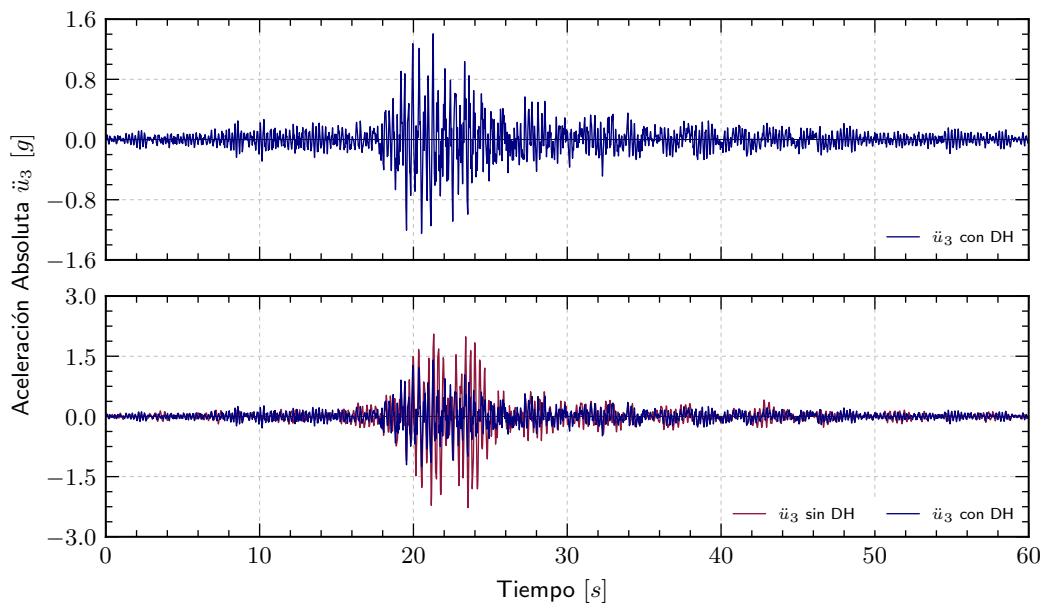


FIGURA N° 5.12: Aceleración absoluta del último nivel.

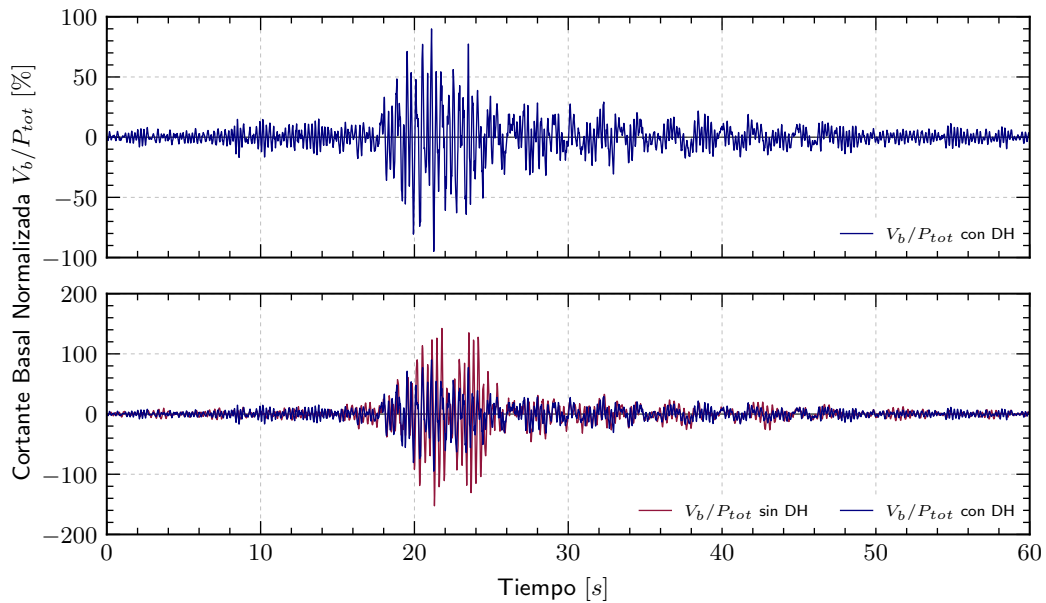


FIGURA N° 5.13: Fuerza cortante basal normalizada.

La Figura N° 5.10 presenta los diagrama de histéresis de los disipadores histeréticos no lineales instalados en cada uno de los tres niveles de la edificación. En dicha imagen se observa que en este caso el disipador del segundo nivel es el que presenta el mayor desplazamiento; además se aprecia que los disipadores del primer y tercer nivel experimentan desplazamientos similares. Por otro lado, las Figuras N° 5.11, N° 5.12 y N° 5.13 presentan las respuestas sísmicas de una edificación con DH en superposición con las respuestas de la misma edificación sin DH, con el objetivo de evidenciar de manera visual la reducción en las respuestas sísmicas.

La Tabla N° 5.2 muestra los resultados máximos, en valor absoluto, obtenidos para la edificación que incorpora disipadores histeréticos. De igual modo, la Tabla N° 3.3 presenta los resultados máximos de la misma edificación sin DH. Comparando las respuestas sísmicas de ambas tablas se observa que se logró una reducción del 50 %, 38 % y del 38 % en términos del desplazamiento del último nivel, la aceleración absoluta del último nivel y de la fuerza cortante basal normalizada respectivamente, estos resultados muestran la eficacia del uso de los DH.

TABLA N° 5.2: Resultados máximos de la edificación con DH

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Desplazamiento del último nivel	u_3	24.59	mm
Aceleración absoluta del último nivel	\ddot{u}_3	1.41	g
Fuerza cortante basal normalizada	V_b/P_{tot}	94.88	%

5.5 RESPUESTA SÍSMICA DE MODELOS SIMPLES

En esta sección se estudiarán modelos simplificados de edificaciones con diferente número de niveles que incorporan disipadores histeréticos, con el fin de conocer la eficiencia de este sistema de control pasivo en la reducción de las respuestas sísmicas. Se usará la componente NS del sismo de Lima del 1966 como aceleración basal para todos los casos. Se compararán las respuestas sísmicas obtenidas para la edificación con DH contra las respuestas sísmicas para la misma edificación sin DH. Asimismo, la fuerza cortante basal se normalizó respecto al peso total.

La reducción de la respuestas sísmicas se evaluará de la siguiente manera:

$$Reducción [\%] = \left(1 - \frac{Respuesta_{Con\ DH}}{Respuesta_{Sin\ DH}}\right) 100\% \quad (5.16)$$

$$\begin{aligned}
 3\ Niveles &= \begin{cases} \begin{cases} F_y^{**} G_1 \\ K_e^{**} G_1 \end{cases} \rightarrow Nivel : 1 \\ \begin{cases} F_y^{**} G_2 \\ K_e^{**} G_2 \end{cases} \rightarrow Nivel : 2 \\ \begin{cases} F_y^{**} G_3 \\ K_e^{**} G_3 \end{cases} \rightarrow Nivel : 3 \\ \vdots \end{cases} \\
 9\ Niveles &= \begin{cases} \begin{cases} F_y^{**} G_1 \\ K_e^{**} G_1 \end{cases} \rightarrow Niveles : 1, 2, 3 \\ \begin{cases} F_y^{**} G_2 \\ K_e^{**} G_2 \end{cases} \rightarrow Niveles : 4, 5, 6 \\ \begin{cases} F_y^{**} G_3 \\ K_e^{**} G_3 \end{cases} \rightarrow Niveles : 7, 8, 9 \\ \vdots \end{cases} \\
 18\ Niveles &= \begin{cases} \begin{cases} F_y^{**} G_1 \\ K_e^{**} G_1 \end{cases} \rightarrow Niveles : 1, 2, 3, 4, 5, 6 \\ \begin{cases} F_y^{**} G_2 \\ K_e^{**} G_2 \end{cases} \rightarrow Niveles : 7, 8, 9, 10, 11, 12 \\ \begin{cases} F_y^{**} G_3 \\ K_e^{**} G_3 \end{cases} \rightarrow Niveles : 13, 14, 15, 16, 17, 18 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Los DH se colocarán en todos los niveles de la edificación. Por tanto, para evitar usar muchos tipos de disipadores se optó por agruparlos, es así que en todas las edificaciones se usaron tres grupos de disipadores (cada grupo con las mismas características mecánicas). Lineas arriba se muestra como están conformados los grupos.

A continuación, se presentan las Tablas N° 5.3, N° 5.4, N° 5.5 y N° 5.6 con los parámetros que definen al comportamiento histerético de Bouc-Wen de los disipadores histeréticos para diferentes factores de reducción objetivo respecto a la deriva (η_δ), dichos parámetros se obtuvieron luego de aplicar el procedimiento descrito en la sección 5.3.

TABLA N° 5.3: Parámetros de los DH para $\eta_\delta = 0.4$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_1	s	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
$F_{y G1}^{**}$	g	0.48	0.61	1.55	0.70	0.99	1.07
$F_{y G2}^{**}$		0.42	0.52	1.25	0.54	0.87	0.97
$F_{y G3}^{**}$		0.26	0.31	0.69	0.33	0.51	0.66
$K_{e G1}^{**}$	$\frac{1}{s^2}$	6400	4800	7360	4320	6880	8000
$K_{e G2}^{**}$		3200	2400	3680	2160	3440	4000
$K_{e G3}^{**}$		3200	2400	3680	2160	3440	4000
α	-	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
η	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

TABLA N° 5.4: Parámetros de los DH para $\eta_\delta = 0.5$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_1	s	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
$F_{y G1}^{**}$	g	0.46	0.43	0.84	0.52	0.80	0.92
$F_{y G2}^{**}$		0.39	0.36	0.68	0.40	0.69	0.82
$F_{y G3}^{**}$		0.24	0.22	0.37	0.23	0.42	0.56
$K_{e G1}^{**}$	$\frac{1}{s^2}$	3200	2880	4800	3200	4000	4800
$K_{e G2}^{**}$		1600	1440	2400	1600	2000	2400
$K_{e G3}^{**}$		1600	1440	2400	1600	2000	2400
α	-	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
η	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

TABLA N° 5.5: Parámetros de los DH para $\eta_\delta = 0.6$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_1	s	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
$F_{y G1}^{**}$	g	0.25	0.27	0.39	0.40	0.46	0.41
$F_{y G2}^{**}$		0.22	0.23	0.31	0.31	0.40	0.36
$F_{y G3}^{**}$		0.14	0.14	0.17	0.18	0.23	0.24
$K_{e G1}^{**}$	$\frac{1}{s^2}$	2560	1600	2240	2560	3200	3200
$K_{e G2}^{**}$		1280	800	1120	1280	1600	1600
$K_{e G3}^{**}$		1280	800	1120	1280	1600	1600
α	-	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
η	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

TABLA N° 5.6: Parámetros de los DH para $\eta_\delta = 0.7$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_1	s	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
$F_{y G1}^{**}$	g	0.17	0.18	0.26	0.31	0.32	0.27
$F_{y G2}^{**}$		0.15	0.16	0.21	0.23	0.28	0.23
$F_{y G3}^{**}$		0.09	0.09	0.12	0.14	0.16	0.16
$K_{e G1}^{**}$	$\frac{1}{s^2}$	1280	960	1120	1200	2240	1280
$K_{e G2}^{**}$		640	480	560	600	1120	640
$K_{e G3}^{**}$		640	480	560	600	1120	640
α	-	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
η	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Finalmente, se debe precisar que el factor de reducción η_δ considerado para el predimensionamiento se calculó en todos los casos respecto al primer nivel, ya que como muestra la Figura N° 5.9b es en este nivel donde η_δ toma su mayor valor. Asimismo, los parámetros α y η se consideraron con un valor constante en todos los niveles de la edificación.

5.5.1 Importancia del Factor de Reducción

El factor de reducción η_δ es el cociente que resulta de dividir la deriva máxima de la edificación que incorpora DH entre la deriva máxima de la misma edificación sin DH. Este parámetro resulta ser un buen indicador para medir el nivel de reducción de las respuestas sísmicas que proveen los DH a la edificación. En un caso ideal

se pretendería que el factor de reducción tome el menor valor posible. Sin embargo, desde un enfoque práctico y considerando ciertas limitaciones se podrían usar factores de reducción entre 0.4 y 0.7 como objetivo de diseño.

TABLA N° 5.7: Fuerza cortante basal normalizada máxima

Fuerza Cortante basal normalizada - V_b/P_{tot} [%]					
N° de niveles	Sin DH	Factor de reducción			
		$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	152.46	81.35	95.59	103.99	114.52
6	101.47	53.43	59.90	67.92	76.37
9	71.77	43.05	45.76	49.22	53.90
12	51.07	27.79	30.67	34.32	38.56
15	37.73	23.59	25.35	27.23	29.65
18	30.08	19.36	20.74	21.49	23.09

TABLA N° 5.8: Desplazamiento máximo del último nivel

Desplazamiento del último nivel - u_n [mm]					
N° de niveles	Sin DH	Factor de reducción			
		$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	49.10	19.76	25.80	32.33	37.38
6	129.46	54.95	68.39	87.73	103.08
9	193.77	62.09	89.58	119.32	141.43
12	250.72	104.52	130.72	158.44	188.27
15	318.32	107.95	146.93	198.73	230.41
18	376.77	119.79	149.25	217.49	257.75

TABLA N° 5.9: Aceleración absoluta máxima del último nivel

Aceleración absoluta del último nivel - \ddot{u}_n [g]					
N° de niveles	Sin DH	Factor de reducción			
		$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	2.27	1.24	1.45	1.68	1.88
6	1.70	1.02	1.29	1.43	1.55
9	1.31	0.67	0.76	0.83	0.99
12	0.98	0.53	0.61	0.65	0.77
15	1.12	0.40	0.45	0.49	0.57
18	0.79	0.35	0.40	0.47	0.59

En las Tablas N° 5.7, N° 5.8 y N° 5.9 se muestran las respuestas sísmicas máximas obtenidas para edificaciones que incorporan disipadores histeréticos, que cuentan con diferentes números de niveles y usan cuatro factores de reducción distintos. Para obtener los valores presentados en estas tablas se trabajó con gráficos similares a los presentados en el apartado 5.4.2 para cada uno de los casos. De estos gráficos, que muestran las respuestas sísmicas que se obtienen como resultado de un análisis tiempo historia, se obtuvieron los máximos valores (en valor absoluto). Además las tablas anteriores también presentan las respuestas sísmicas para edificaciones con diferentes número de niveles pero que no incorporan disipadores histeréticos.

Valiéndose de los resultados anteriormente mostrados y haciendo uso de la ecuación 5.16 se obtuvieron los porcentajes de reducción para cada una de las respuestas sísmicas, los cuales se muestran a continuación en las Tablas N° 5.10, N° 5.11 y N° 5.12.

TABLA N° 5.10: Reducción de la fuerza cortante basal normalizada

Reducción de la fuerza cortante basal [%]				
N° de niveles	Factor de reducción			
	$\eta_{\delta} = 0.4$	$\eta_{\delta} = 0.5$	$\eta_{\delta} = 0.6$	$\eta_{\delta} = 0.7$
3	46.64	37.30	31.79	24.88
6	47.35	40.97	33.06	24.73
9	40.02	36.25	31.43	24.90
12	45.59	39.95	32.78	24.50
15	37.49	32.82	27.83	21.43
18	35.65	31.03	28.56	23.25

TABLA N° 5.11: Reducción del desplazamiento del último nivel

Reducción del desplazamiento [%]				
N° de niveles	Factor de reducción			
	$\eta_{\delta} = 0.4$	$\eta_{\delta} = 0.5$	$\eta_{\delta} = 0.6$	$\eta_{\delta} = 0.7$
3	59.75	47.46	34.16	23.87
6	57.56	47.17	32.23	20.38
9	67.96	53.77	38.42	27.01
12	58.31	47.86	36.81	24.91
15	66.09	53.84	37.57	27.62
18	68.21	60.39	42.27	31.59

TABLA N° 5.12: Reducción de la aceleración absoluta del último nivel

Reducción de la aceleración absoluta [%]				
N° de niveles	Factor de reducción			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	45.48	36.30	25.80	17.23
6	39.68	23.87	15.71	8.63
9	48.68	42.38	36.49	24.35
12	45.76	37.69	34.19	21.26
15	64.01	59.59	55.82	48.74
18	56.38	49.47	40.25	25.48

Para un mejor entendimiento de los resultados presentados en las Tablas N° 5.10, N° 5.11 y N° 5.12 se procede a elaborar gráficos que muestren de manera visual la importancia del factor de reducción en las respuestas sísmicas de edificaciones que incorporan DH. De las Figuras N° 5.14, N° 5.15 y N° 5.16 se concluye que la reducción de las respuestas sísmicas, en líneas generales, se incrementa conforme disminuye el factor de reducción. Por otro lado, se puede observar también que, independientemente del número de niveles de la edificación, el porcentaje de reducción de la fuerza cortante basal normalizada y del desplazamiento del último nivel se mantienen prácticamente constante para cada factor de reducción.

Por último, la Figura N° 5.14 muestra que se puede lograr porcentajes de reducción de la fuerza cortante basal normalizada entre 20 y 45%. Además, la Figura N° 5.15 muestra que es posible obtener porcentajes de reducción del desplazamiento del último nivel con valores entre 20-65%, siendo las mayores reducciones producto de los factores de reducción objetivo más bajos. Finalmente, la Figura N° 5.16 es la que presenta mayor dispersión, ya que muestra que los porcentajes de reducción de la aceleración absoluta del último nivel tiene valores comprendidos dentro del intervalo de 10-65%.

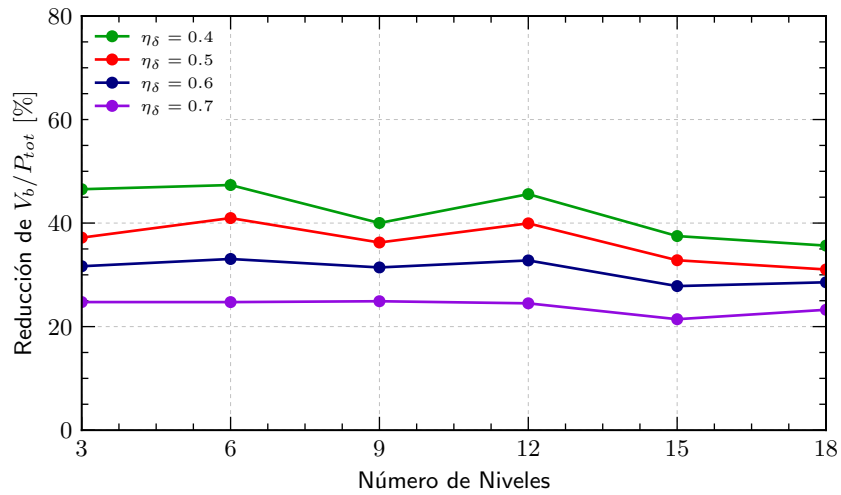


FIGURA N° 5.14: Reducción de la fuerza cortante basal normalizada.

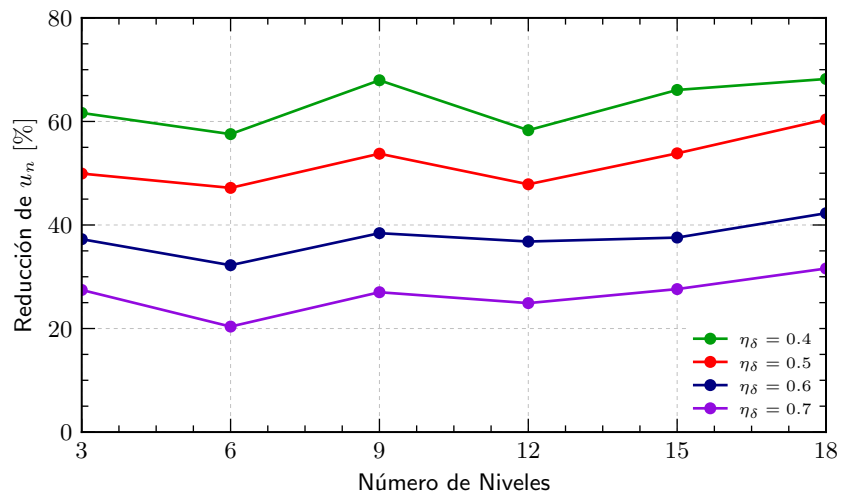


FIGURA N° 5.15: Reducción del desplazamiento del último nivel.

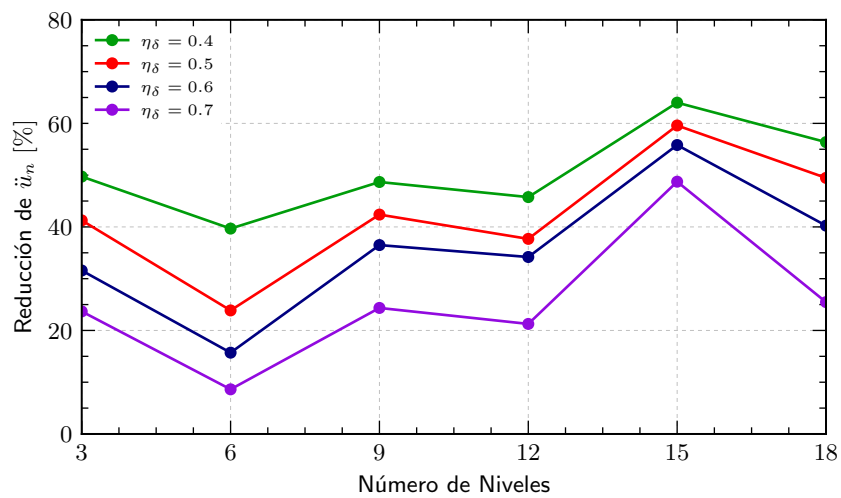


FIGURA N° 5.16: Reducción de la aceleración absoluta del último nivel.

5.5.2 Influencia del Periodo Fundamental de la Edificación

Los disipadores histeréticos aportan rigidez lateral a la edificación donde fueron instalados, por lo tanto, resulta de interés estudiar el papel que juega la rigidez intrínseca de la estructura en la reducción de las respuestas sísmicas en edificaciones con DH. Como ya se mencionó en el apartado 4.5.3, el periodo fundamental (T) se puede usar como parámetro para representar en cierto modo la rigidez de una edificación. Por lo tanto, en la presente subsección se estudiarán edificaciones con periodos fundamentales $T = 0.05n$, $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$, siendo n es el número de niveles de la edificación.

En todos los casos que se estudiarán el único parámetro que se variará es el periodo fundamental de la edificación. Además, se usarán disipadores histeréticos que tengan las propiedades dadas en las Tablas N° 5.3, N° 5.4, N° 5.5 y N° 5.6. En la Tabla N° 4.19 se muestran las repuestas sísmicas de edificaciones con diferentes número de niveles sin disipadores histeréticos para $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$.

TABLA N° 5.13: Fuerzas cortantes basales normalizada - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$

Fuerza cortante basal normalizada - V_b/P_{tot} [%]								
N° de niveles	$T = 0.05n$				$T = 0.15n$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	133.4	131.8	136.0	140.5	68.8	88.8	104.1	112.0
6	112.5	117.1	120.4	128.3	47.4	47.3	49.4	51.0
9	104.2	113.6	124.1	133.0	28.3	27.6	29.1	34.3
12	68.2	78.6	83.5	84.9	18.8	20.3	21.6	22.0
15	58.5	61.6	66.4	70.1	17.7	18.3	16.4	17.1
18	48.6	52.2	56.4	61.6	16.5	15.1	14.1	14.0

TABLA N° 5.14: Desplazamiento del último nivel - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$

Desplazamiento del último nivel - u_n [mm]								
N° de niveles	$T = 0.05n$				$T = 0.15n$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	8.8	9.3	10.8	11.3	32.6	48.6	61.6	70.5
6	34.0	37.8	41.3	46.8	75.1	94.2	114.1	134.8
9	58.8	69.5	81.1	88.0	70.1	83.0	159.2	203.0
12	83.1	96.2	104.9	115.9	119.8	129.8	172.1	216.2
15	116.3	122.3	135.3	143.8	101.0	113.0	191.8	263.0
18	102.9	117.3	149.0	166.1	106.2	147.4	227.8	282.1

TABLA N° 5.15: Aceleración absoluta del último nivel - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$

Aceleración absoluta del último nivel - \ddot{u}_n [g]								
N° de niveles	$T = 0.05n$				$T = 0.15n$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	1.73	1.78	2.05	2.12	1.07	1.40	1.49	1.60
6	1.96	2.30	2.37	2.45	0.86	0.85	0.84	0.90
9	1.65	1.74	1.74	1.84	0.50	0.43	0.51	0.56
12	1.62	1.73	1.79	1.88	0.35	0.35	0.36	0.46
15	1.16	1.18	1.37	1.44	0.30	0.28	0.30	0.31
18	0.80	0.84	1.03	1.14	0.27	0.27	0.30	0.30

Por otro lado, las Tablas N° 5.13, N° 5.14 y N° 5.15 presentan las respuestas sísmicas para edificaciones que incorporan DH y tienen periodos fundamentales $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$.

TABLA N° 5.16: Reducción de la fuerza cortante basal - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$

Reducción de la fuerza cortante basal normalizada [%]								
N° de niveles	$T = 0.05n$				$T = 0.15n$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	17.1	18.1	15.5	12.7	51.7	37.7	26.9	21.4
6	22.9	19.8	17.5	12.1	35.0	35.1	32.3	29.9
9	30.1	23.8	16.8	10.8	33.8	35.4	31.9	19.9
12	33.2	23.0	18.2	16.8	37.8	32.6	28.5	26.9
15	22.0	17.9	11.4	6.5	30.6	28.3	35.5	33.0
18	31.0	25.9	20.0	12.5	21.3	28.1	32.6	33.4

TABLA N° 5.17: Reducción del desplazamiento del último nivel - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$

Reducción del desplazamiento del último nivel [%]								
N° de niveles	$T = 0.05n$				$T = 0.15n$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	32.1	27.7	16.4	12.1	66.8	50.5	37.3	28.3
6	34.0	26.8	19.8	9.2	61.3	51.4	41.2	30.5
9	38.9	27.7	15.7	8.6	77.9	73.8	49.8	36.0
12	36.4	26.4	19.7	11.3	68.3	65.6	54.4	42.7
15	29.9	26.3	18.5	13.4	79.5	77.0	61.1	46.6
18	47.0	39.6	23.3	14.5	80.0	72.3	57.2	47.0

TABLA N° 5.18: Reducción de la aceleración del último nivel - $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$

Reducción de la aceleración absoluta del último nivel [%]								
N° de niveles	$T = 0.05n$				$T = 0.15n$			
	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$	$\eta_\delta = 0.4$	$\eta_\delta = 0.5$	$\eta_\delta = 0.6$	$\eta_\delta = 0.7$
3	23.4	21.2	9.5	6.3	51.2	36.5	32.1	27.2
6	24.0	11.0	8.1	5.0	36.3	36.8	37.3	32.9
9	20.8	16.5	16.6	11.8	52.1	58.7	51.2	45.6
12	16.3	10.8	7.5	3.2	54.9	54.8	54.0	41.3
15	35.3	34.4	24.0	19.9	65.6	68.0	65.4	64.2
18	39.8	36.5	22.2	13.4	61.5	62.2	58.1	57.5

Con los resultados que se muestran en las Tablas N° 5.13, N° 5.14 y N° 5.15 y haciendo uso de la ecuación 5.16 se obtuvieron los porcentajes de reducción para cada una de las respuestas sísmicas para periodos fundamentales $T = 0.05n$ y $T = 0.15n$. Estos porcentajes de reducción se presentan en las las Tablas N° 5.16, N° 5.17 y N° 5.18. A continuación, en las Figuras N° 5.17, N° 5.18 y N° 5.19 se muestran gráficamente las reducciones alcanzadas por edificaciones que incorporan DH y tienen periodos fundamentales $T = 0.05n$, $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$.

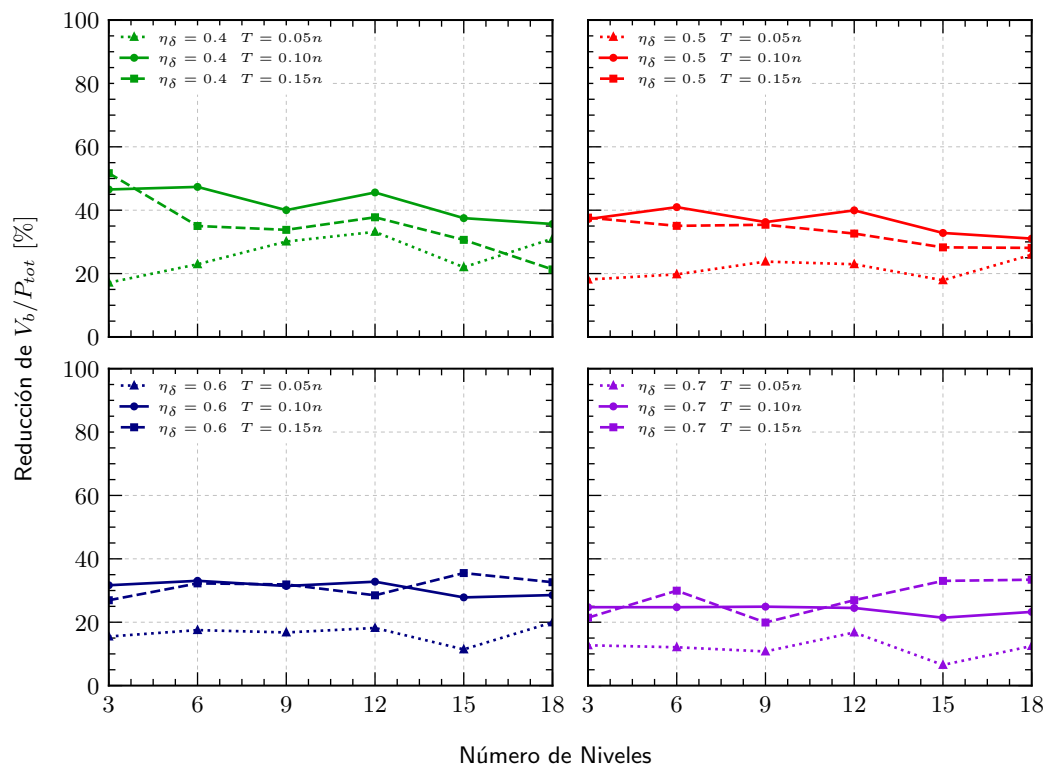


FIGURA N° 5.17: Reducción de la cortante basal - $T = 0.05n$, $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$.

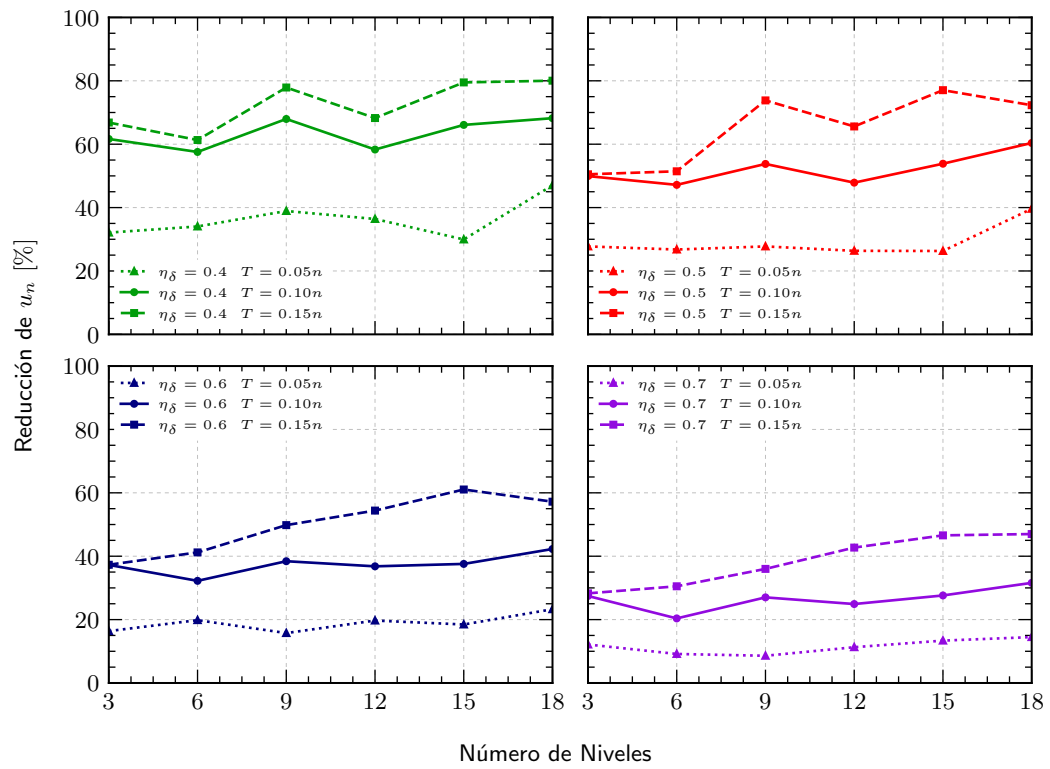


FIGURA N° 5.18: Reducción de u_n - $T = 0.05n$, $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$.

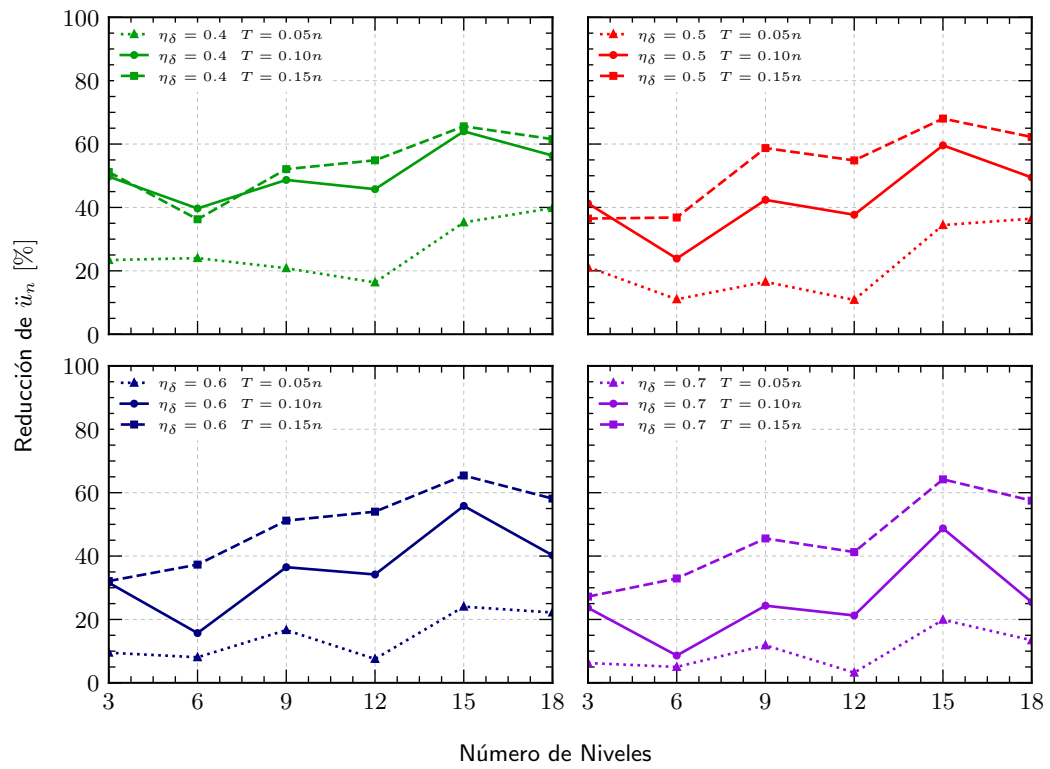


FIGURA N° 5.19: Reducción de \dot{u}_n - $T = 0.05n$, $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$.

En las Figuras N° 5.18 y N° 5.19 se puede observar que para factores de reducción objetivo bajos ($\eta_\delta = 0.4$) los porcentajes de reducción alcanzados para las edificaciones con $T = 0.10n$ y $T = 0.15n$ son prácticamente iguales con relación al desplazamiento y la aceleración absoluta del último nivel. Por otro lado, en las tres figuras anteriores se aprecia claramente que se logran mayores reducciones, con respecto a la fuerza cortante basal normalizada, al desplazamiento y la aceleración absoluta del último nivel, para edificaciones flexibles (mayores periodos) en comparación con las edificaciones rígidas (menores periodos). Esto se explica por el hecho que los disipadores histeréticos funcionan gracias al desplazamiento relativo entre sus extremos y en edificaciones flexibles se logran mayores desplazamientos y por ende los disipadores trabajan de manera más efectiva.

5.6 COMENTARIOS FINALES

En este capítulo se estudiaron modelos simplificados bidimensionales de edificaciones que incorporan disipadores histeréticos, para cuatro factores de reducción objetivo distintos. Con base en los resultados obtenidos se puede afirmar lo siguiente.

- Usando el procedimiento presentado en el apartado 5.3 se logra realizar un predimensionamiento adecuado de los disipadores histeréticos que se instalarán en una edificación. Es preciso indicar que los gráficos usados en este procedimiento son el resultado de realizar una serie de ATHNL a modelos simplificados de edificaciones que incorporan DH con comportamiento de Bouc Wen.
- Como era de esperarse, las respuestas sísmicas se reducen conforme disminuye el factor de reducción objetivo (η_δ). Además, las reducciones respecto a la fuerza cortante basal y al desplazamiento son prácticamente independientes del número de niveles de la edificación y dependen únicamente del valor de η_δ .
- La tendencia general es obtener mayores reducciones en edificaciones flexibles (periodo altos) que incorporan DH en comparación con las edificaciones rígidas (periodos bajos) con DH. Sin embargo, esta tendencia desaparece cuando se usan factores de reducción objetivo bajos, ya que para estos casos una mayor flexibilidad no garantiza un mayor porcentaje de reducción de las respuestas sísmicas.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS SÍSMICO DE EDIFICACIONES CON AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADA

En este capítulo se estudiarán modelos simplificados de edificaciones que incorporan amortiguadores de masa sintonizada (AMS). Se usará un modelo de masas concentradas con n GDL con comportamiento lineal y elástico, con una masa adicional en el nivel superior conectada a la estructura principal mediante un elemento de tipo *link* con comportamiento lineal y caracterizado por una rigidez y un amortiguamiento específico. El objetivo de este capítulo es observar la incidencia en la respuesta sísmica que tienen variables como la razón de masa y la fracción de amortiguamiento crítico del AMS, así como también mostrar las reducciones en las fuerzas cortantes basales, las aceleraciones y los desplazamientos para edificaciones con diferente número de niveles que incorporen AMS.

6.1 ECUACIONES DE EQUILIBRIO

La Figura N° 6.1 representa a una edificación con un amortiguador de masa sintonizada sujeta a una aceleración horizontal del suelo dada por \ddot{u}_g . La estructura tiene n GDL dinámicos, que representan el desplazamiento de los n niveles respecto del suelo, los cuales se recogen en el vector $\mathbf{u}_s(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)]^T$. Por otro lado, el AMS es representado por un grado de libertad adicional que viene dado por u_a relativo al suelo.

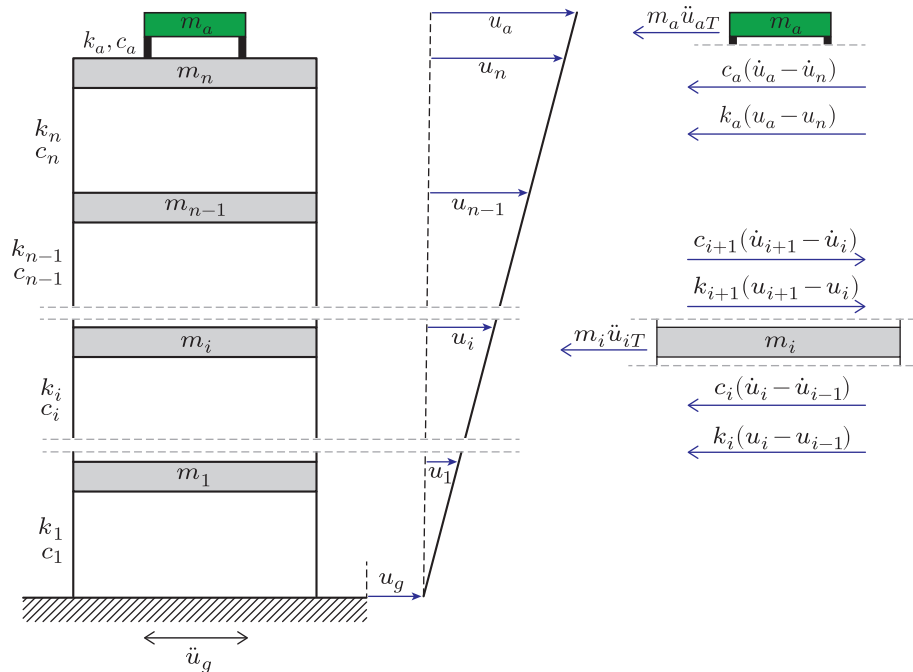


FIGURA N° 6.1: Edificación con amortiguador de masa sintonizada.

En la figura anterior se observa que:

$$u_{iT} = u_g + u_i \quad \rightarrow \quad \ddot{u}_{iT} = \ddot{u}_g + \ddot{u}_i \quad (6.1a)$$

$$u_{aT} = u_g + u_a \quad \rightarrow \quad \ddot{u}_{aT} = \ddot{u}_g + \ddot{u}_a \quad (6.1b)$$

Además, del diagrama de cuerpo libre de la i ésima masa de la Figura N° 6.1 se tiene:

$$m_i \ddot{u}_{iT} + c_i(\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}) + k_i(u_i - u_{i-1}) - c_{i+1}(\dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i) - k_{i+1}(u_{i+1} - u_i) = 0 \quad (6.2)$$

Por otro lado, considerando el diagrama de cuerpo libre de la masa m_a se tiene:

$$m_a \ddot{u}_{aT} + c_a(\dot{u}_a - \dot{u}_n) + k_a(u_a - u_n) = 0 \quad (6.3)$$

Remplazando la ecuación 6.1 en 6.2 y 6.3, reordenando y simplificando se puede llegar a una expresión matricial de la forma:

$$\overline{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \overline{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \overline{K}\mathbf{u}(t) = -\mathbf{v}\ddot{u}_g(t) \quad (6.4)$$

Donde:

$$\overline{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & m_a \end{bmatrix}; \quad \overline{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & 0 \end{bmatrix} + c_a \mathbf{P}; \quad \overline{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0}^T & 0 \end{bmatrix} + k_a \mathbf{P}; \quad (6.5a)$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s(t) \\ u_a(t) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}\boldsymbol{\tau} \\ m_a \end{bmatrix}; \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}^* & \mathbf{0}^{**} \\ \mathbf{0}^{**T} & \mathbf{T} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.5b)$$

En la ecuación 6.5, las matrices $\mathbf{0}$, $\mathbf{0}^*$ y $\mathbf{0}^{**}$ tienen todos sus términos iguales a cero y son de orden $n \times 1$, $(n-1) \times (n-1)$, $(n-1) \times 2$, respectivamente. Asimismo, \mathbf{M} es la matriz de masa y se obtiene de la ecuación 2.25, \mathbf{C} es la matriz de amortiguamiento y viene dado por la ecuación 2.28, \mathbf{K} es la matriz de rigidez producto de la ecuación 2.26 y finalmente $\boldsymbol{\tau} = [1, 1, \dots, 1]^T$ es un vector de $n \times 1$.

6.2 ALGORITMO DE INTEGRACIÓN NUMÉRICA

6.2.1 Formulación Incremental del Método de Diferencia Central

Tal como se presentó en el apartado 4.2.1, cuando se usa el método de diferencia central el desplazamiento en el tiempo $\Delta t + t$ se obtiene al sustituir las relaciones para \ddot{u}_i y \dot{u}_i , dadas en las ecuaciones 4.9 y 4.10, dentro de la ecuación 6.4.

$$\mathbf{u}_{i+1} = [\hat{\mathbf{M}}]^{-1} [-\mathbf{v}\ddot{u}_{g_i} - (\overline{\mathbf{K}} - a_2\overline{\mathbf{M}})\mathbf{u}_i - (a_0\overline{\mathbf{M}} - a_1\overline{\mathbf{C}})\mathbf{u}_{i-1}] \quad (6.6)$$

En la ecuación 6.6, $\hat{M} = a_0 \bar{M} + a_1 \bar{C}$ es una matriz constante de orden $n + 1$. Asimismo, los valores de a_0 , a_1 y a_2 vienen dados por la ecuación 4.12.

6.2.2 Algoritmo de Solución para Edificaciones con Amortiguadores de Masa Sintonizada

A continuación se describe el algoritmo numérico seguido para calcular la respuesta sísmica de una edificación que incorpora AMS.

1. Definir los parámetros dinámicos de la estructura, como son el número de niveles, el periodo fundamental y el porcentaje de amortiguamiento crítico.

$$n, T, \beta$$

2. Definir los parámetros dinámicos del AMS, tales como el periodo de sintonización, la razón de masa (m_a/m_{tot}) y la fracción de amortiguamiento crítico.

$$T_a, r_a, \beta_a$$

3. Definir el registro sísmico que se usará.

$$\ddot{\mathbf{u}}_g; N = \text{len}(\ddot{\mathbf{u}}_g)$$

4. Calcular la masa, la rigidez y el amortiguamiento del AMS.

$$m_a = r_a m_{tot}, \quad k_a = \left(\frac{2\pi}{T_a}\right)^2 m_a, \quad c_a = 2\sqrt{k_a m_a} \beta_a$$

5. Asignar los valores iniciales del sistema.

$$\mathbf{u}_0 = \dot{\mathbf{u}}_0 = \ddot{\mathbf{u}}_0 = \mathbf{0}$$

6. Asignar la condición inicial para calcular el primer valor del desplazamiento.

$$\mathbf{u}_{-1} = \mathbf{u}_0 - \Delta t \cdot \dot{\mathbf{u}}_0 + a_3 \cdot \ddot{\mathbf{u}}_0$$

7. Formar la matriz de masa efectiva.

$$\hat{M} = a_0 \bar{M} + a_1 \bar{C}$$

Para $i \in [1; N]$ se realizarán los pasos 8 y 9.

8. Calcular el desplazamiento para el tiempo $\Delta t + t$ (ecuación 6.6).

$$\mathbf{u}_{i+1} = [\hat{\mathbf{M}}]^{-1} [-v\ddot{u}_{g\ i} - (\bar{\mathbf{K}} - a_2\bar{\mathbf{M}})\mathbf{u}_i - (a_0\bar{\mathbf{M}} - a_1\bar{\mathbf{C}})\mathbf{u}_{i-1}]$$

9. Calcular la velocidad y aceleración para el tiempo t (ecuaciones 4.9 y 4.10).

$$\ddot{\mathbf{u}}_i \approx \frac{1}{(\Delta t)^2}(\mathbf{u}_{i-1} - 2\mathbf{u}_i + \mathbf{u}_{i+1})$$

$$\dot{\mathbf{u}}_i \approx \frac{1}{2\Delta t}(\mathbf{u}_{i+1} - \mathbf{u}_{i-1})$$

10. Determinar los valores máximos de interés y almacenarlos.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo del algoritmo usado para calcular la respuesta sísmica de una edificación con un amortiguador de masa sintonizada.

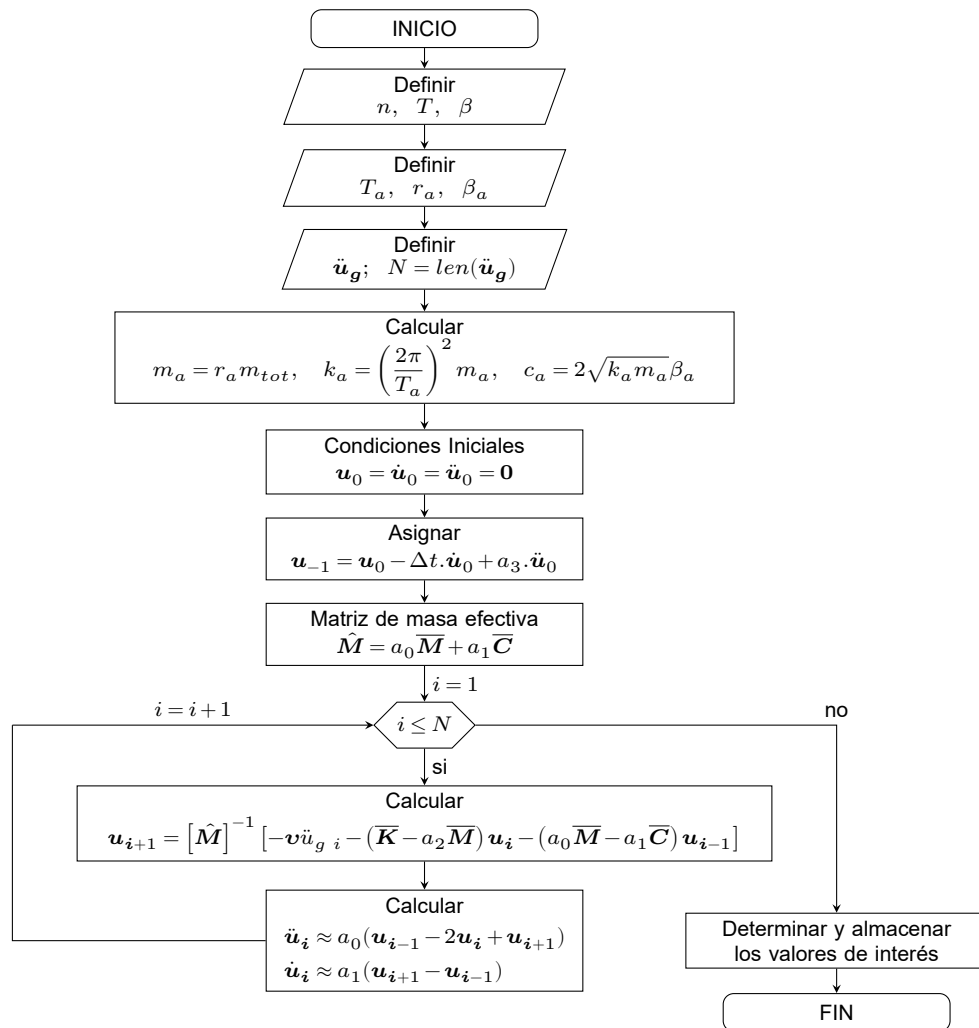


FIGURA N° 6.2: Algoritmo de solución para edificaciones con AMS.

6.3 PREDIMENSIONAMIENTO DE LOS DISPOSITIVOS

A continuación se describe el procedimiento mostrado por Inga (2015) para realizar el predimensionamiento de los amortiguadores de masa sintonizada que se acoplará en las edificaciones. Es preciso indicar que este procedimiento fue planteado considerando que el AMS será instalado únicamente en el último nivel y presentará un comportamiento lineal y elástico.

- Asignar el valor del periodo fundamental de la edificación, el porcentaje de amortiguamiento crítico y el número de niveles.

$$T_1; \beta; n \quad (6.7)$$

- Asignar el valor del periodo de sintonización, la razón de masa y la fracción de amortiguamiento crítico del AMS.

$$T_a = T_1; r_a; \beta_a \quad (6.8)$$

Nota: El AMS se sintonizará con el primer modo de vibración de la edificación, por tal motivo, el periodo de sintonización será igual al periodo fundamental.

- Calcular la masa del AMS, la cual será un porcentaje de la masa total de la edificación. Por lo general se toma porcentajes en el rango del 1% - 4%, esto debido a que la masa irá colocada en el último nivel de la estructura principal y por lo tanto no debe ser tan grande.

$$m_a = r_a m_{tot} \quad (6.9)$$

- Calcular la rigidez del AMS, tomando al AMS como un sistema de un grado de libertad aislado e independiente, con un periodo igual al periodo fundamental de la edificación.

$$k_a = \left(\frac{2\pi}{T_a} \right)^2 m_a \quad (6.10)$$

- Calcular el amortiguamiento del AMS, suponiendo de igual manera que se trata de un sistema de un grado de libertad aislado e independiente.

$$c_a = 2\sqrt{k_a m_a} \beta_a \quad (6.11)$$

6.4 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS

En esta sección se presentan a modo de ejemplo el predimensionamiento el análisis y los resultados obtenidos para una edificación de tres niveles que incorpora un

amortiguador de masa sintonizada con comportamiento lineal. Se empleará la componente NS del registro sísmico de Lima de 1966, mostrado en la Figura N° 2.14 , como aceleración en la base.

6.4.1 Predimensionamiento

Para realizar el predimensionamiento de la edificación en cuestión se hicieron algunas suposiciones. Por ejemplo, se consideró que los pesos de todos los niveles de la estructura son iguales. Por otro lado, también se supuso que todos los modos de vibración de la estructura tienen igual fracción del amortiguamiento crítico. Asimismo, se calculó el periodo de la edificación usando la ecuación 2.20, para $f = 0.1$. A continuación, se muestran los cálculos realizados en el proceso de predimensionamiento.

- Datos iniciales.

$$T_1 = 0.3 \text{ s}; \quad \beta = 5\%; \quad n = 3$$

- Periodo de sintonización, razón de masa y fracción de amortiguamiento crítico del AMS.

$$T_a = T_1 = 0.3 \text{ s}; \quad r_a = 2\%; \quad \beta_a = 10\%$$

- Masa del AMS.

$$m_a^{**} = r_a m_{tot}^{**} = 0.06$$

- Rigidez del AMS.

$$k_a^{**} = \left(\frac{2\pi}{T_a} \right)^2 m_a^{**} = 26.32 \frac{1}{s^2}$$

- Amortiguamiento del AMS.

$$c_a^{**} = 2\sqrt{k_a^{**} m_a^{**}} \beta_a = 0.25 \frac{1}{s}$$

Nota: Es preciso indicar que algunas propiedades fueron normalizadas respecto a la masa típica de cada nivel m , estas propiedades normalizadas son fácilmente identificables pues tienen un superíndice en forma de dos asteriscos (**) respectivamente. Por ejemplo, k_a^{**} es la rigidez del AMS normalizada respecto de la masa del entrepiso, por lo tanto $k_a^{**} = k_a/m$.

A continuación, se muestra la Tabla N° 6.1 con los parámetros necesarios para definir al amortiguador de masa sintonizada que se incorporará a la edificación.

TABLA N° 6.1: Parámetros del amortiguador de masa sintonizada

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Masa normalizada del AMS	m_a^{**}	0.06	-
Rigidez normalizada del AMS	k_a^{**}	26.32	$1/s^2$
Amortiguamiento normalizado del AMS	c_a^{**}	0.25	$1/s$

6.4.2 Resultados

Luego de aplicar el algoritmo mostrado en la Figura N° 6.2 usando los parámetros de la Tabla N° 6.1 se obtuvieron las respuestas sísmicas de la edificación. Así por ejemplo, la Figura N° 6.3 presenta el desplazamiento relativo del AMS respecto al último nivel $u'_a = u_a - u_3$.

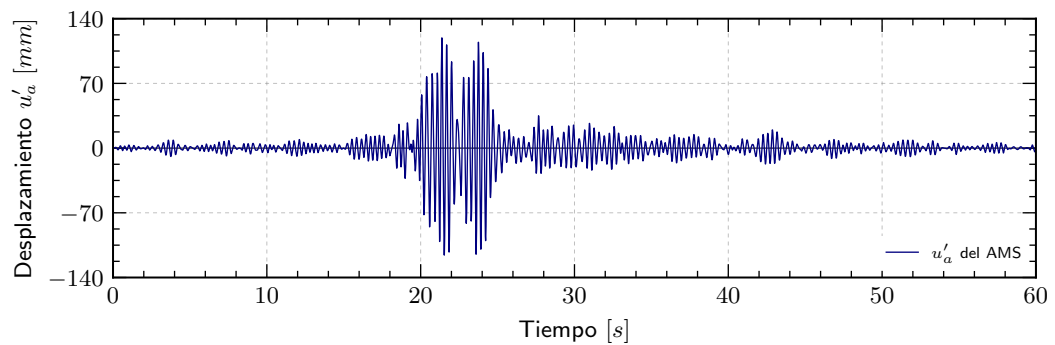


FIGURA N° 6.3: Desplazamiento relativo del AMS.

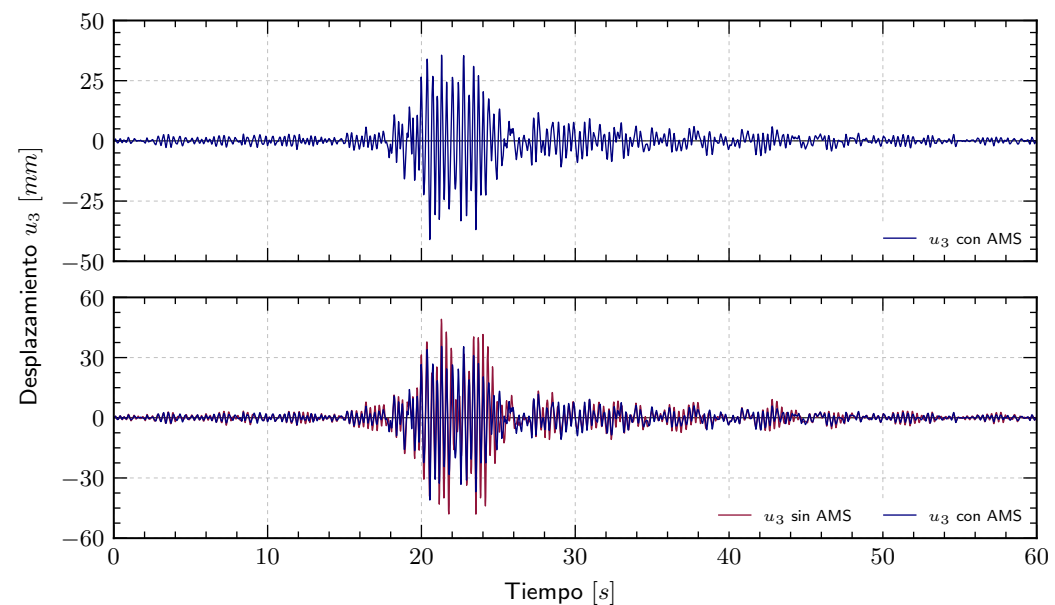


FIGURA N° 6.4: Desplazamiento del último nivel.

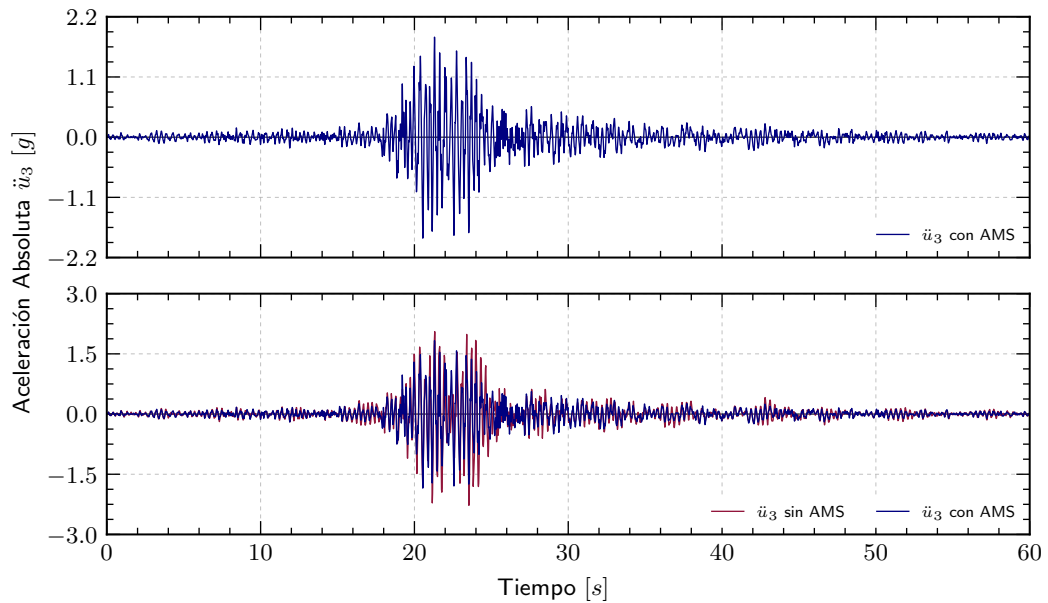


FIGURA N° 6.5: Aceleración absoluta del último nivel.

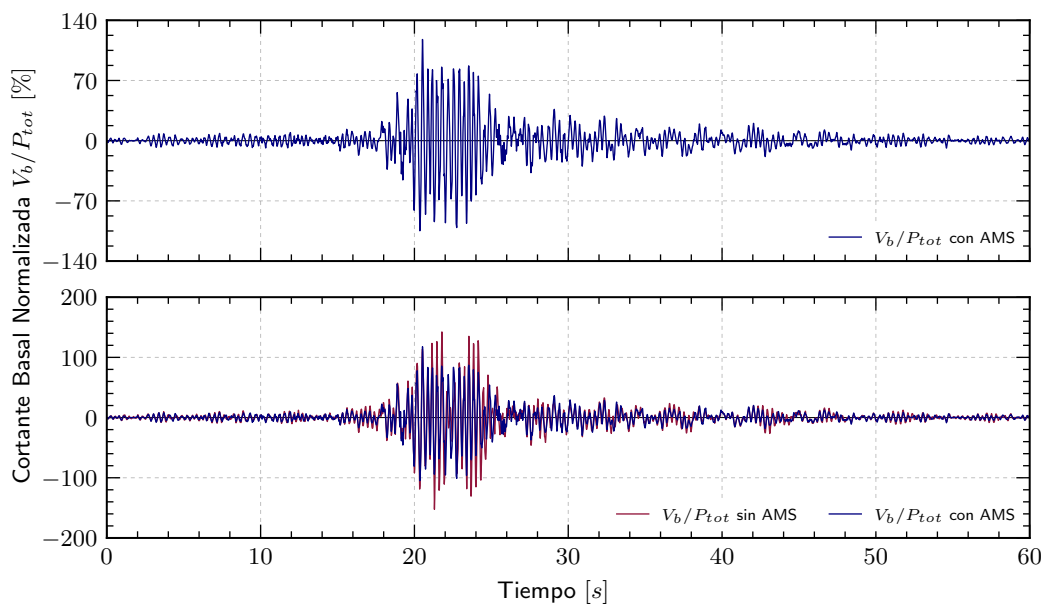


FIGURA N° 6.6: Fuerza cortante basal normalizada.

Las Figuras N° 6.4, N° 6.5 y N° 6.6 muestran los resultados de la edificación que incorpora el amortiguador de masa sintonizada en superposición con los resultados de la misma edificación sin AMS, con el objetivo de evidenciar de manera visual la reducción en las respuestas sísmicas.

De las Figuras N° 6.3 y N° 6.4 se puede apreciar que el desplazamiento relativo que sufre el AMS es aproximadamente 2.3 veces el desplazamiento que sufre el último nivel de la edificación. Por lo tanto, se debe tener especial cuidado para evitar diseñar AMS con grandes desplazamientos relativos.

La Tabla N° 6.2 muestra los resultados máximos absolutos obtenidos para la edificación con el AMS, donde se puede apreciar que el AMS sufre la mayor deformación en comparación con la estructura. De igual modo, la Tabla N° 3.3 presenta los resultados máximos absolutos de la misma edificación sin AMS. Comparando las respuestas sísmicas de ambas tablas se observa que se logró una reducción del 16 %, 19 % y del 23 % en términos del desplazamiento relativo del último nivel, la aceleración absoluta del último nivel y de la fuerza cortante basal normalizada respectivamente; estos resultados muestran los beneficios de incorporar un AMS.

TABLA N° 6.2: Resultados máximos de la edificación con AMS

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Desplazamiento relativo del AMS	u'_a	119.20	mm
Desplazamiento del último nivel	u_3	43.00	mm
Aceleración absoluta del último nivel	\ddot{u}_3	2.00	g
Fuerza cortante basal normalizada	V_b/P_{tot}	117.72	%

6.5 RESPUESTA SÍSMICA DE MODELOS SIMPLES

En esta sección se estudiarán modelos simplificados de edificaciones con diferente número de niveles que incorporan un amortiguador de masa sintonizada en el nivel superior, con el fin de conocer la eficiencia de este sistema de control pasivo en la reducción de las respuestas sísmicas. Se usará la componente NS del sismo de Lima del 1966 como aceleración basal para todos los casos. Se compararán las respuestas sísmicas obtenidas para la edificación con AMS contra las respuestas sísmicas para la misma edificación sin AMS. Asimismo, la fuerza cortante basal se normalizó respecto al peso total.

La reducción de la respuestas sísmicas se evaluará de la siguiente manera:

$$Reducción [\%] = \left(1 - \frac{Respuesta_{Con\ AMS}}{Respuesta_{Sin\ AMS}} \right) 100\% \quad (6.12)$$

A continuación, se presentan las Tablas N° 6.3, N° 6.4, N° 6.5 y N° 6.6 con los parámetros que definen el comportamiento del amortiguador de masa sintonizada, que se incorporarán en el último nivel de las edificaciones, para diferentes razones de masa (r_a). Dichos parámetros se obtuvieron luego de aplicar el procedimiento descrito en la sección 6.3.

TABLA N° 6.3: Parámetros de los AMS para $r_a = 1\%$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_1	s	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
m_a^{**}	—	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18
k_a^{**}	$1/s^2$	13.16	6.58	4.39	3.29	2.63	2.19
c_a^{**}	$1/s$	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13

TABLA N° 6.4: Parámetros de los AMS para $r_a = 2\%$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_1	s	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
m_a^{**}	—	0.06	0.12	0.18	0.24	0.30	0.36
k_a^{**}	$1/s^2$	26.32	13.16	8.77	6.58	5.26	4.39
c_a^{**}	$1/s$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

TABLA N° 6.5: Parámetros de los AMS para $r_a = 3\%$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_1	s	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
m_a^{**}	—	0.09	0.18	0.27	0.36	0.45	0.54
k_a^{**}	$1/s^2$	39.48	19.74	13.16	9.87	7.90	6.58
c_a^{**}	$1/s$	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38

TABLA N° 6.6: Parámetros de los AMS para $r_a = 4\%$

Símbolo	Unidad	Número de niveles					
		$n = 3$	$n = 6$	$n = 9$	$n = 12$	$n = 15$	$n = 18$
T_1	s	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
m_a^{**}	—	0.12	0.24	0.36	0.48	0.60	0.72
k_a^{**}	$1/s^2$	52.64	26.32	17.55	13.16	10.53	8.77
c_a^{**}	$1/s$	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

6.5.1 Importancia de la Razón de Masa

La razón de masa r_a es el cociente que resulta de dividir la masa del AMS m_a entre la masa total de la edificación m_{tot} . En un caso ideal se pretendería que la razón

de masa tome el mayor valor posible; sin embargo, desde un enfoque práctico y considerando ciertas limitaciones se suelen usar razones de masa en el rango entre 1% y 4%.

TABLA N° 6.7: Fuerza cortante basal normalizada máxima

Fuerza cortante basal normalizada - V_b/P_{tot} [%]					
N° de niveles	Sin AMS	Razón de masa			
		$r_a = 1\%$	$r_a = 2\%$	$r_a = 3\%$	$r_a = 4\%$
3	152.46	118.55	117.72	117.26	116.81
6	101.47	77.22	74.95	72.82	70.83
9	71.77	58.64	53.30	49.20	47.41
12	51.07	46.14	43.16	40.37	38.54
15	37.73	34.21	33.45	32.78	32.10
18	30.08	26.16	25.75	25.39	24.25

TABLA N° 6.8: Desplazamiento máximo del último nivel

Desplazamiento del último nivel - u_n [mm]					
N° de niveles	Sin AMS	Razón de masa			
		$r_a = 1\%$	$r_a = 2\%$	$r_a = 3\%$	$r_a = 4\%$
3	49.10	43.38	43.00	42.53	40.75
6	129.46	109.36	105.66	103.11	98.74
9	193.77	178.92	166.66	154.16	141.60
12	250.72	226.08	212.81	201.27	192.64
15	318.32	253.01	246.15	234.12	221.91
18	376.77	315.29	311.47	307.60	297.40

TABLA N° 6.9: Aceleración absoluta máxima del último nivel

Aceleración absoluta del último nivel - \ddot{u}_n [g]					
N° de niveles	Sin AMS	Razón de masa			
		$r_a = 1\%$	$r_a = 2\%$	$r_a = 3\%$	$r_a = 4\%$
3	2.27	2.06	2.00	1.95	1.90
6	1.70	1.68	1.65	1.61	1.58
9	1.31	1.08	1.05	1.01	0.98
12	0.98	0.97	0.95	0.93	0.92
15	1.12	1.13	1.13	1.13	1.12
18	0.79	0.78	0.78	0.77	0.77

En las Tablas N° 6.7, N° 6.8 y N° 6.9 se muestran las respuestas sísmicas máximas obtenidas para edificaciones que incorporan un amortiguador de masa sintonizada, que cuentan con diferente número de niveles y usan cuatro razones de masas distintas. Para obtener los valores presentados en estas tablas se trabajó con gráficos similares a los presentados en el apartado 6.4.2 para cada uno de los casos. De estos gráficos, que muestran las respuestas sísmicas que se obtienen como resultado de un análisis tiempo historia, se obtuvieron los máximos valores (en valor absoluto). Además las tablas también presentan las respuestas sísmicas para edificaciones con diferentes número de niveles pero que no incorporan AMS.

Valiéndose de los resultados antes mostrados y haciendo uso de la ecuación 6.12 se obtuvieron los porcentajes de reducción para cada una de las respuestas sísmicas, los cuales se muestran a continuación en las Tablas N° 6.10, N° 6.11 y N° 6.12.

TABLA N° 6.10: Reducción de la fuerza cortante basal normalizada

Reducción de la fuerza cortante basal [%]				
N° de niveles	Razón de masa			
	$r_a = 1\%$	$r_a = 2\%$	$r_a = 3\%$	$r_a = 4\%$
3	22.24	22.78	23.09	23.38
6	23.90	26.14	28.24	30.19
9	18.30	25.73	31.45	33.95
12	9.64	15.48	20.95	24.53
15	9.34	11.34	13.12	14.94
18	13.04	14.41	15.59	19.37

TABLA N° 6.11: Reducción del desplazamiento del último nivel

Reducción del desplazamiento [%]				
N° de niveles	Razón de masa			
	$r_a = 1\%$	$r_a = 2\%$	$r_a = 3\%$	$r_a = 4\%$
3	11.66	12.42	13.38	17.00
6	15.52	18.38	20.35	23.73
9	7.67	13.99	20.44	26.93
12	9.83	15.12	19.72	23.17
15	20.52	22.67	26.45	30.29
18	16.32	17.33	18.36	21.07

TABLA N° 6.12: Reducción de la aceleración absoluta del último nivel

Reducción de la aceleración absoluta [%]				
N° de niveles	Razón de masa			
	$r_a = 1\%$	$r_a = 2\%$	$r_a = 3\%$	$r_a = 4\%$
3	9.10	12.02	13.95	16.11
6	1.06	2.85	4.90	7.11
9	17.33	19.60	22.67	24.90
12	0.97	3.05	5.09	6.67
15	-1.06	-1.26	-0.91	-0.18
18	1.29	2.17	2.73	3.18

Para un mejor entendimiento de los resultados presentados en las Tablas N° 6.10, N° 6.11 y N° 6.12 se procede a elaborar gráficos que muestren de manera visual la importancia de la razón de masa en las respuestas sísmicas de edificaciones que incorporan AMS. De las Figuras N° 6.7, N° 6.8 y N° 6.9 se concluye que la reducción de las respuestas sísmicas, en líneas generales, se incrementa conforme aumenta la razón de masa; sin embargo, dado que el AMS se colocará en el último nivel de la edificación en la práctica resulta inviable usar razones de masa muy altas. Por otro lado, se puede observar que los porcentajes de reducción que se logran al incorporar amortiguadores de masa sintonizada son mucho menores a las reducciones que se pueden lograr con los otros tres sistemas de control pasivo presentados anteriormente. Además, en Figura N° 6.9 se aprecian porcentajes de reducción negativos con respecto a las aceleraciones absolutas del último nivel, es decir que en ciertos casos las aceleraciones en la edificación con AMS son mayores a las aceleraciones presentadas en la misma edificación que no incorpora AMS. Asimismo, la Figura N° 6.7 muestra que podría tenerse una tendencia a la disminución de la eficiencia del AMS para reducir el desplazamiento del último nivel conforme aumenta el número de niveles de la edificación.

Por último, la Figura N° 6.7 muestra que se puede lograr porcentajes de reducción de la fuerza cortante basal normalizada con valores en el rango entre 10-35%. Además, la Figura N° 6.8 muestra que es posible obtener porcentajes de reducción del desplazamiento del último nivel con valores entre 8-30%, siendo las mayores reducciones producto de las razones de masa más altos. Finalmente, la Figura N° 6.9 es la que presenta mayor dispersión (no se aprecia ninguna tendencia), y muestra que los porcentajes de reducción de la aceleración absoluta del último nivel tiene valores comprendidos dentro del intervalo de 0-25%.

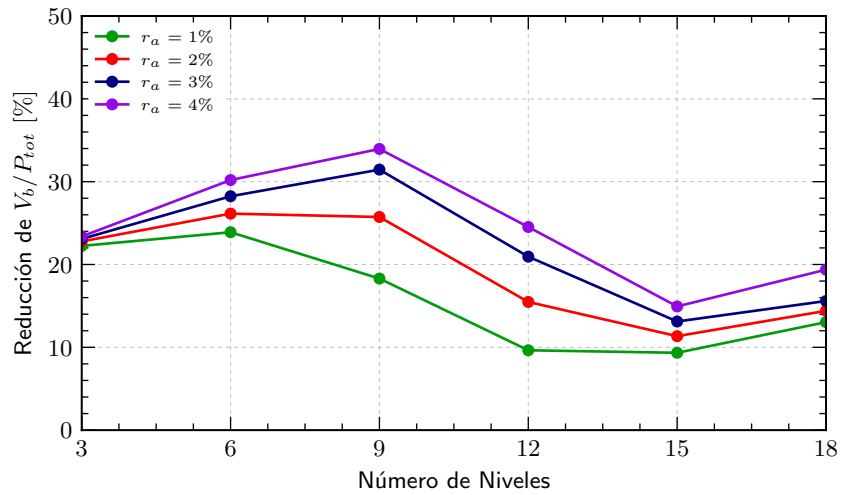


FIGURA N° 6.7: Reducción de la fuerza cortante basal normalizada.

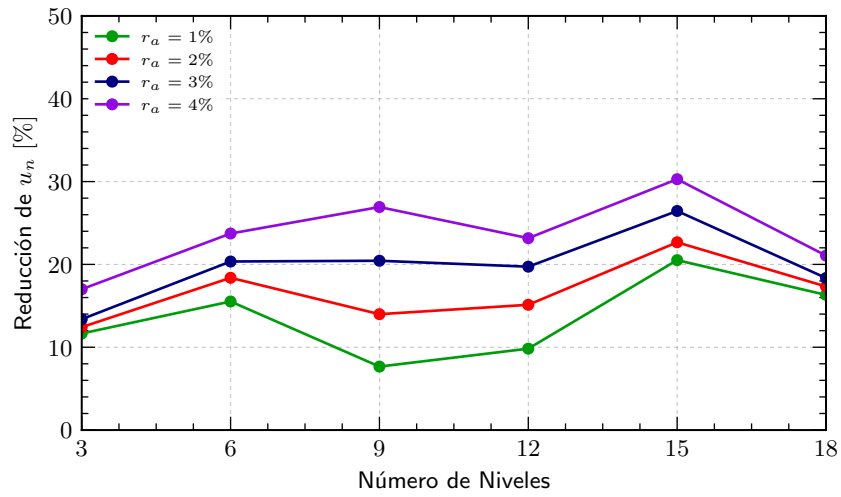


FIGURA N° 6.8: Reducción del desplazamiento del último nivel.

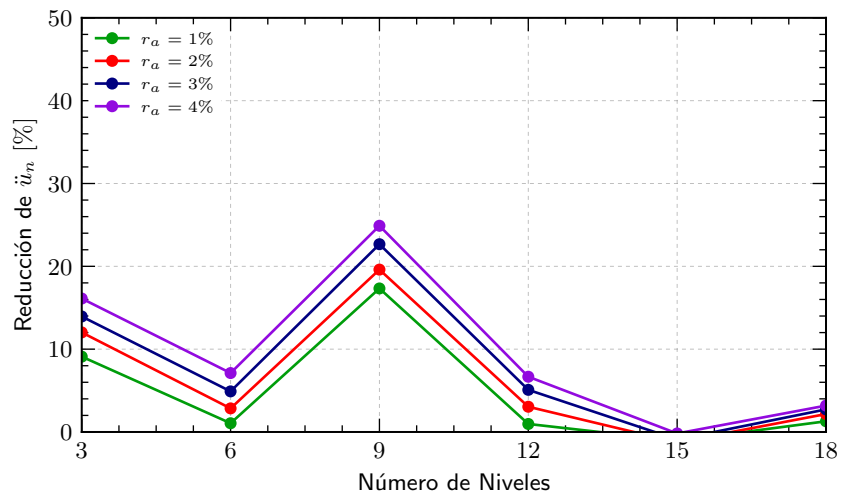


FIGURA N° 6.9: Reducción de la aceleración absoluta del último nivel.

6.5.2 Influencia del Amortiguamiento del AMS

El amortiguamiento del AMS ayuda en la disipación de la energía sísmica. Por lo tanto, resulta de interés estudiar el rol que desempeña el amortiguamiento del AMS en la reducción de las respuestas sísmicas. En la presente subsección se estudiarán edificaciones que incorporan AMS con fracciones de amortiguamiento crítico $\beta_a = 5\%$, $\beta_a = 10\%$ y $\beta_a = 15\%$.

En todos los casos que se estudiarán el único parámetro que se variará será el amortiguamiento del AMS. Asimismo, las propiedades que se asignarán a cada AMS son el resultado de aplicar el procedimiento descrito en el apartado 6.3. Las Tablas N° 6.13, N° 6.14 y N° 6.15 presentan las respuestas sísmicas para edificaciones que incorporan AMS y usan tres distintas fracciones del amortiguamiento crítico.

TABLA N° 6.13: Fuerza cortante basal - $\beta_a = 5\%$ y $\beta_a = 15\%$

Fuerza cortante basal normalizada - V_b/P_{tot} [%]								
N° de niveles	$\beta_a = 5\%$				$\beta_a = 15\%$			
	$r_a=1\%$	$r_a=2\%$	$r_a=3\%$	$r_a=4\%$	$r_a=1\%$	$r_a=2\%$	$r_a=3\%$	$r_a=4\%$
3	117.3	116.6	118.1	122.6	124.9	118.9	118.0	116.8
6	79.7	78.0	73.3	75.3	79.0	72.5	71.8	71.2
9	57.4	51.5	56.0	58.3	60.6	54.8	50.2	46.0
12	45.7	44.9	47.1	47.1	46.6	43.7	41.4	39.1
15	33.6	33.5	35.1	34.2	33.3	33.1	32.7	32.1
18	27.9	27.0	26.5	25.5	26.1	24.6	24.5	24.2

TABLA N° 6.14: Desplazamiento del último nivel - $\beta_a = 5\%$ y $\beta_a = 15\%$

Desplazamiento del último nivel - u_n [mm]								
N° de niveles	$\beta_a = 5\%$				$\beta_a = 15\%$			
	$r_a=1\%$	$r_a=2\%$	$r_a=3\%$	$r_a=4\%$	$r_a=1\%$	$r_a=2\%$	$r_a=3\%$	$r_a=4\%$
3	42.3	42.0	43.9	45.8	44.5	40.6	41.8	42.7
6	112.8	116.1	109.4	102.8	113.2	105.6	99.7	97.7
9	175.9	179.8	169.1	158.6	181.3	170.6	159.8	144.5
12	222.6	238.7	234.4	232.9	229.3	216.9	207.7	199.9
15	279.5	259.0	255.3	263.5	267.7	238.7	235.0	228.0
18	343.1	349.5	321.4	329.7	328.2	287.9	295.4	296.1

TABLA N° 6.15: Aceleración absoluta del último nivel - $\beta_a = 5\%$ y $\beta_a = 15\%$

Aceleración absoluta del último nivel - \ddot{u}_n [g]								
N° de niveles	$\beta_a = 5\%$				$\beta_a = 15\%$			
	$r_a=1\%$	$r_a=2\%$	$r_a=3\%$	$r_a=4\%$	$r_a=1\%$	$r_a=2\%$	$r_a=3\%$	$r_a=4\%$
3	2.12	2.01	2.01	1.97	2.21	1.93	1.86	1.87
6	1.71	1.68	1.65	1.61	1.66	1.62	1.59	1.55
9	1.06	1.13	1.08	1.11	1.10	1.07	0.97	0.93
12	1.04	0.99	0.98	1.00	0.99	0.93	0.91	0.89
15	1.14	1.15	1.15	1.14	1.12	1.12	1.12	1.11
18	0.79	0.78	0.78	0.78	0.78	0.77	0.76	0.76

Con los resultados que se muestran en las tablas anteriores y haciendo uso de la ecuación 6.12 se obtuvo los porcentajes de reducción para cada una de las respuestas sísmicas de las edificaciones con AMS que tienen $\beta_a = 5\%$ y $\beta_a = 15\%$.

TABLA N° 6.16: Reducción de la fuerza cortante basal - $\beta_a = 5\%$ y $\beta_a = 15\%$

Reducción de la fuerza cortante basal normalizada [%]								
N° de niveles	$\beta_a = 5\%$				$\beta_a = 15\%$			
	$r_a=1\%$	$r_a=2\%$	$r_a=3\%$	$r_a=4\%$	$r_a=1\%$	$r_a=2\%$	$r_a=3\%$	$r_a=4\%$
3	23.1	23.5	22.5	19.6	18.1	22.0	22.6	23.4
6	21.5	23.1	27.8	25.8	22.1	28.6	29.2	29.9
9	20.0	28.3	22.0	18.8	15.6	23.7	30.0	36.0
12	10.6	12.0	7.8	7.8	8.7	14.4	19.0	23.4
15	11.1	11.1	7.1	9.4	11.7	12.2	13.3	14.9
18	7.3	10.3	12.0	15.3	13.2	18.2	18.7	19.5

TABLA N° 6.17: Reducción del desplazamiento del último nivel - $\beta_a = 5\%$ y $\beta_a = 15\%$

Reducción del desplazamiento del último nivel [%]								
N° de niveles	$\beta_a = 5\%$				$\beta_a = 15\%$			
	$r_a=1\%$	$r_a=2\%$	$r_a=3\%$	$r_a=4\%$	$r_a=1\%$	$r_a=2\%$	$r_a=3\%$	$r_a=4\%$
3	13.8	14.5	10.5	6.8	9.3	17.4	14.9	13.0
6	12.9	10.3	15.5	20.6	12.6	18.5	23.0	24.5
9	9.2	7.2	12.7	18.1	6.4	12.0	17.5	25.4
12	11.2	4.8	6.5	7.1	8.5	13.5	17.2	20.3
15	12.2	18.6	19.8	17.2	15.9	25.0	26.2	28.4
18	8.9	7.2	14.7	12.5	12.9	23.6	21.6	21.4

TABLA N° 6.18: Reducción de la aceleración del último nivel - $\beta_a = 5\%$ y $\beta_a = 15\%$

Reducción de la aceleración absoluta del último nivel [%]								
N° de niveles	$\beta_a = 5\%$				$\beta_a = 15\%$			
	$r_a=1\%$	$r_a=2\%$	$r_a=3\%$	$r_a=4\%$	$r_a=1\%$	$r_a=2\%$	$r_a=3\%$	$r_a=4\%$
3	6.6	11.6	11.6	13.4	2.8	15.0	18.0	17.6
6	-0.9	0.7	2.7	5.1	2.2	4.3	6.5	8.6
9	18.8	14.0	17.5	15.5	16.4	18.1	26.0	29.4
12	-6.0	-1.4	0.0	-2.3	-0.9	4.9	6.7	9.1
15	-2.0	-2.7	-2.5	-1.6	-0.4	-0.3	0.3	1.1
18	0.9	1.3	1.4	1.4	1.6	2.9	3.9	4.7

Las Tablas N° 6.16, N° 6.17 y N° 6.18 muestran los porcentajes de reducción alcanzados para cada una de las respuestas sísmicas. A continuación, las Figuras N° 6.10, N° 6.11 y N° 6.12 presentan las reducciones alcanzadas por edificaciones que incorporan AMS con factores de amortiguamiento crítico $\beta_a = 5\%$, $\beta_a = 10\%$ y $\beta_a = 15\%$.

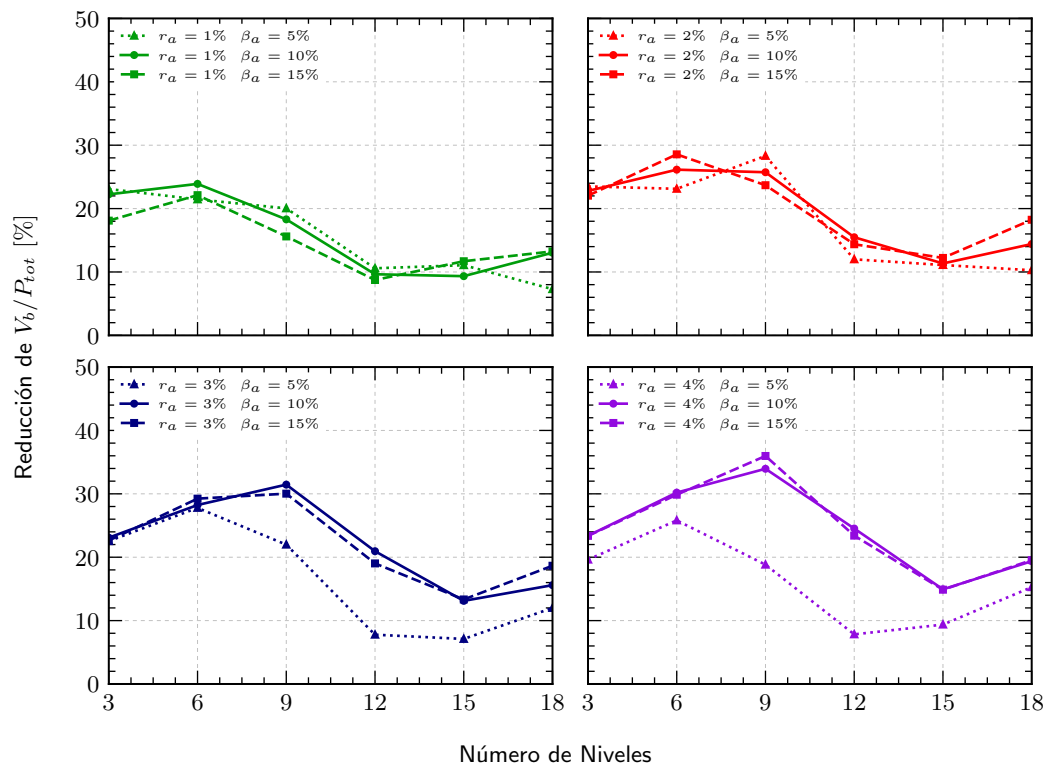


FIGURA N° 6.10: Reducción de la cortante basal - $\beta_a = 5\%$, $\beta_a = 10\%$ y $\beta_a = 15\%$.

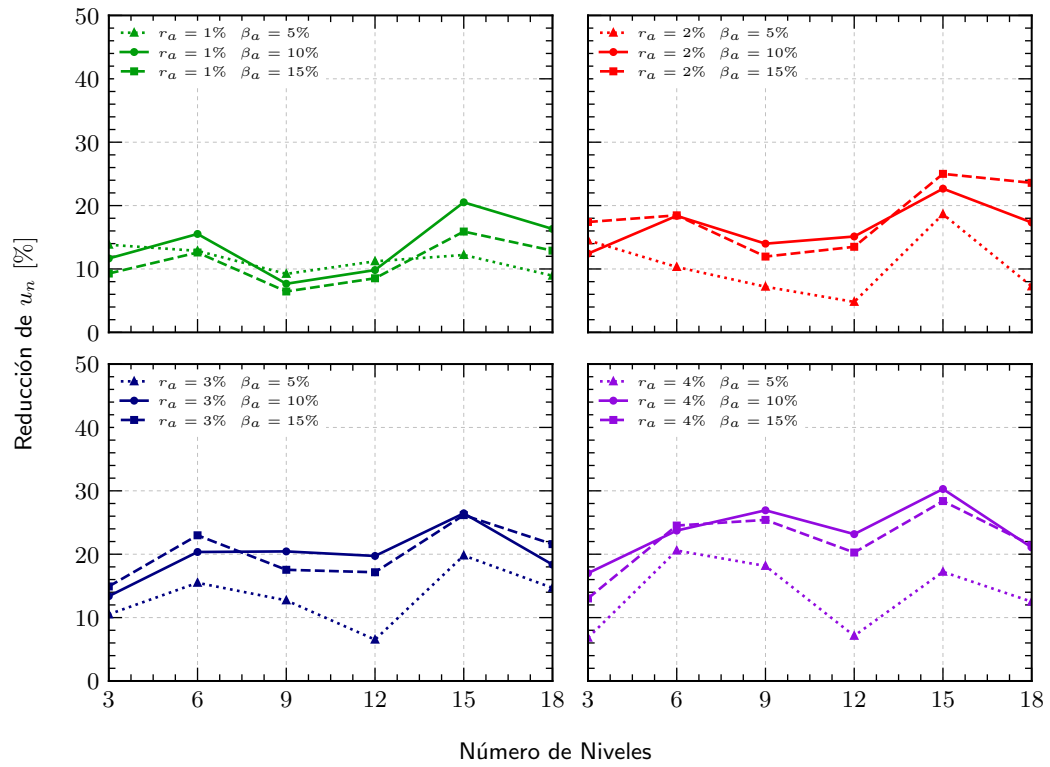


FIGURA N° 6.11: Reducción de u_n - $\beta_a = 5\%$, $\beta_a = 10\%$ y $\beta_a = 15\%$.

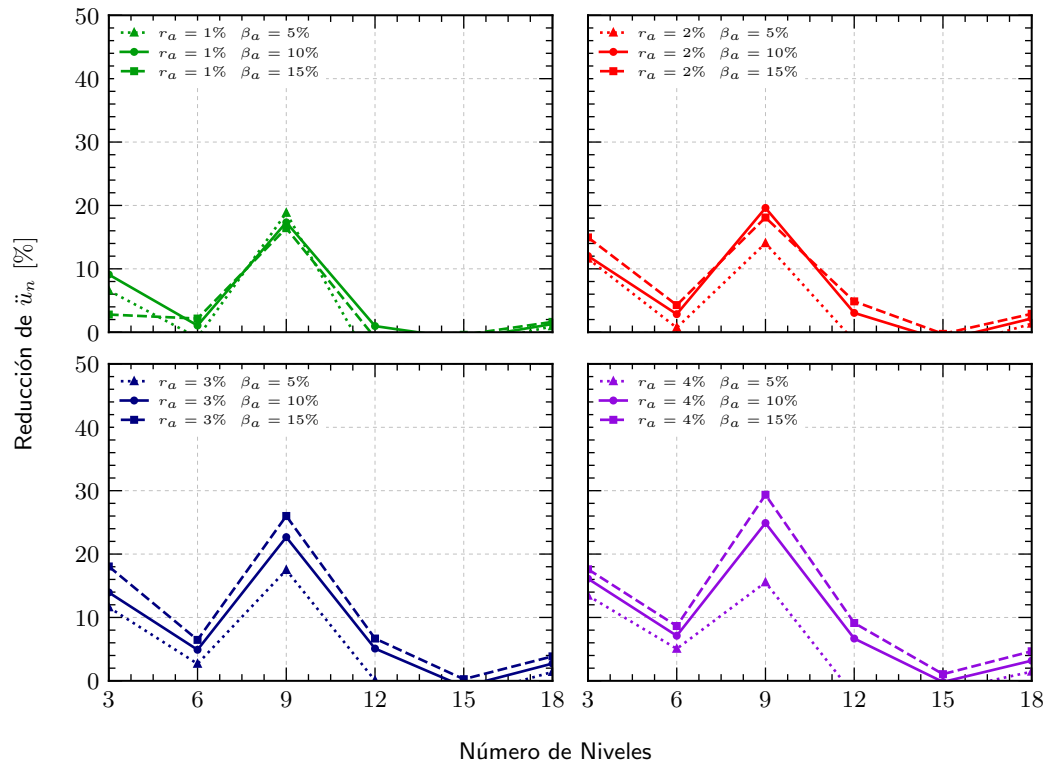


FIGURA N° 6.12: Reducción de \ddot{u}_n - $\beta_a = 5\%$, $\beta_a = 10\%$ y $\beta_a = 15\%$.

En las Figuras N° 6.10 y N° 6.11 se puede observar que para razones de masa bajas ($r_a \leq 2\%$) no existe una tendencia clara respecto a la reducción de las respuestas sísmicas con relación al amortiguamiento del AMS. Sin embargo, en las Figuras N° 6.10, N° 6.11 y N° 6.12 se aprecia que para razones de masa altas ($r_a \geq 3\%$) existe una tendencia a obtener menores porcentajes de reducción con respecto a la fuerza cortante basal normalizada, al desplazamiento y la aceleración absoluta del último nivel, para el amortiguamiento del AMS $\beta_a = 5\%$. Por otro lado, de las mismas figuras se evidencia que las reducciones en las respuestas sísmicas obtenidas para edificaciones con AMS con porcentajes de amortiguamiento crítico de $\beta_a = 10\%$ y $\beta_a = 15\%$ tienen prácticamente los mismos valores, independientemente del número de niveles de la edificación y de la razón de masa, lo cual sugeriría que es un despropósito usar AMS con $\beta_a \geq 10\%$.

6.6 COMENTARIOS FINALES

En este capítulo se estudiaron modelos simplificados bidimensionales de edificaciones que incorporan un AMS en su último nivel, para cuatro razones de masa distintos. Con base en los resultados obtenidos se puede afirmar lo siguiente.

- El uso de AMS permite reducir las respuestas sísmicas de una edificación. Sin embargo, tiene menor efectividad que los otros sistemas de control pasivo que se estudiaron en los capítulos anteriores. Esto se debe en gran parte al hecho que la sintonización del AMS se realiza usando una frecuencia específica (la correspondiente al periodo fundamental de la edificación); sin embargo, los sismos tienen un amplio contenido de frecuencias. Así por ejemplo, el AMS no reduce los aportes a la respuesta sísmica correspondientes al segundo y tercer modo de vibración, que en muchos casos tiene valores muy relevantes.
- Los porcentajes de reducción de las respuestas sísmicas se incrementan conforme aumenta la razón de masa del AMS (r_a). No obstante, en la práctica es inviable usar valores muy elevados de r_a , ya que el AMS se instalará en el último nivel de la edificación.
- En líneas generales, existe la tendencia de obtener bajas reducciones de las respuestas sísmicas al usar porcentajes de amortiguamiento críticos bajos para el AMS. Sin embargo, usar valores altos de amortiguamiento crítico para el AMS no garantiza obtener reducciones altas.

CAPÍTULO VII: APLICACIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONTROL PASIVO EN EDIFICACIONES

En este capítulo se estudiará el uso de dispositivos de control pasivo, como los aisladores sísmicos, los disipadores de fluidos viscoso, los disipadores histeréticos y los amortiguadores de masa sintonizada, en edificaciones reales de concreto armado. Se analizarán tres edificaciones, usando para cada caso un modelo tridimensional elaborado en el programa de cómputo *ETABS*. Se emplearán los registros sísmicos de Lima de 1966, Pisco de 2007 y Maule de 2010, mostrados en las Figuras N° 2.14, N° 2.15 y N° 2.16, como aceleración en la base. Los dispositivos de control pasivo se modelarán en todos los casos como elementos *link* con comportamiento no lineal, a excepción de los AMS para los que se usarán elementos *link* lineales.

Se analizarán las respuestas sísmicas de las edificaciones, tales como la cortante basal, las derivas de entrepiso, el desplazamiento y aceleración del último nivel. Las reducciones en las respuestas sísmicas obtenidas se compararán con los resultados de los modelos simplificados presentados en los capítulos anteriores.

7.1 EDIFICIO PRINCIPAL DEL AEROPUERTO JORGE CHÁVEZ

El edificio principal del aeropuerto Jorge Chávez fue diseñado y construido en la década de 1960. Cuenta con 10 niveles, con un cuerpo principal de aproximadamente 45 metros de altura, una altura de entrepiso típico de 4.5 metros y un área en planta de 930 metros cuadrados.

El sistema estructural de la edificación en cuestión está basado en pórticos de concreto armado y postensado. La caja de escaleras y ascensores están excéntricas con relación a la planta de la edificación produciendo asimetría. Asimismo, el primer piso se tiene una mezanine parcial creando columnas de doble altura en la dirección transversal (la más flexible). Por otro lado, como se puede apreciar en la Figura N° 7.1, esta edificación tiene una forma rectangular en planta, con mayor rigidez en la dirección longitudinal que en dirección transversal. En consecuencia, los principales problemas estructurales detectados son: torsión excesiva, flexibilidad excesiva e irregularidad de piso blando.

Es preciso indicar que esta edificación ha sido sometida a un reforzamiento estructural para corregir sus principales deficiencias, sin embargo, en esta investigación se ha considerado la configuración original.

Se plantean dos alternativas para mejorar el comportamiento sísmico de esta edificación, la primera usando disipadores de fluido viscoso y la segunda incorporando disipadores histeréticos. Con ambas alternativas se busca reducir la deriva de en-

trepiso al valor de 7 ‰, que es el límite dado por la norma E030. Los resultados que se presentarán corresponden a la dirección transversal de la edificación (dirección X), ya que esta dirección sufre las mayores deformaciones laterales.

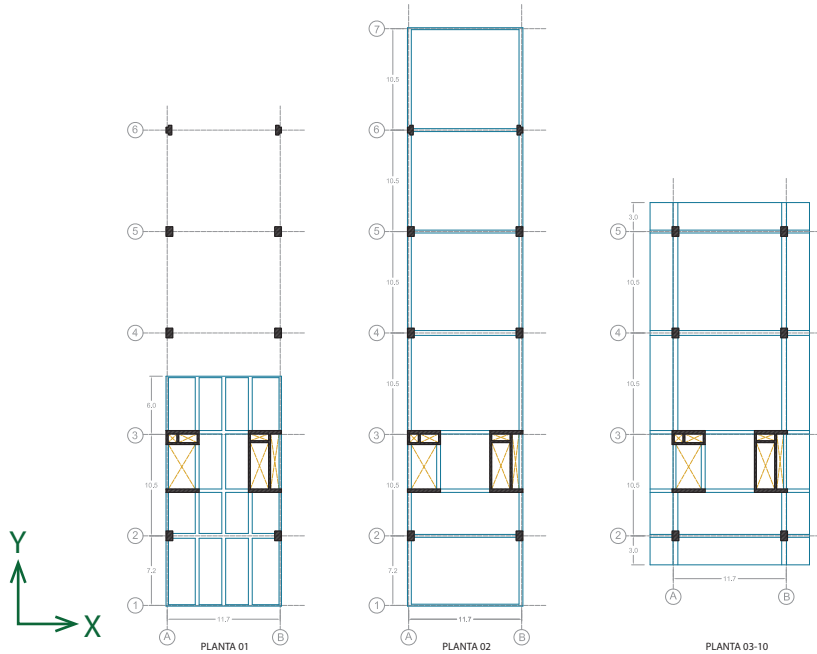


FIGURA N° 7.1: Vista en planta del edificio Jorge Chávez.

7.1.1 Edificación Original

En la Figura N° 7.2 se muestra el modelo matemático tridimensional del edificio principal original del aeropuerto Jorge Chávez.

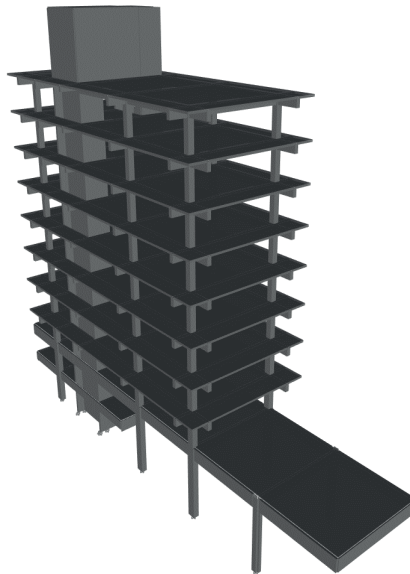


FIGURA N° 7.2: Modelo numérico del edificio Jorge Chávez.

7.1.1.1 Características Dinámicas

En la Tabla N° 7.1 se muestran los periodos naturales de vibración y las masas participativas (expresadas como porcentaje de la masa total). El periodo fundamental de la edificación es de 1.8 segundos, que resulta ser un valor muy elevado para una edificación de 10 niveles, evidenciando de esta manera la poca rigidez en la dirección transversal. Asimismo, se puede apreciar que el segundo modo de vibración es de tipo rotacional, lo que tiene relación con su irregularidad torsional.

TABLA N° 7.1: Características dinámicas del edificio Jorge Chávez

Modo	T [s]	Masa participativa [%]			Acum. de masa participativa [%]		
		UX	UY	RZ	UX	UY	RZ
1	1.82	46.1	2.9	27.4	46.1	2.9	27.4
2	1.34	26.9	11.0	33.4	73.1	13.9	60.8
3	1.13	0.6	56.4	12.6	73.6	70.3	73.4
4	0.62	5.8	0.8	10.1	79.4	71.1	83.5
5	0.38	0.0	0.0	7.6	79.4	71.1	91.1
6	0.34	9.5	2.3	1.2	88.9	73.4	92.3

7.1.1.2 Respuestas Sísmicas

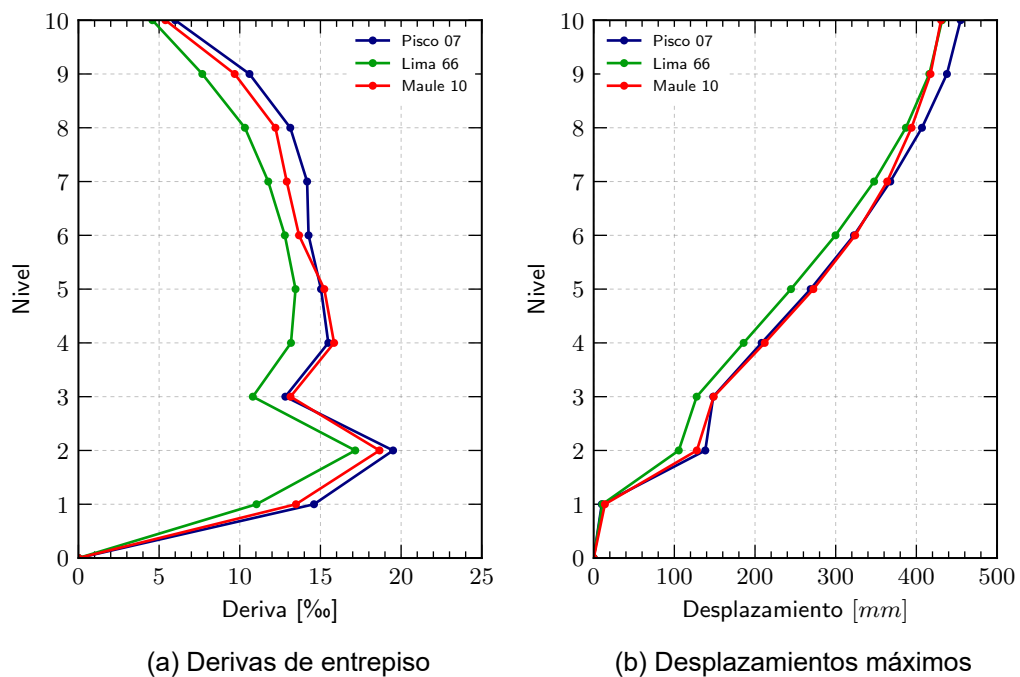


FIGURA N° 7.3: Respuestas sísmicas del edificio Jorge Chávez.

En la Figura N° 7.3a se aprecian las derivas de entrepiso de la dirección transversal (la más flexible) de la edificación, observándose que superan largamente el límite de 7 ‰ que se ha considerado en esta tesis como objetivo, aún cuando la norma E.030 permite un 25% adicional para los valores máximos obtenidos en los análisis tiempo historia. Por otro lado, la Figura N° 7.3b presenta los desplazamientos máximos de la estructura, de donde se observa que el último nivel de la edificación sufre desplazamientos de hasta 450 milímetros, lo cual resulta excesivo para una edificación. Es preciso indicar que los valores mostrados en ambas gráficas son las respuestas máximas (en valor absoluto) de un análisis tiempo historia lineal (ATHL).

7.1.2 Edificación con Disipadores de Fluido Viscoso

En la Figura N° 7.4 se muestra el modelo matemático tridimensional del edificio principal del aeropuerto Jorge Chávez que incorpora DFV. Los disipadores fueron modelados como elementos *link* con comportamiento no lineal. La estructura será sometida una serie de análisis tiempo historia no lineales (ATHNL), considerando para esto que la edificación tiene un comportamiento lineal y elástico, y únicamente se ha supuesto comportamiento en el rango no lineal en los DFV.

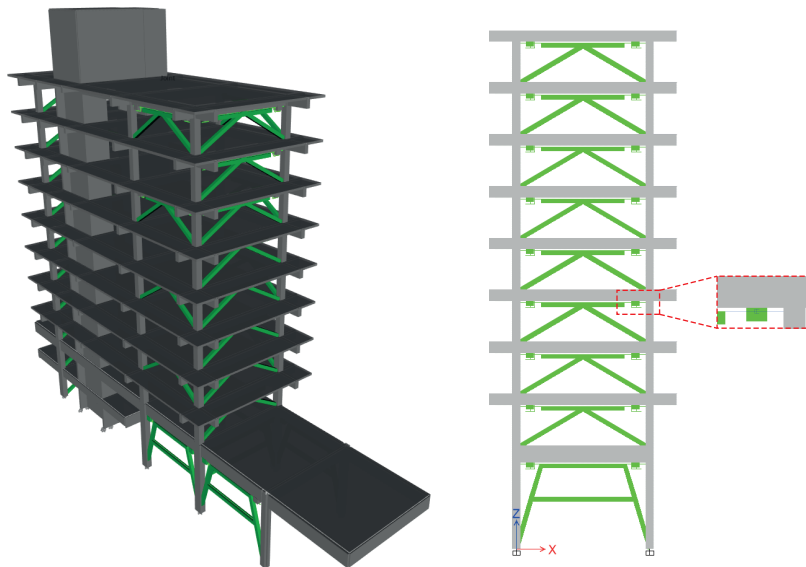


FIGURA N° 7.4: Modelo numérico del edificio Jorge Chávez con DFV.

7.1.2.1 Predimensionamiento

El predimensionamiento de los DFV se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 4.3. A continuación se muestran los resultados.

- Datos iniciales.

$$T_1 = 1.82 \text{ s}; \quad \beta = 5\%; \quad n = 10$$

- Factor de amplificación de los DFV.

$$f_{A_i} = 1$$

Nota: Este valor corresponde a una configuración de tipo Chevron tal como se puede apreciar en la Figura N° 4.12.

- Cinco pasos planteados por Silvestri et al. (2010).

– *Paso 1: Identificación del amortiguamiento objetivo de la estructura.*

$$\eta_\delta = 0.4 \rightarrow \beta' \cong 45\%$$

– *Paso 2: Identificación de las características preliminares de los disipadores de fluido viscoso (disipadores lineales).*

La constante de amortiguamiento lineal de entrepiso se calcula de la siguiente manera:

$$\omega_1 = 3.45 \text{ rad/s}; \quad m_{tot} = 7600 \text{ kNs}^2/m$$

$$C_{Nivel} = \beta' \cdot \omega_1 \cdot m_{tot} \cdot (n + 1) = 130 \frac{M \cdot N \cdot s}{m}$$

$$C_{Nivel, Inclinado} = \frac{C_{Nivel}}{f_{A_i}^2} = 130 \frac{M \cdot N \cdot s}{m}$$

– *Paso 3: Análisis tiempo historia preliminar.*

Luego de realizar el análisis tiempo historia con las propiedades lineales se obtienen las velocidades relativas máximas para cada nivel, las cuales se muestran en la Tabla N° 7.2.

– *Paso 4: Identificación de las características “equivalentes” de los disipadores viscosos no lineales.*

Considerando $\alpha = 0.50$ y $\chi = 0.80$, se puede usar la ecuación 4.21 para obtener las constantes de amortiguamiento no lineales para cada uno de los niveles (se consideraron cuatro DFV por cada nivel). Sin embargo, para el modelo final se agruparon todos los DFV en tres grupos. Los valores de las constantes de amortiguamiento de estos DFV se presentan en la Tabla N° 7.2.

– *Paso 5: Análisis tiempo historia final.*

Se realizaron análisis tiempo historia finales con el propósito de obtener las respuestas sísmicas de la edificación para cada uno de los registros sísmicos.

TABLA N° 7.2: Constantes de amortiguamiento no lineales de los DFV

Nivel	Δv_{max}	C_{NL}	$C_{NL A}$
	[mm/s]	[kN(s/m) ^{0.5}]	[kN(s/m) ^{0.5}]
10	9.8	2868	3200
9	12.8	3279	
8	14.0	3436	
7	15.0	3557	
6	16.3	3702	4000
5	18.5	3950	
4	22.3	4332	
3	22.5	4356	
2	32.5	5276	5200
1	35.0	5433	

7.1.2.2 Respuestas Sísmicas

En la Figura N° 7.5a se aprecian las derivas de entrepiso de la dirección transversal de la edificación con DFV, observándose que están por debajo del límite de 7 ‰ que se tiene como objetivo. Por otro lado, la Figura N° 7.5b presenta los desplazamientos máximos de la estructura, de donde se observa que el último nivel de la edificación sufre desplazamientos de hasta 180 milímetros.

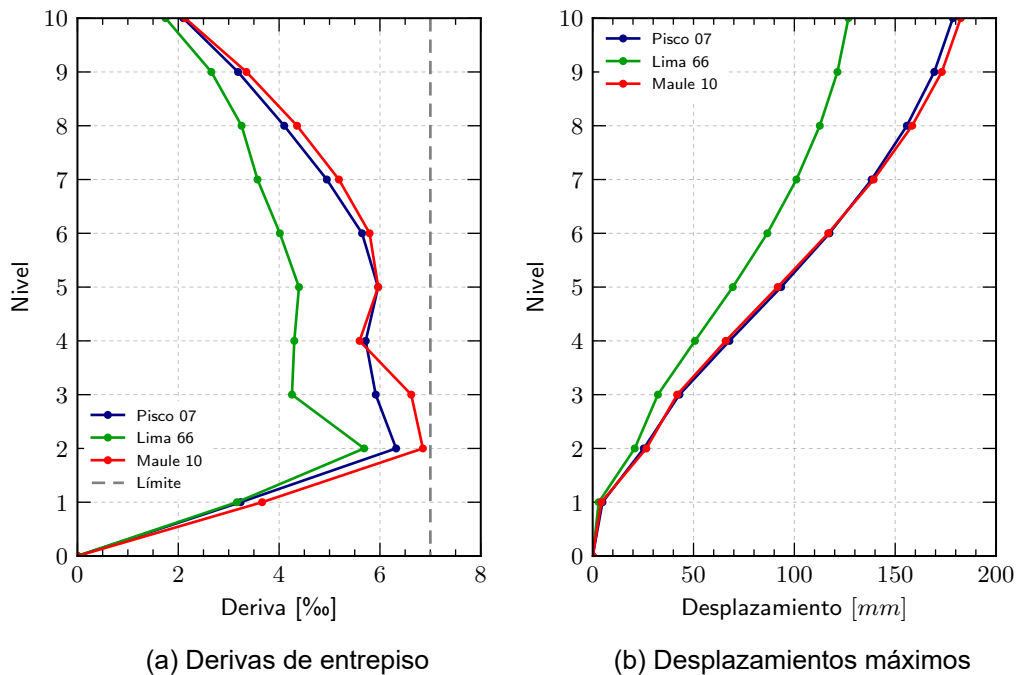


FIGURA N° 7.5: Respuestas sísmicas del edificio Jorge Chávez con DFV.

A continuación, se muestran las respuestas sísmicas de la edificación con DFV en superposición con las repuestas para la misma edificación pero sin DFV.

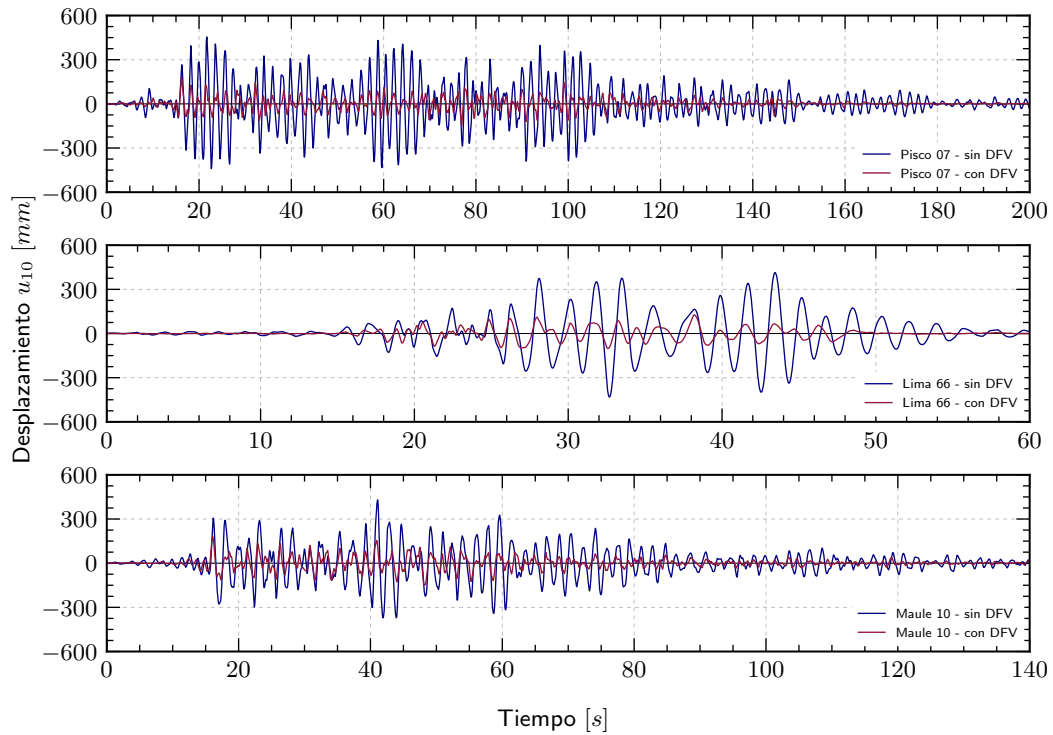


FIGURA N° 7.6: Desplazamiento u_{10} del edificio Jorge Chávez con DFV.

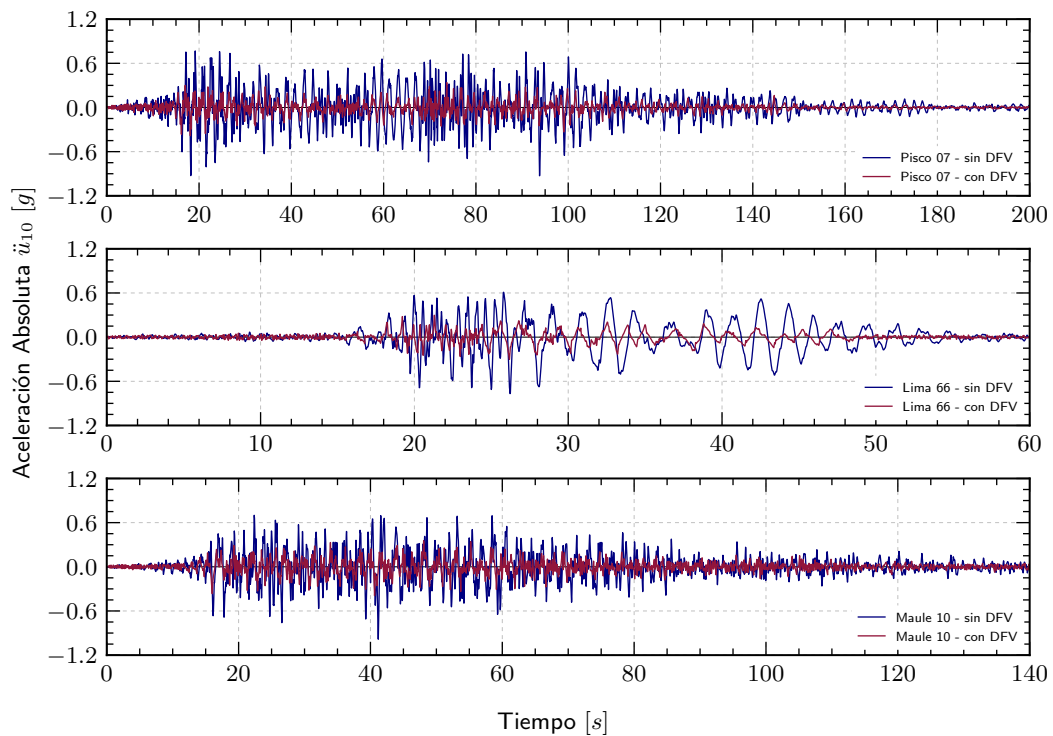


FIGURA N° 7.7: Aceleración \ddot{u}_{10} del edificio Jorge Chávez con DFV.

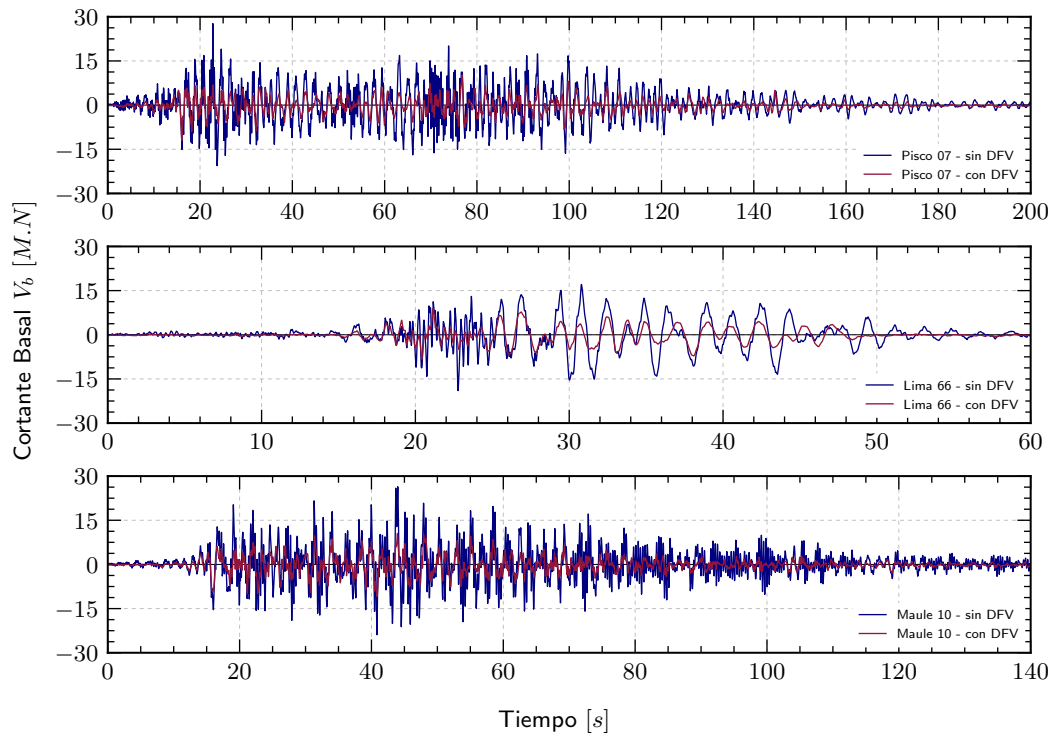


FIGURA N° 7.8: Cortante basal V_b del edificio Jorge Chávez con DFV.

En las Figuras N° 7.6, N° 7.7 y N° 7.8 se presentan las respuestas sísmicas de la edificación Jorge Chavez tales como el desplazamiento del último nivel, la aceleración absoluta del último nivel y la fuerza cortante basal, respectivamente. De estas imágenes es fácil apreciar que el uso de DFV reduce las respuestas sísmicas de manera significativa.

La Tabla N° 7.3 muestra las respuestas sísmicas máximas (en valor absoluto) de la edificación Jorge Chávez para los tres registros sísmicos usados. Asimismo, esta tabla también presenta los porcentajes de reducción de las respuestas sísmicas.

TABLA N° 7.3: Respuestas sísmicas máximas y porcentaje de reducción

Registro sísmico	Sin DFV			Con DFV			Reducción		
	u_{10}	\ddot{u}_{10}	V_b	u_{10}	\ddot{u}_{10}	V_b	u_{10}	\ddot{u}_{10}	V_b
	[mm]	[g]	[M.N]	[mm]	[g]	[M.N]	[%]	[%]	[%]
Pisco 07	454.8	0.93	27.7	178.6	0.38	12.0	60.7	58.7	56.6
Lima 66	431.9	0.77	19.0	126.8	0.30	8.9	70.6	60.7	52.9
Maule 10	430.6	0.98	26.4	182.5	0.39	10.9	57.6	60.1	58.8

7.1.2.3 Reducción de las Respuestas Sísmicas

Los porcentajes de reducción de las respuestas sísmicas, obtenidos luego de incorporar DFV en la edificación, que se presentaron en la Tabla N° 7.3 serán promediados para cada respuesta sísmica. De este modo se tendrá un porcentaje de reducción promedio respecto del desplazamiento del último nivel, de la aceleración absoluta del último nivel y de la fuerza cortante basal.

Por otro lado, de las Figuras N° 4.9, N° 4.10 y N° 4.11 se pueden obtener las reducciones de las respuestas sísmicas alcanzadas por una edificación de 10 niveles y con $\eta_\delta = 0.4$. Es preciso mencionar que estas reducciones corresponden a modelos simplificados.

TABLA N° 7.4: Comparación de porcentajes de reducción

Porcentaje de reducción [%]			
Modelo	u_{10}	\ddot{u}_{10}	V_b
ETABS	63	60	56
Simplificado	66	57	49

Como se aprecia en la Tabla N° 7.4, los porcentajes de reducción alcanzados por el modelo tridimensional en ETABS son similares a los obtenidos con el modelo simplificado.

7.1.3 Edificación con Disipadores Histeréticos

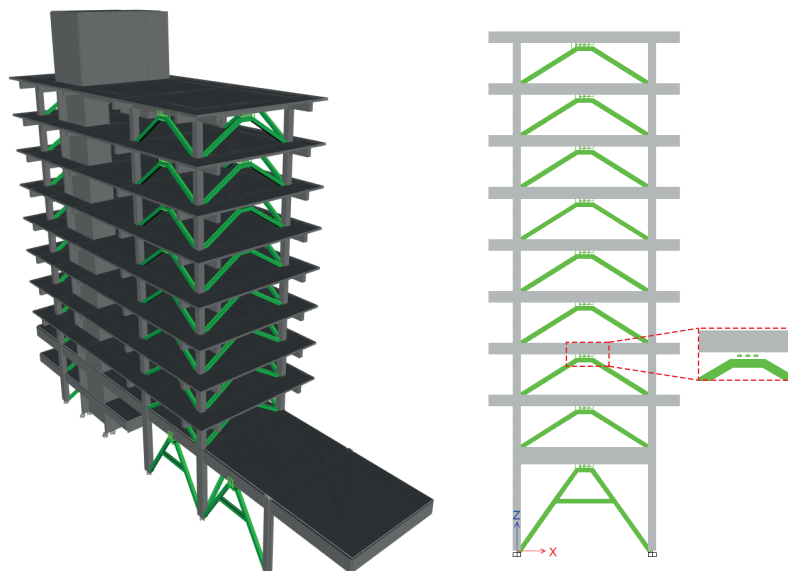


FIGURA N° 7.9: Modelo numérico del edificio Jorge Chávez con DH.

En la Figura N° 7.9 se muestra el modelo matemático tridimensional del edificio prin-

principal del aeropuerto Jorge Chávez que incorpora DH. Los disipadores fueron modelados como elementos *link* con comportamiento histerético de tipo Bouc Wen. La estructura será sometida una serie de análisis tiempo historia no lineales (ATHNL), considerando para esto que la edificación tiene un comportamiento lineal y elástico, y son únicamente los DH los que tienen la capacidad de incursionar en el rango no lineal.

7.1.3.1 Predimensionamiento

En predimensionamiento de los DH se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 5.3. A continuación se muestran los resultados.

- Datos iniciales.

$$T_1 = 1.82 \text{ s}; \quad \beta = 5\%; \quad n = 10$$

- Seguir los siguientes cuatro pasos:

– *Paso 1: Identificación del factor de reducción objetivo.*

$$\eta_\delta = 0.4$$

– *Paso 2: Análisis tiempo historia de la edificación sin disipadores histeréticos.*

Luego de un análisis tiempo historia lineal se obtuvieron las fuerzas cortantes y las rigideces de entrepiso mostradas en la Tabla N° 7.5.

TABLA N° 7.5: Rigideces y cortantes de la edificación sin DH

Nivel	Rigidez [K]	Cortante [V _i]
	[kN/mm]	[kN]
10	374	6619
9	310	8879
8	287	11263
7	282	13424
6	282	14725
5	297	15236
4	338	15164
3	455	16321
2	518	18131
1	664	18915

- *Paso 3: Identificación de los parámetros que definen a los disipadores histeréticos no lineales.*

De la Figura N° 5.7 se identificó los valores de κ_1 y κ_2 .

$$\kappa_1 = 3 \quad \wedge \quad \kappa_2 = 0.15$$

Con estos valores y teniendo en cuenta la Tabla N° 7.5 es posible obtener los parámetros que definen el comportamiento de los DH (se consideraron seis DH por cada nivel). Para el modelo final se agruparon todos los DH en tres grupos. Los disipadores histeréticos usados fueron de tipo Shear Link Bozzo (SLB) y sus características se presentan en la Tabla N° 7.6.

- *Paso 4: Análisis tiempo historia final.*

Se realizó un análisis tiempo historia final para obtener las respuestas sísmicas de la edificación para cada registro sísmico.

TABLA N° 7.6: Propiedades histeréticas de los DH

Nivel	Rigidez E.	F. Fluencia	ID	K_e	F_y	α	η
	[kN/mm]	[kN]	-	[kN/mm]	[kN]	-	-
10	187	165	SLB3 30_3	472	266	0.0167	2
9	155	222					
8	143	282					
7	141	336					
6	141	368	SLB3 25_7	664	395	0.0162	2
5	148	381					
4	169	379					
3	228	408					
2	259	453	SLB3 30_7	811	461	0.0157	2
1	332	473					

7.1.3.2 Respuestas Sísmicas

En la Figura N° 7.10a se aprecian las derivas de entrepiso de la dirección transversal de la edificación con DH, observándose que están por debajo del límite de 7 ‰ que se tiene como objetivo. Por otro lado, la Figura N° 7.10b presenta los desplazamientos máximos de la estructura, de donde se observa que el último nivel de la edificación sufre desplazamientos de hasta 240 milímetros.

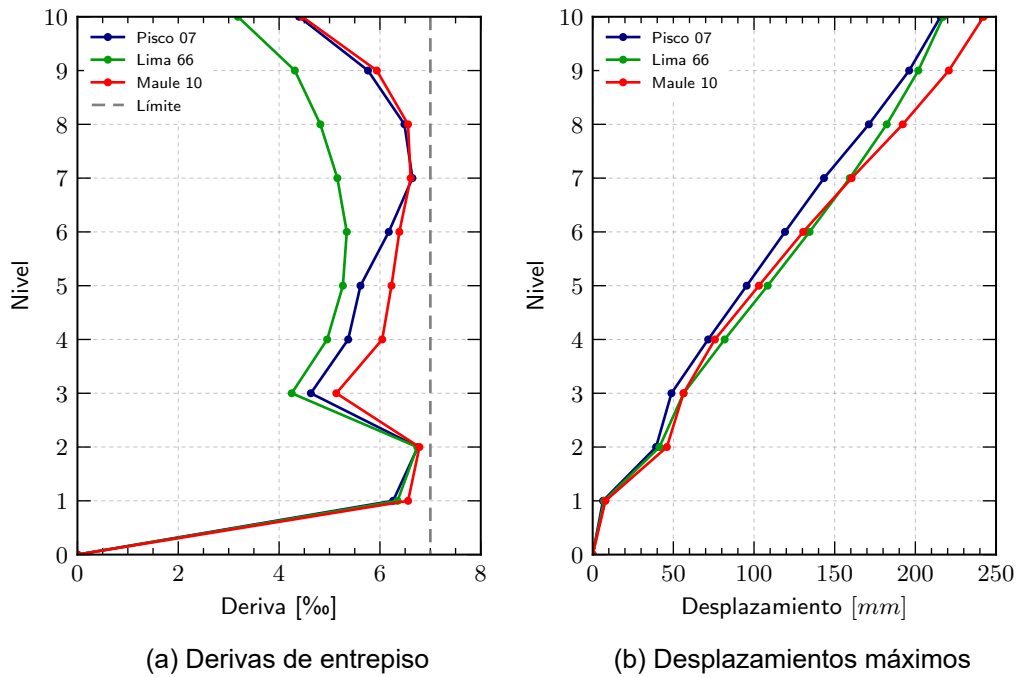


FIGURA N° 7.10: Respuestas sísmicas del edificio Jorge Chávez con DH.

A continuación, se muestran las respuestas sísmicas de la edificación con DH en superposición con las repuestas para la misma edificación pero sin DH.

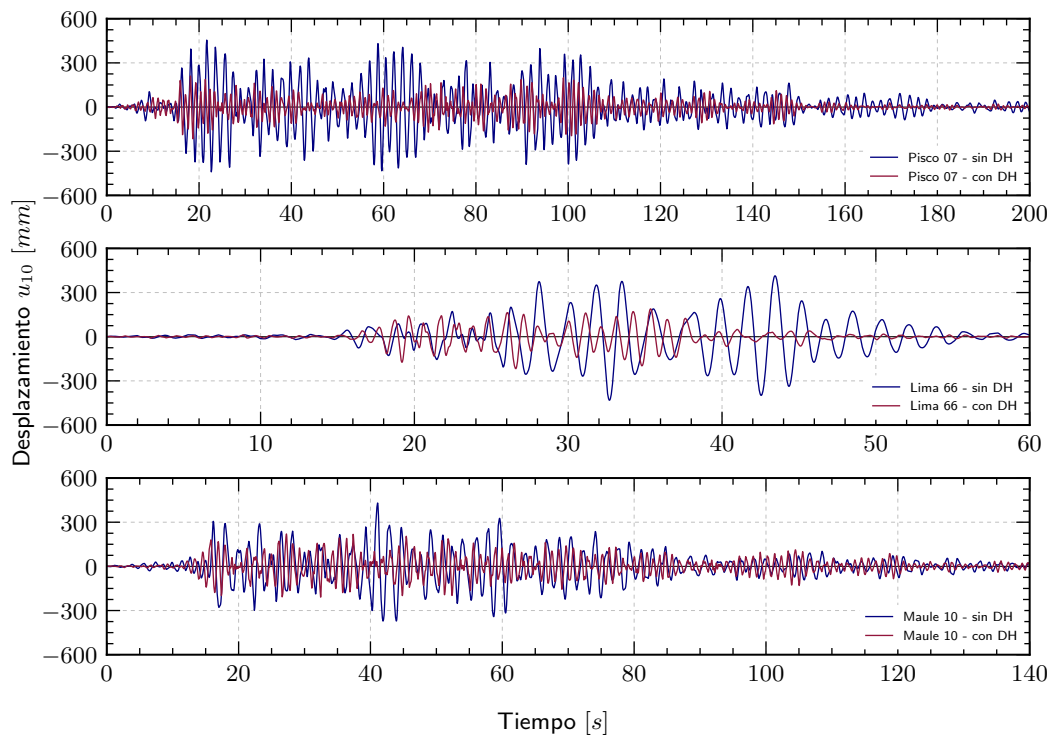


FIGURA N° 7.11: Desplazamiento u_{10} del edificio Jorge Chávez con DH.

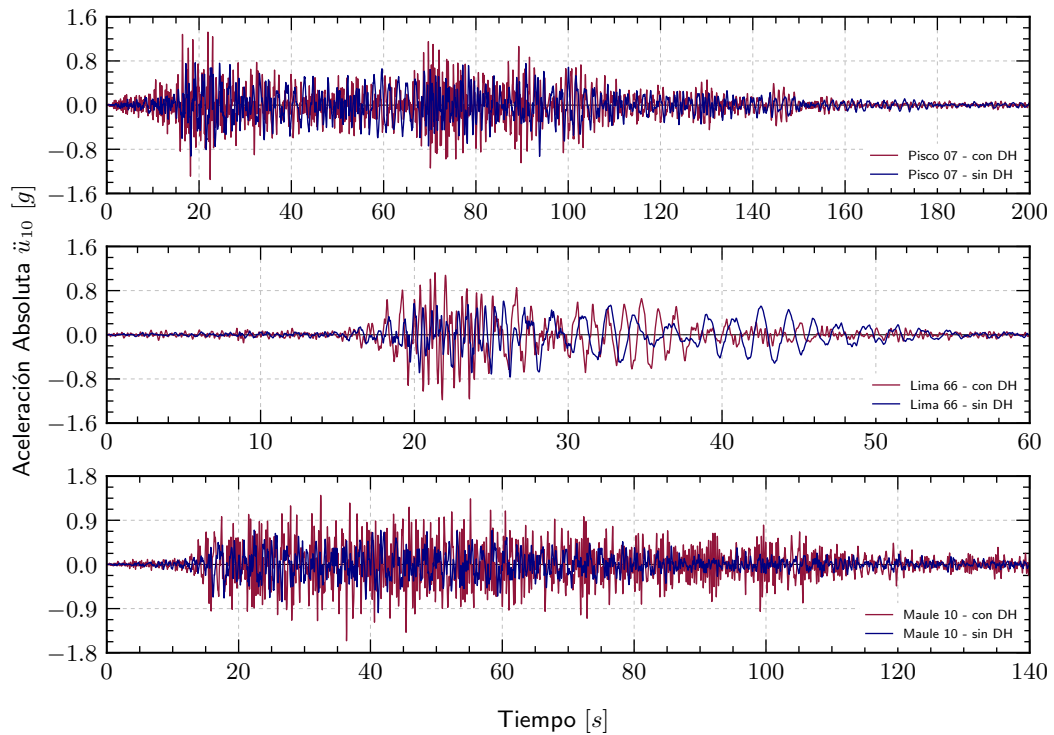


FIGURA N° 7.12: Aceleración \ddot{u}_{10} del edificio Jorge Chávez con DH.

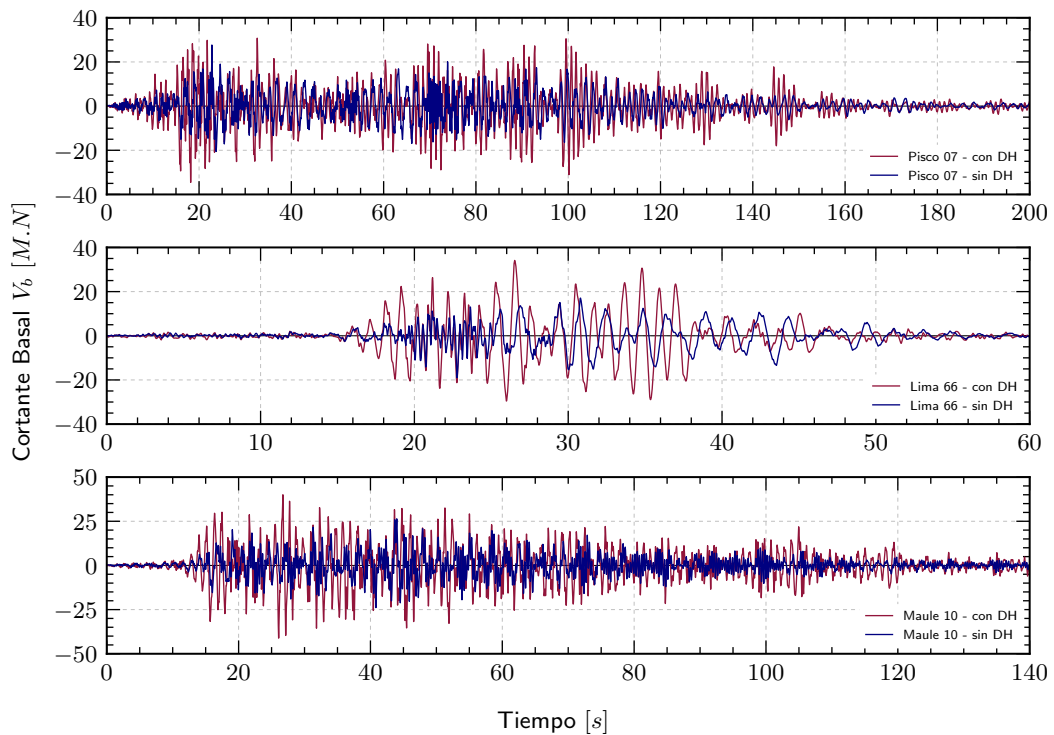


FIGURA N° 7.13: Cortante basal V_b del edificio Jorge Chávez con DH.

En la Figura N° 7.11 se observa que la incorporación de DH reduce de manera significativa el desplazamiento del último nivel de la edificación. Sin embargo, la Fi-

gura N° 7.12 muestra que la aceleración absoluta del último nivel se incrementa al incorporar DH. Además, la Figura N° 7.13 evidencia un incremento en la fuerza cortante basal total en la edificación con DH. Es preciso indicar que gran parte de esta fuerza cortante basal es tomada por los DH; de esta manera, la estructura principal recibe una fuerza cortante menor a la que recibiría si no tuviese DH. El incremento de las aceleraciones y de la fuerza cortante basal total responde al hecho que los disipadores histeréticos incrementan la rigidez lateral de la edificación.

La Tabla N° 7.7 muestra las respuestas sísmicas máximas (en valor absoluto) de la edificación Jorge Chávez para los tres registros sísmicos usados. Asimismo, esta tabla también los porcentajes de reducción de las respuestas sísmicas.

TABLA N° 7.7: Respuestas sísmicas máximas y porcentaje de reducción

Registro sísmico	Sin DH			Con DH			Reducción		
	u_{10}	\ddot{u}_{10}	V_b	u_{10}	\ddot{u}_{10}	V_b	u_{10}	\ddot{u}_{10}	V_b
	[mm]	[g]	[M.N]	[mm]	[g]	[M.N]	[%]	[%]	[%]
Pisco 07	454.8	0.93	27.7	215.6	1.35	34.6	52.6	-45.3	-24.9
Lima 66	431.9	0.77	19.0	217.3	1.18	34.1	49.7	-53.4	-79.8
Maule 10	430.6	0.98	26.4	220.4	1.56	41.2	48.8	-58.1	-55.9

7.1.3.3 Reducción de las Respuestas Sísmicas

Los porcentajes de reducción de las respuestas sísmicas, obtenidos luego de incorporar DH en la edificación, que se presentaron en la Tabla N° 7.7 serán promediados para cada respuesta sísmica. De este modo se tendrá un porcentaje de reducción promedio respecto del desplazamiento del último nivel, de la aceleración absoluta del último nivel y de la fuerza cortante basal.

Por otro lado, de las Figuras N° 5.14, N° 5.15 y N° 5.16 se pueden obtener las reducciones de las respuestas sísmicas alcanzadas por una edificación de 10 niveles, con $\eta_\delta = 0.4$ y que incorpora DH. Es preciso mencionar que estas reducciones corresponden a modelos simplificados.

TABLA N° 7.8: Comparación de porcentajes de reducción

Porcentaje de reducción [%]			
Modelo	u_{10}	\ddot{u}_{10}	V_b
ETABS	50	-52	-54
Simplificado	65	48	42

Los valores negativos que se observan en la Tabla N° 7.8 significan que no se lo-

gró una reducción de las respuestas sísmicas; sino por el contrario, que luego de incorporar los DH las respuestas aumentan. Por lo tanto, existe discrepancia entre las reducciones obtenidas con el modelo tridimensional en ETABS y las obtenidas usando modelos simples, con respecto a la aceleración absoluta del último nivel y a la fuerza cortante basal total. Por otro lado, el porcentaje de reducción respecto al desplazamiento del último nivel obtenido por ambos modelos tiene valores relativamente cercanos.

7.2 EDIFICIO DE VIVIENDA MULTIFAMILIAR

El edificio de vivienda multifamiliar que se analizará tiene con 7 niveles y 2 sótanos, con una altura aproximada de 20 metros, una altura de entrepiso típico de 2.85 metros y un área en planta de 335 metros cuadrados.

La edificación presenta un sistema estructural dual basado en pórticos y muros de concreto armado. Las dos cajas de ascensores están excéntricas con relación a la planta de la edificación produciendo asimetría. Por otro lado, como se puede apreciar en la Figura N° 7.14, en el eje A-A se tiene un muro estructural más largo que el muro del eje E-E. Asimismo, en el eje 4-4 se tiene un muro estructural muy largo que genera irregularidad. En consecuencia, el principal problema estructural detectado es la asimetría de los elementos que aportan rigidez lateral.

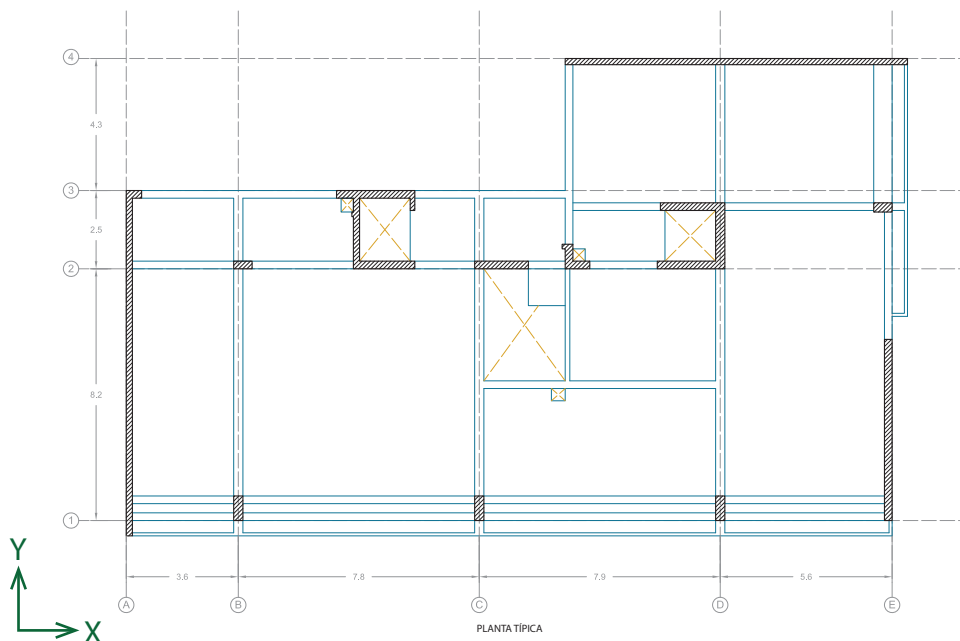


FIGURA N° 7.14: Vista en planta del edificio de vivienda multifamiliar.

Se plantean dos alternativas para mejorar el comportamiento sísmico de esta edificación, la primera usando AMS y la segunda incorporando DH. Se buscará reducir la deriva de entrepiso a 7 ‰. Los resultados mostrados corresponden a la dirección

transversal del edificio (dirección Y), la cual presenta los mayores desplazamientos.

7.2.1 Edificación Original

En la Figura N° 7.15 se muestra el modelo matemático tridimensional del edificio de vivienda multifamiliar.

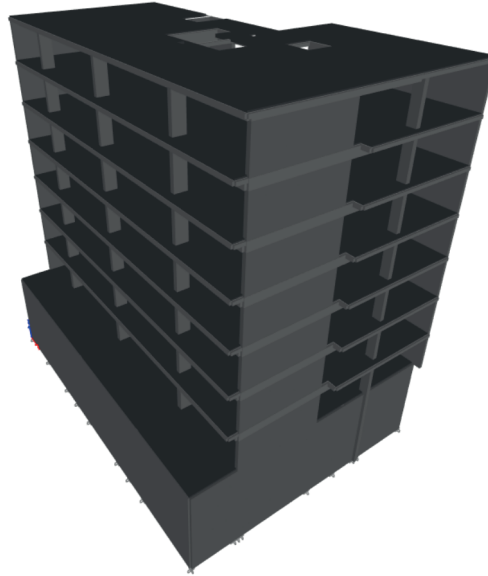


FIGURA N° 7.15: Modelo numérico del edificio de vivienda multifamiliar.

7.2.1.1 Características Dinámicas

En la Tabla N° 7.9 se muestran los periodos naturales de vibración y las masas participativas (expresadas como porcentaje de la masa total). El periodo fundamental de la edificación es de 0.59 segundos, que es un valor apropiado para una edificación de 7 niveles. Asimismo, se puede apreciar que el modo fundamental es en la dirección transversal (eje Y).

TABLA N° 7.9: Características dinámicas del edificio de viviendas

Modo	T [s]	Masa participativa [%]			Acum. de masa participativa [%]		
		UX	UY	RZ	UX	UY	RZ
1	0.59	18.7	24.2	10.9	18.7	24.2	10.9
2	0.39	32.2	22.3	0.1	50.9	46.5	10.9
3	0.23	4.5	8.2	38.6	55.4	54.7	49.5
4	0.17	0.0	0.0	0.0	55.4	54.7	49.5
5	0.14	0.0	0.3	0.0	55.4	55.0	49.5
6	0.13	5.7	4.8	3.7	61.1	59.7	53.2

7.2.1.2 Respuestas Sísmicas

En la Figura N° 7.16a se aprecian las derivas de entrepiso de la dirección transversal de la edificación, observándose que superan el límite de 7 ‰ que se tiene como objetivo. Por otro lado, la Figura N° 7.16b presenta los desplazamientos máximos de la estructura, de donde se observa que el último nivel de la edificación sufre desplazamientos de hasta 140 milímetros. Es preciso indicar que los valores mostrados en ambas gráficas son las respuestas máximas (en valor absoluto) de un ATHL.

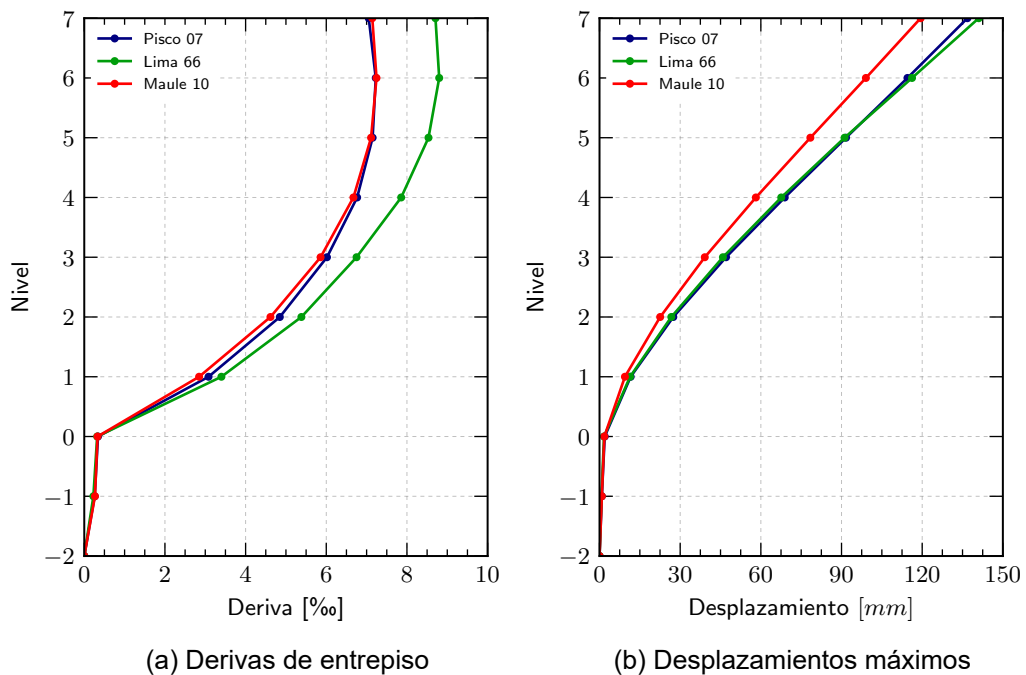


FIGURA N° 7.16: Respuestas sísmicas del edificio de vivienda.

7.2.2 Edificación con Amortiguador de Masa Sintonizada

En la Figura N° 7.17 se muestra el modelo matemático tridimensional del edificio de vivienda multifamiliar que incorpora un amortiguador de masa sintonizada en su último nivel. El AMS fue modelado como una losa de concreto con una carga uniformemente distribuida montada sobre elementos *link* con comportamiento lineal. La estructura será sometida una serie de análisis tiempo historia, considerando para esto que tanto la edificación así como el AMS presentan un comportamiento lineal y elástico.

La ubicación en planta del AMS se realizó siguiendo las recomendaciones dadas por Inga (2015), es decir, el AMS se ubicó a largo de la línea que une el centro de masa (CM) y el centro de rigidez (CR).

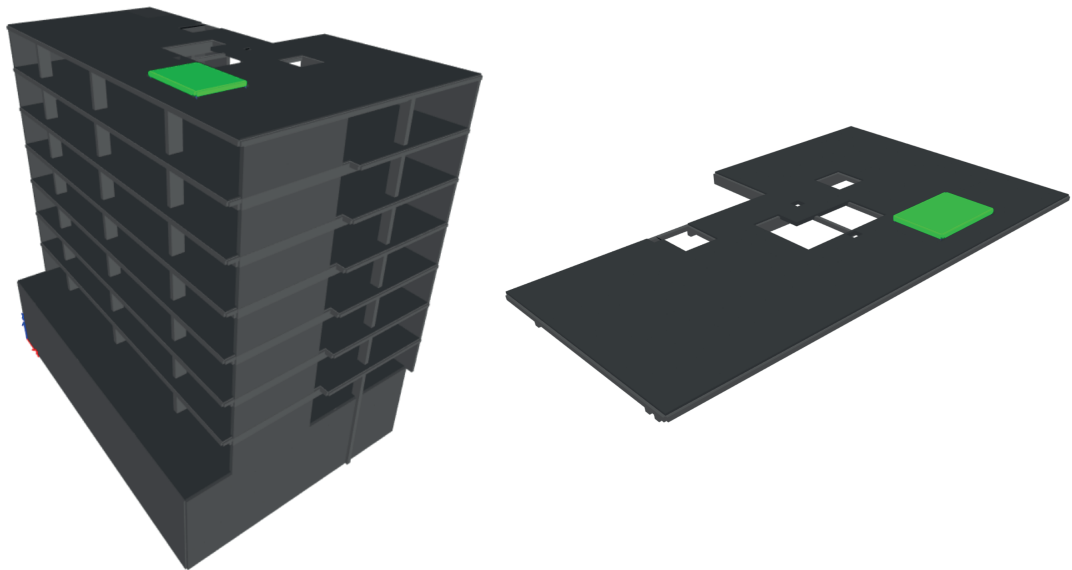


FIGURA N° 7.17: Modelo numérico del edificio de vivienda con AMS.

7.2.2.1 Predimensionamiento

En predimensionamiento del AMS se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 6.3. A continuación se muestran los resultados.

- Datos iniciales.

$$T_1 = 0.59 \text{ s}; \quad \beta = 5\%; \quad n = 7$$

- Periodo de sintonización, razón de masa y fracción de amortiguamiento crítico del AMS.

$$T_a = 0.59 \text{ s}; \quad r_a = 2\%; \quad \beta_a = 12\%$$

Dado que el sistema incorpora un porcentaje de amortiguamiento crítico global $\beta = 5\%$, entonces para modelar el AMS en *ETABS* se debe usar porcentaje de amortiguamiento crítico modificado, que se calcula de la siguiente manera:

$$\beta_a^* = \beta_a - \beta = 7\%$$

- Masa del AMS.

$$m_{tot} = 2700 \text{ kN} \cdot \text{s}^2/\text{m} \quad m_a = r_a m_{tot} = 54 \text{ kN} \cdot \text{s}^2/\text{m}$$

Se usó una losa de 4.0m x 2.8m, con un peso $w = 47.30 \text{ kN}/\text{m}^2$.

- Rigidez del AMS.

$$k_a = \left(\frac{2\pi}{T_a}\right)^2 m_a = 6060 \text{ kN/m}$$

Considerando que se montará la losa del AMS sobre cuatro elementos link entonces la rigidez lateral unitaria de cada elemento resulta $k_{a\text{ uni.}} = 1515 \text{ kN/m}$.

- Amortiguamiento del AMS.

$$c_a = 2\sqrt{k_a m_a} \beta_a^* = 80 \text{ kN.s/m}$$

El amortiguamiento unitario de cada elemento link será $c_{a\text{ uni.}} = 20 \text{ kN.s/m}$.

7.2.2.2 Respuestas Sísmicas

En la Figura N° 7.18a se aprecian las derivas de entrepiso de la dirección transversal de la edificación que incorpora un AMS, observándose que están por debajo del límite de 7 ‰ que se tiene como objetivo. Por otro lado, la Figura N° 7.18b presenta los desplazamientos máximos de la estructura, de donde se observa que en el último nivel de la edificación se tiene desplazamientos de hasta 118 milímetros.

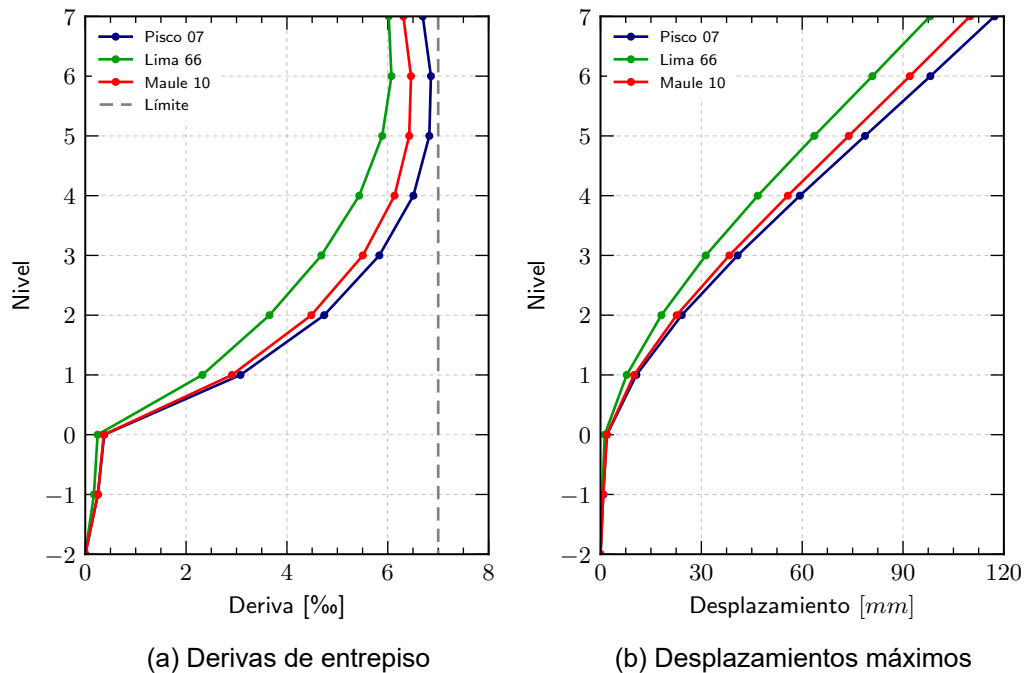


FIGURA N° 7.18: Respuestas sísmicas del edificio de vivienda con AMS.

A continuación, se muestran las respuestas sísmicas de la edificación de vivienda multifamiliar con AMS en superposición con las repuestas para la misma edificación pero sin AMS, a fin de poder apreciar de manera gráfica las reducciones obtenidas. Las Figuras N° 7.19, N° 7.20 y N° 7.21 presentan los valores en el tiempo del des-

plazamiento del último nivel, la aceleración absoluta del último nivel y la fuerza cortante basal, respectivamente.

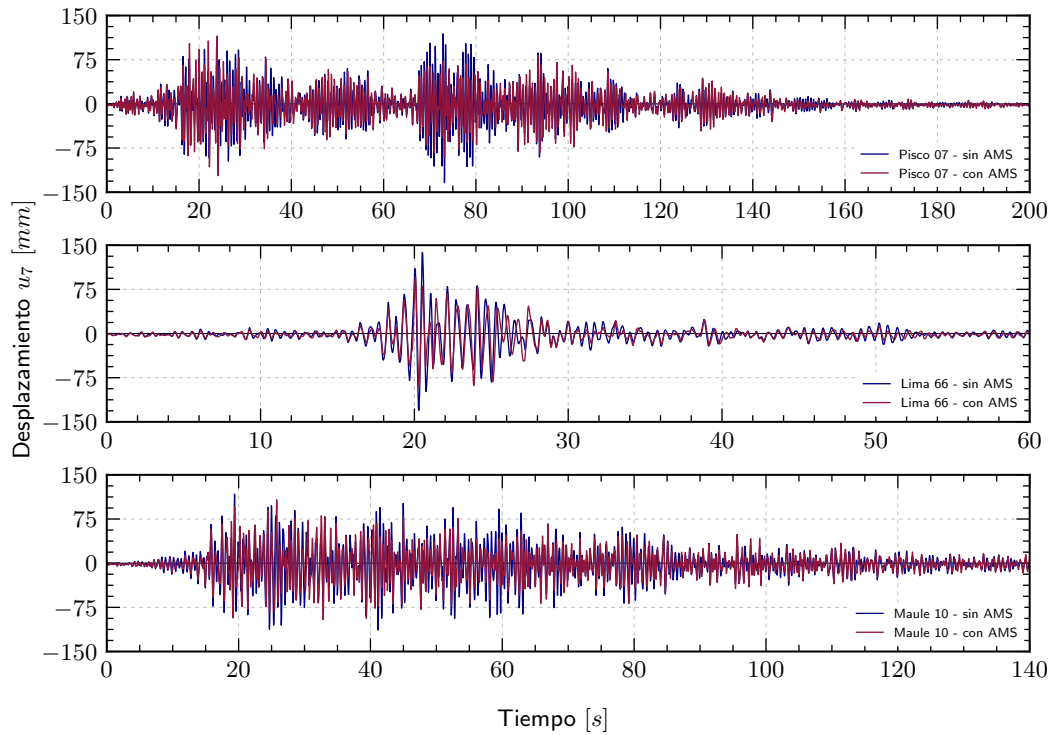


FIGURA N° 7.19: Desplazamiento u_7 del edificio de vivienda con AMS.

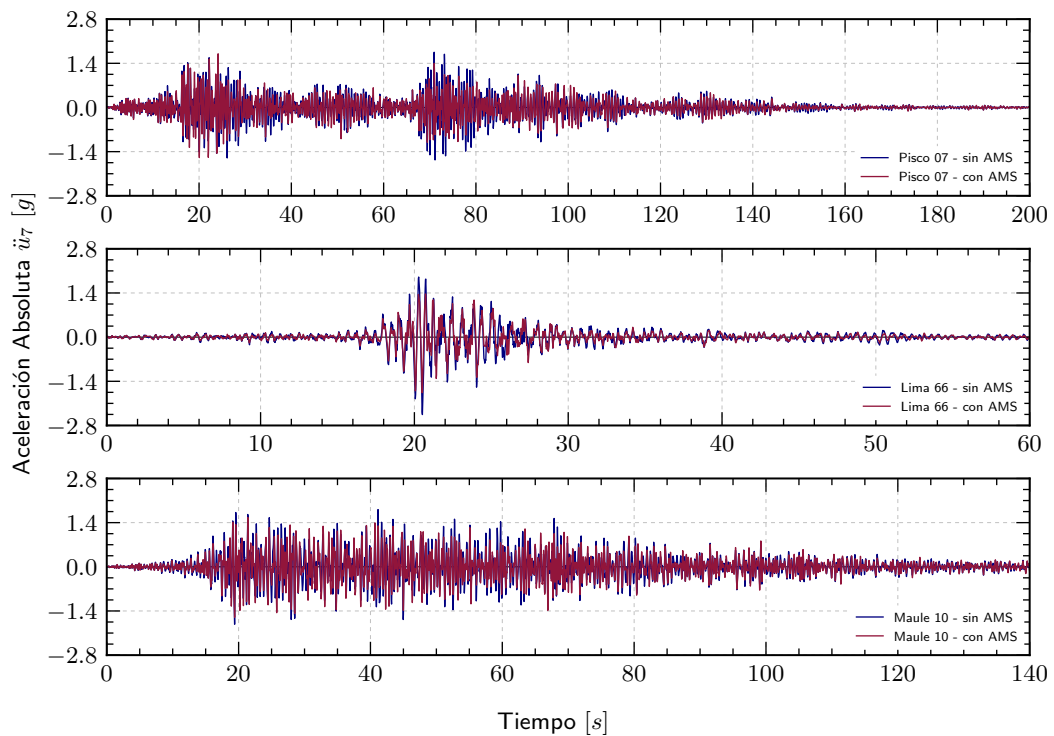


FIGURA N° 7.20: Aceleración \ddot{u}_7 del edificio de vivienda con AMS.

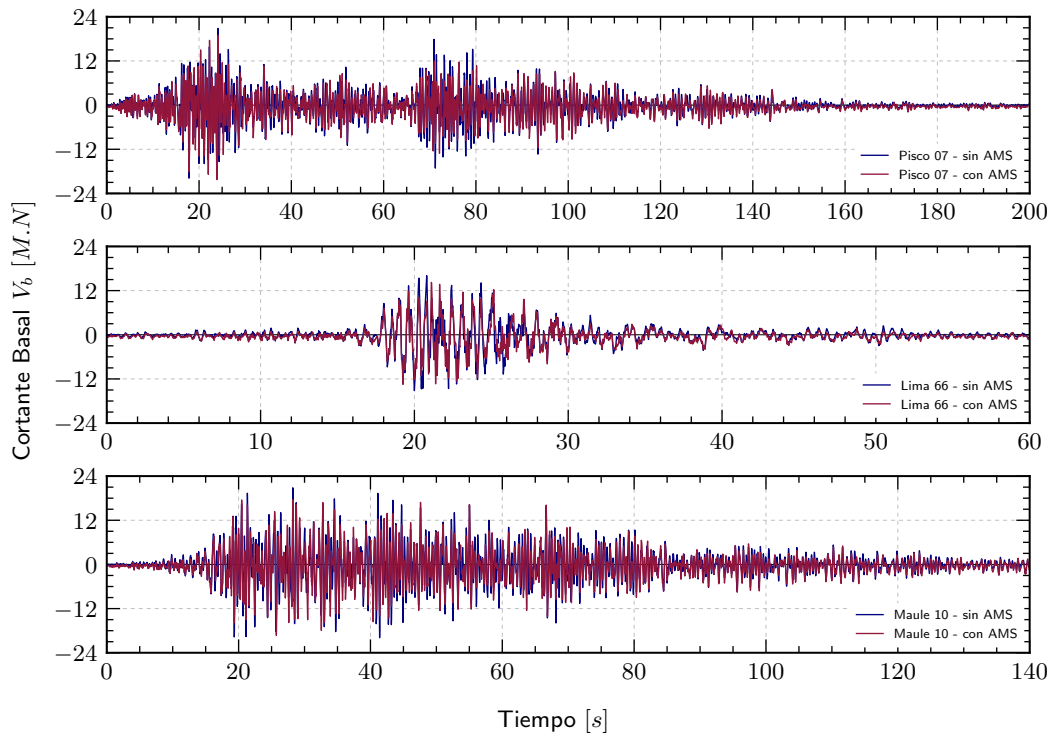


FIGURA N° 7.21: Cortante basal V_b del edificio de vivienda con AMS.

La Tabla N° 7.10 muestra las respuestas sísmicas máximas (en valor absoluto) de la edificación de vivienda multifamiliar para los tres registros sísmicos usados. Asimismo, esta tabla presenta los porcentajes de reducción de las respuestas sísmicas.

TABLA N° 7.10: Respuestas sísmicas máximas y porcentaje de reducción

Registro sísmico	Sin AMS			Con AMS			Reducción		
	u_7	\ddot{u}_7	V_b	u_7	\ddot{u}_7	V_b	u_7	\ddot{u}_7	V_b
	[mm]	[g]	[M.N]	[mm]	[g]	[M.N]	[%]	[%]	[%]
Pisco 07	133.7	1.75	20.8	122.0	1.70	20.2	8.8	2.8	2.9
Lima 66	137.8	2.46	16.1	95.6	1.76	14.2	30.6	28.3	11.3
Maule 10	117.3	1.82	20.8	107.7	1.60	19.3	8.2	12.2	7.5

7.2.2.3 Reducción de las Respuestas Sísmicas

Los porcentajes de reducción de las respuestas sísmicas, obtenidos luego de incorporar AMS en la edificación, que se presentaron en la Tabla N° 7.10 serán promediados para cada respuesta sísmica. De este modo se tendrá un porcentaje de reducción promedio respecto del desplazamiento del último nivel, de la aceleración absoluta del último nivel y de la fuerza cortante basal.

Por otro lado, de las Figuras N° 6.7, N° 6.8 y N° 6.9 se pueden obtener las reducciones de las respuestas sísmicas alcanzadas por una edificación de 7 niveles y con $r_a = 2\%$. Es preciso mencionar que estas reducciones corresponden a modelos simplificados.

TABLA N° 7.11: Comparación de porcentajes de reducción

Porcentaje de reducción [%]			
Modelo	u_7	\ddot{u}_7	V_b
ETABS	16	14	7
Simplificado	17	9	26

Como se aprecia en la Tabla N° 7.11, los porcentajes de reducción alcanzados tanto por el modelo tridimensional en ETABS así como por el modelo simplificado tienen valores similares hablando en términos del desplazamiento del último nivel y en menor medida de la aceleración del último nivel, sin embargo, existe cierta discrepancia entre las reducciones obtenidas por ambos modelos en términos de la fuerza cortante basal.

7.2.3 Edificación con Disipadores Histeréticos

La Figura N° 7.22 muestra el modelo matemático tridimensional del edificio de vivienda que incorpora DH. Los DH se modelaron como elementos *link* con comportamiento histerético de Bouc Wen. La estructura será sometida una serie de ATHNL, considerando para esto que la edificación tiene un comportamiento lineal y elástico, y son únicamente los DH los que incursionan en el rango no lineal.

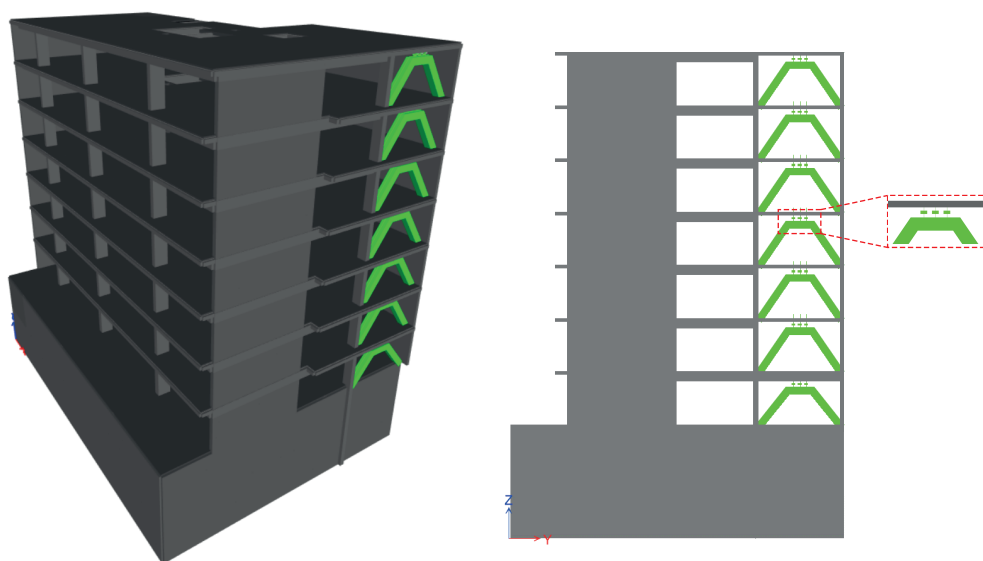


FIGURA N° 7.22: Modelo numérico del edificio de vivienda con DH.

Los disipadores histeréticos se colocaron a lo largo del eje E-E entre los ejes 2-2 y 3-3 en todos los niveles. La ubicación estratégica de los DH busca reducir la irregular distribución de la rigidez en planta que presenta la edificación, mejorando de esta manera su comportamiento sísmico.

7.2.3.1 Predimensionamiento

En predimensionamiento de los DH se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 5.3. A continuación se muestran se muestran los resultados.

- Datos iniciales.

$$T_1 = 0.59 s; \quad \beta = 5\%; \quad n = 7$$

- Seguir los siguientes cuatro pasos:

– *Paso 1: Identificación del factor de reducción objetivo.*

$$\eta_\delta = 0.75$$

– *Paso 2: Análisis tiempo historia de la edificación sin disipadores histeréticos.*

Luego de un análisis tiempo historia lineal se obtuvieron las fuerzas cortantes y las rigideces de entrepiso mostradas en la Tabla N° 7.12.

TABLA N° 7.12: Rigideces y cortantes de la edificación sin DH

Nivel	Rigidez [K]	Cortante [V _i]
	[kN/mm]	[kN]
7	555	10028
6	754	12953
5	928	14910
4	1119	16791
3	1373	17355
2	1803	16713
1	2868	16060

- *Paso 3: Identificación de los parámetros que definen a los disipadores histeréticos no lineales.*

De la Figura N° 5.7 se identificó los valores de κ_1 y κ_2 .

$$\kappa_1 = 2 \quad \wedge \quad \kappa_2 = 0.08$$

Con estos valores y teniendo en cuenta la Tabla N° 7.12 es posible obtener los parámetros que definen el comportamiento de los DH (se consideraron tres DH por cada nivel). Para el modelo final se agruparon todos los DH en tres grupos. Los disipadores histeréticos usados fueron de tipo SLB y sus características se presentan en la Tabla N° 7.13.

- *Paso 4: Análisis tiempo historia final.*

Se realizó un análisis tiempo historia final para obtener las respuestas sísmicas de la edificación para cada registro sísmico.

TABLA N° 7.13: Propiedades histeréticas de los DH

Nivel	Rigidez E.	F. Fluencia	ID	K_e	F_y	α	η
	[kN/mm]	[kN]	-	[kN/mm]	[kN]	-	-
7	370	267	SLB3 30_4	566	317	0.0163	2
6	503	345					
5	618	398	SLB3 30_6	734	414	0.0159	2
4	746	448					
3	915	463	SLB3 30_7	811	461	0.0157	2
2	1202	446					
1	1912	428					

7.2.3.2 Respuestas Sísmicas

En la Figura N° 7.23a se aprecian las derivas de entrepiso de la dirección transversal de la edificación de vivienda multifamiliar con DH, observándose que están por debajo del límite de 7 ‰ que se tiene como objetivo. Por otro lado, la Figura N° 7.23b presenta los desplazamientos máximos de la estructura, de donde se observa que el último nivel de la edificación sufre desplazamientos de hasta 115 milímetros.

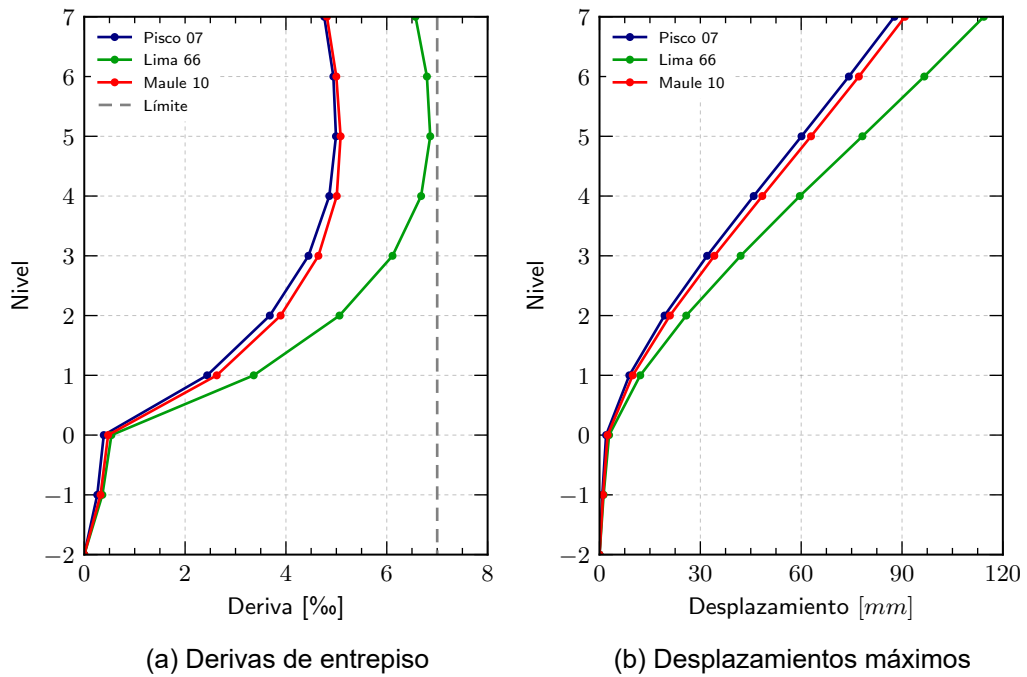


FIGURA N° 7.23: Respuestas sísmicas del edificio de vivienda con DH.

A continuación, se muestran las respuestas sísmicas de la edificación con DH en superposición con las repuestas para la misma edificación pero sin DH.

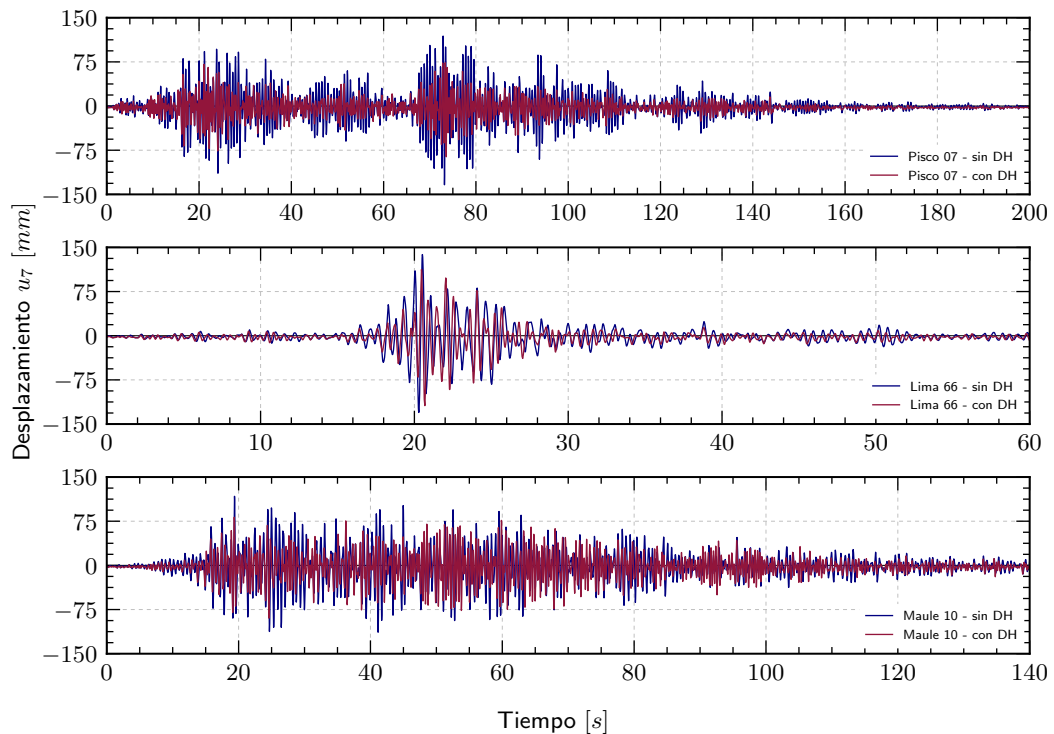


FIGURA N° 7.24: Desplazamiento u_7 del edificio de vivienda con DH.

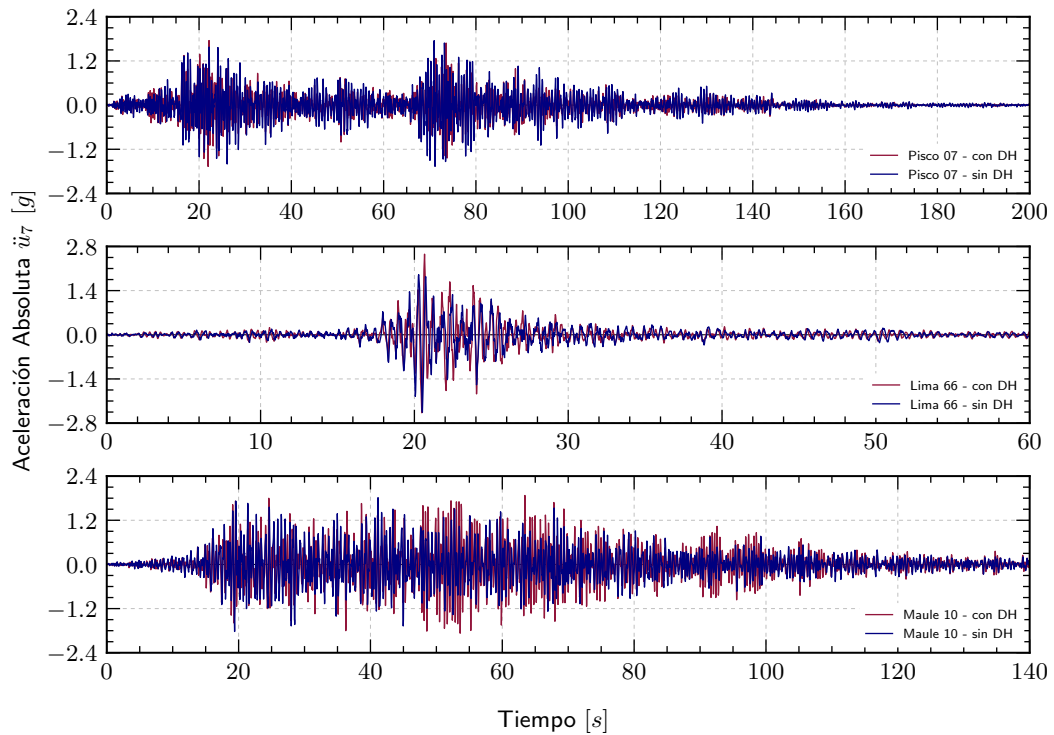


FIGURA N° 7.25: Aceleración \ddot{u}_7 del edificio de vivienda con DH.

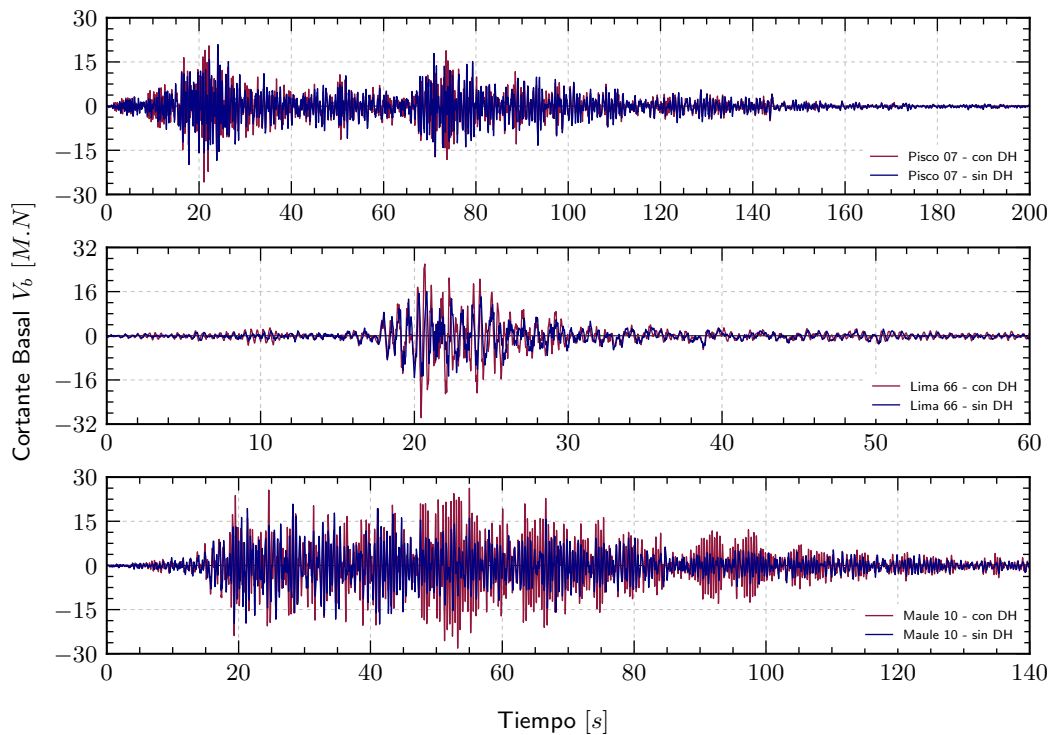


FIGURA N° 7.26: Cortante basal V_b del edificio de vivienda con DH.

De la Figura N° 7.24 se observar que la incorporación de DH reduce el desplazamiento del último nivel de la edificación. Sin embargo, las Figuras N° 7.25 y N° 7.26

muestran que tanto la aceleración absoluta del último nivel así como la fuerza cortante basal presentan mayores valores en la edificación con DH que en la misma edificación sin DH. Gran parte de la fuerza cortante basal total es tomada por los DH; por lo tanto, la estructura principal solo recibe un porcentaje de la misma.

La Tabla N° 7.14 muestra las respuestas sísmicas máximas (en valor absoluto) de la edificación de vivienda multifamiliar para los tres registros sísmicos usados. Asimismo, esta tabla presenta los porcentajes de reducción de las respuestas sísmicas.

TABLA N° 7.14: Respuestas sísmicas máximas y porcentaje de reducción

Registro sísmico	Sin DH			Con DH			Reducción		
	u_7	\ddot{u}_7	V_b	u_7	\ddot{u}_7	V_b	u_7	\ddot{u}_7	V_b
	[mm]	[g]	[M.N]	[mm]	[g]	[M.N]	[%]	[%]	[%]
Pisco 07	133.7	1.75	20.8	86.1	1.75	25.8	35.6	-0.2	-23.7
Lima 66	137.8	2.46	16.1	118.8	2.55	29.7	13.8	-4.1	-85.1
Maule 10	117.3	1.82	20.8	89.7	1.87	28.1	23.5	-2.8	-35.0

7.2.3.3 Reducción de las Respuestas Sísmicas

Los porcentajes de reducción de las respuestas sísmicas, obtenidos luego de incorporar DH en la edificación, que se presentaron en la Tabla N° 7.14 serán promediados para cada respuesta sísmica. De este modo se tendrá un porcentaje de reducción promedio respecto del desplazamiento del último nivel, de la aceleración absoluta del último nivel y de la fuerza cortante basal.

Por otro lado, de las Figuras N° 5.14, N° 5.15 y N° 5.16 se pueden obtener las reducciones de las respuestas sísmicas alcanzadas por una edificación de 7 niveles, con $\eta_\delta = 0.75$ y que incorpora DH. Es preciso mencionar que estas reducciones corresponden a modelos simplificados.

TABLA N° 7.15: Comparación de porcentajes de reducción

Porcentaje de reducción [%]			
Modelo	u_7	\ddot{u}_7	V_b
ETABS	24	-2	-48
Simplificado	22	13	25

Los valores negativos que se observan en la Tabla N° 7.15 indican que no se logró una reducción de las respuestas sísmicas; sino por el contrario, que luego de incorporar los DH las respuestas aumentan. Por lo tanto, existe discrepancia entre

las reducciones obtenidas con el modelo tridimensional en ETABS y las obtenidas usando modelos simples, con respecto a la aceleración absoluta del último nivel y a la fuerza cortante basal total. Sin embargo, el porcentaje de reducción respecto al desplazamiento del último nivel obtenidos por ambos modelos son muy similares.

7.3 EDIFICIO DEL CENTRO DE INFORMACIÓN FIC UNI

La edificación del centro de información de la FIC UNI cuenta con 8 niveles, con una altura total aproximada de 29 metros, una altura de entrepiso de 3.6 metros y un área en planta de 574 metros cuadrados.

La edificación en cuestión presenta un sistema estructural basado en pórticos de concreto armado. Tal como se aprecia en la Figura N° 7.27 la rigidez se encuentra distribuida de manera equitativa en planta, evitando de esta manera problemas con torsiones excesivas. El principal problema estructural detectado es la poca rigidez lateral en ambas direcciones de la edificación, la cual a su vez provoca derivas excesivas.

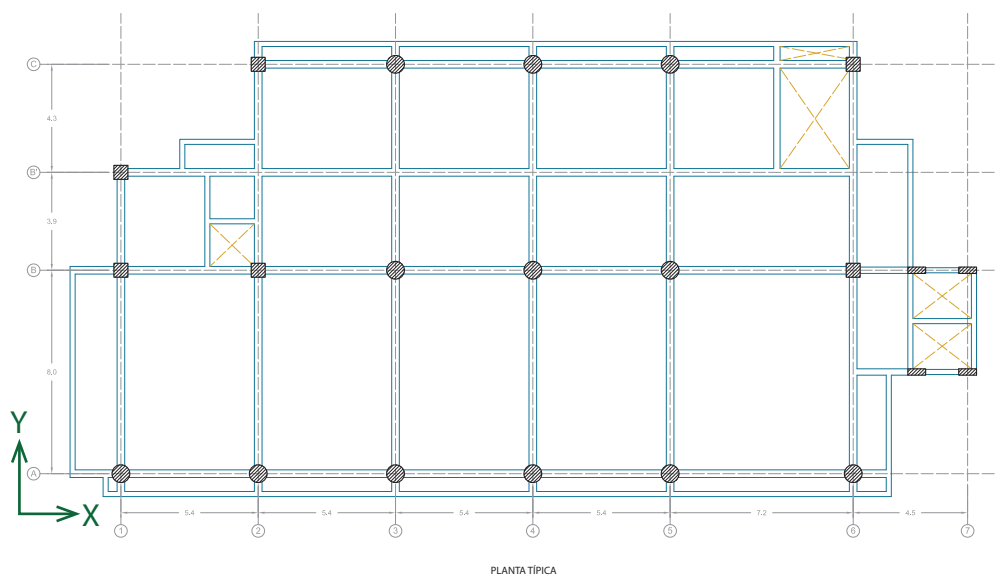


FIGURA N° 7.27: Vista en planta de la edificación del centro de información FIC UNI.

Esta edificación ya fue construida e incorpora un sistema de aislamiento de base que fue diseñado por el MSc. Ricardo Proaño Tataje, con la supervisión del Dr. Hugo Scaletti Farina. Sin embargo, con fines académicos, en la presente tesis se plantean dos alternativas para mejorar el comportamiento sísmico de dicha edificación, la primera usando aisladores sísmicos y la segunda incorporando disipadores de fluidos viscoso. Con ambas alternativas se busca reducir la deriva de entrepiso a 5 ‰, que es el límite dado por la norma E.031 para edificaciones con aislamiento sísmico. Los resultados que se presentarán corresponden a la dirección transversal

de la edificación, ya que esta dirección sufren las mayores deformaciones laterales.

7.3.1 Edificación con Base Fija

En la Figura N° 7.28 se muestra el modelo matemático tridimensional del edificio del centro de información FIC UNI considerando que tiene base fija y que no incorpora ningún sistema de control.

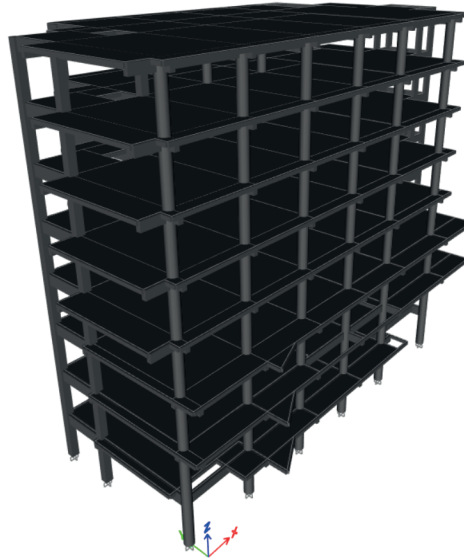


FIGURA N° 7.28: Modelo numérico de la edificación del centro de información FIC UNI.

7.3.1.1 Características Dinámicas

En la Tabla N° 7.16 se muestran los periodos naturales de vibración y las masas participativas (expresada como porcentaje de la masa total). El periodo fundamental de la edificación es de 1.22 segundos. Asimismo, se puede apreciar que el modo fundamental es en la dirección transversal (eje Y).

TABLA N° 7.16: Características dinámicas del edificio de viviendas

Modo	T [s]	Masa participativa [%]			Acum. de masa participativa [%]		
		UX	UY	RZ	UX	UY	RZ
1	1.22	17.7	53.1	10.2	17.7	53.1	10.2
2	1.21	61.6	17.0	1.2	79.3	70.1	11.4
3	1.08	0.3	10.1	69.5	79.6	80.3	80.9
4	0.40	0.0	8.5	1.7	79.6	88.8	82.6
5	0.39	11.2	0.0	0.0	90.7	88.8	82.6
6	0.36	0.0	2.2	9.2	90.8	91.0	91.8

7.3.1.2 Respuestas Sísmicas

En la Figura N° 7.29a se presentan las derivas de entrepiso de la dirección transversal de la edificación, observándose que superan largamente el límite de 5 ‰ que se tiene como objetivo. La Figura N° 7.29b muestra los desplazamientos máximos de la estructura, observándose que el último nivel de la edificación sufre desplazamientos de hasta 265 milímetros. Es preciso indicar que los valores mostrados en ambas gráficas son las respuestas máximas (en valor absoluto) de un ATHL.

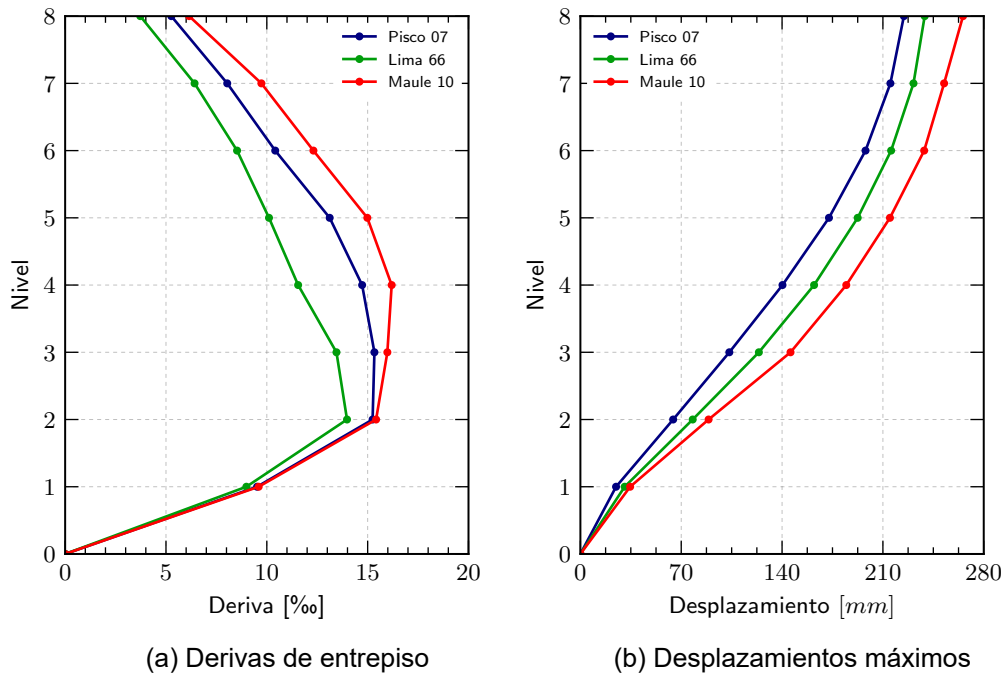


FIGURA N° 7.29: Respuestas sísmicas de la edificación del centro de información FIC UNI.

7.3.2 Edificación con Aislamiento de Base

En la Figura N° 7.30 se muestra el modelo matemático tridimensional de la edificación del centro de información FIC UNI que incorpora una interfaz de aislamiento sísmico. Los AS fueron modelados con elementos tipo *link - Rubber Isolator* con comportamiento histerético de Bouc Wen. La estructura será sometida a una serie de análisis tiempo historia no lineales, considerando para esto que la edificación tendrá un comportamiento lineal y elástico mientras que la no linealidad únicamente se concentrará en la interfaz de aislamiento.

La ubicación en planta de los aisladores sísmicos sigue la distribución de las columnas. Es decir, se colocará un AS debajo de cada columna que forme parte de un pórtico principal.

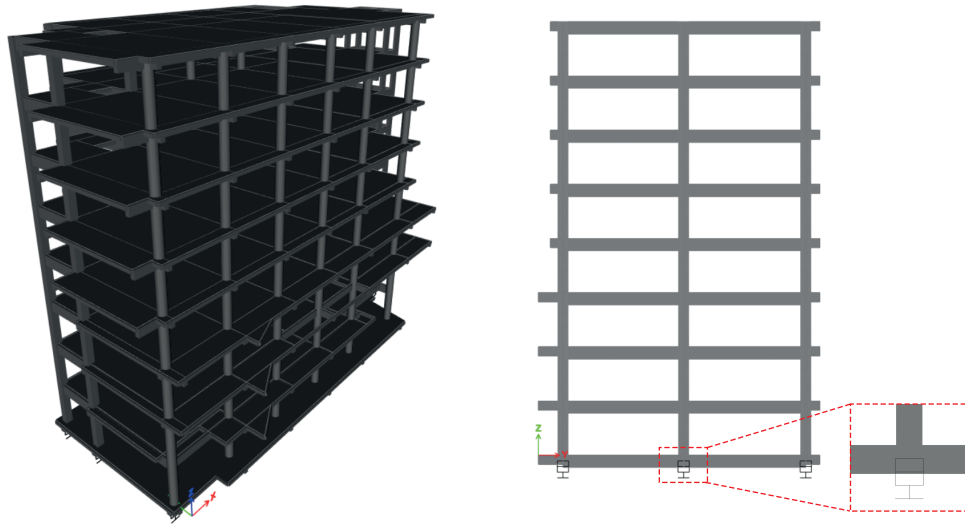


FIGURA N° 7.30: Modelo numérico del centro de información FIC UNI con AS.

7.3.2.1 Predimensionamiento

Las propiedades mecánicas de los aisladores sísmicos que se usarán para el modelo estructural de la presente investigación, son las mismas que las calculadas por Proaño (comunicación personal, marzo de 2021). Estas propiedades, que describen el comportamiento histerético de la interfaz de aislamiento, son el resultado de la aplicación del procedimiento descrito en el apartado 3.3. Asimismo, es preciso indicar que dichas características mecánicas son las que finalmente se implementaron en la edificación que se encuentra construida. Las propiedades generales del sistema de aislamiento se presentan a continuación.

- Período fundamental de la edificación en base fija, valor del porcentaje de amortiguamiento deseado y razón de aislamiento.

$$T_{1f} = 1.22 \text{ s}; \quad \beta_M = 15\%; \quad r = 2$$

- Período de la edificación aislada.

$$T_M = rT_{1f} = 2.44 \text{ s}$$

- Peso total de la edificación y rigidez efectiva del sistema de aislamiento.

$$W = 49150 \text{ kN}; \quad K_{effM} = \frac{4\pi^2 W}{T_M^2 g} = 33.22 \text{ kN/mm}$$

Se usaron un total de 20 aisladores sísmicos idénticos. Las propiedades mecánicas

finales para definir el comportamiento histerético de cada aislador fueron obtenidas luego de aplicar el procedimiento planteado por Naeim y Kelly (1999), considerando que los aisladores LRB elegidos deben poderse conseguir de manera comercial. A continuación, se presentan las características mecánicas del aislador típico.

- Fuerza característica y fuerza de fluencia del AS.

$$Q_d = 64.3 kN; \quad F_y = 71.4 kN$$

- Rigidez elástica y rigidez postfluencia del AS.

$$K_e = 10.0 kN/mm; \quad K_p = 0.996 kN/mm$$

7.3.2.2 Respuestas Sísmicas

En la Figura N° 7.31a se aprecian las derivas de entrepiso de la dirección transversal de la edificación que incorpora un AS, observándose que están por debajo del límite de 5 ‰. Por otro lado, la Figura N° 7.31b presenta los desplazamientos máximos de la estructura, de donde se observa que el último nivel de la edificación sufre desplazamientos relativos de hasta 90 milímetros.

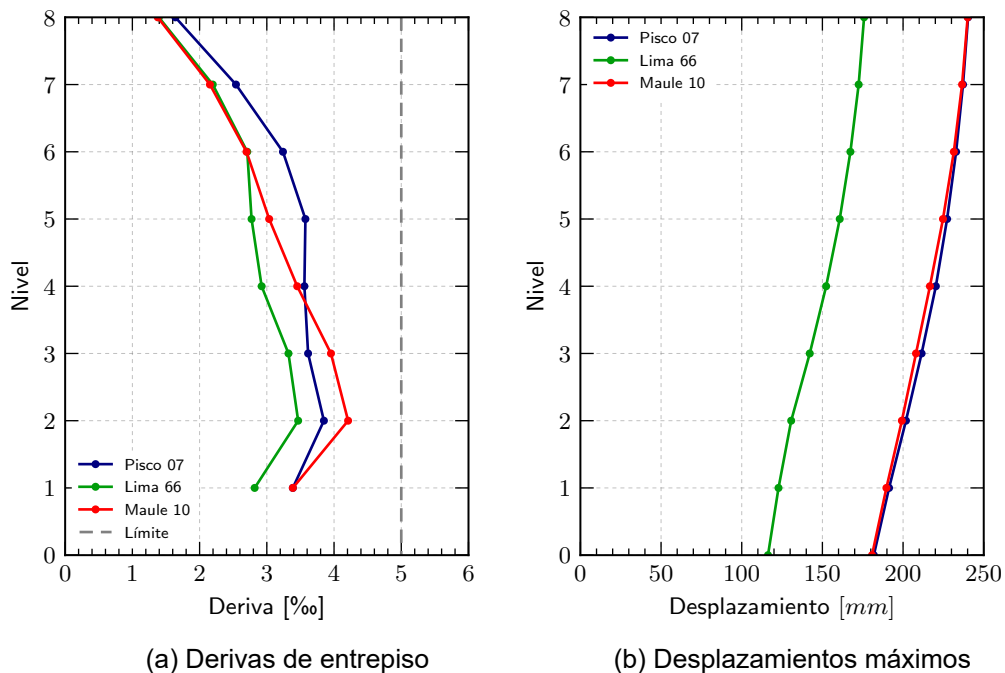


FIGURA N° 7.31: Respuestas sísmicas del centro de información FIC UNI con AS.

A continuación, se muestran las respuestas sísmicas de la edificación del centro de información FIC UNI que incorpora una interfaz de aislamiento. Las Figuras N° 7.32, N° 7.33 y N° 7.34 presentan los valores en el tiempo del desplazamiento relativo

del último nivel, la aceleración absoluta del último nivel y la fuerza cortante basal normalizada, respectivamente.

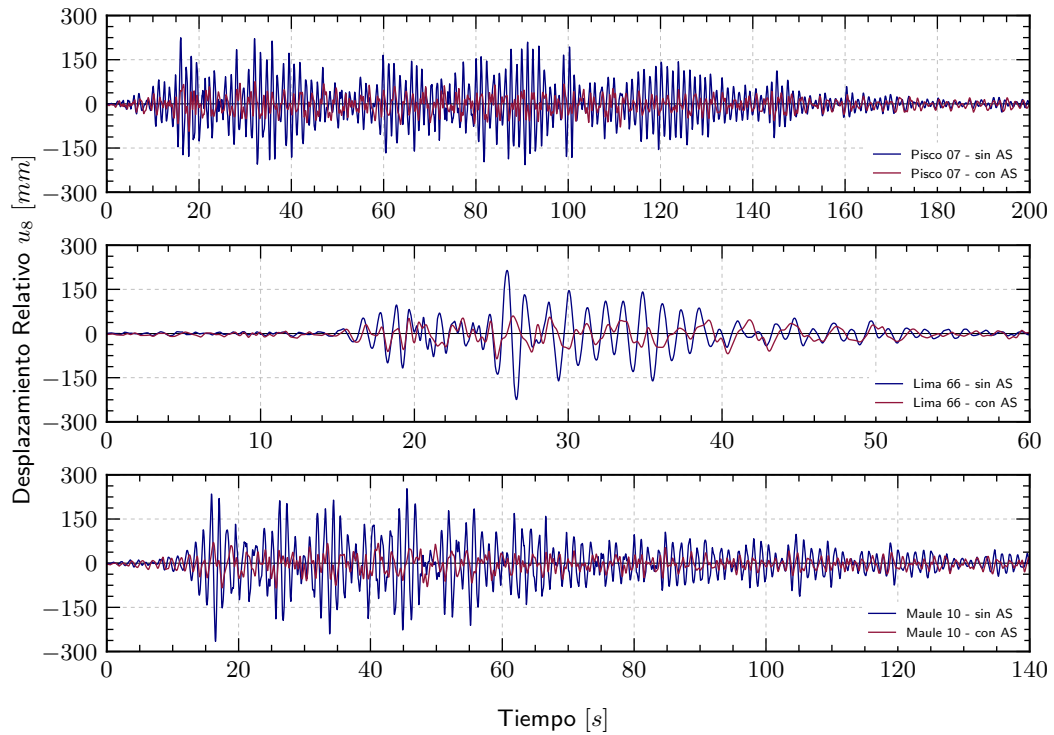


FIGURA N° 7.32: Desplazamiento u_s del centro de información FIC UNI con AS.

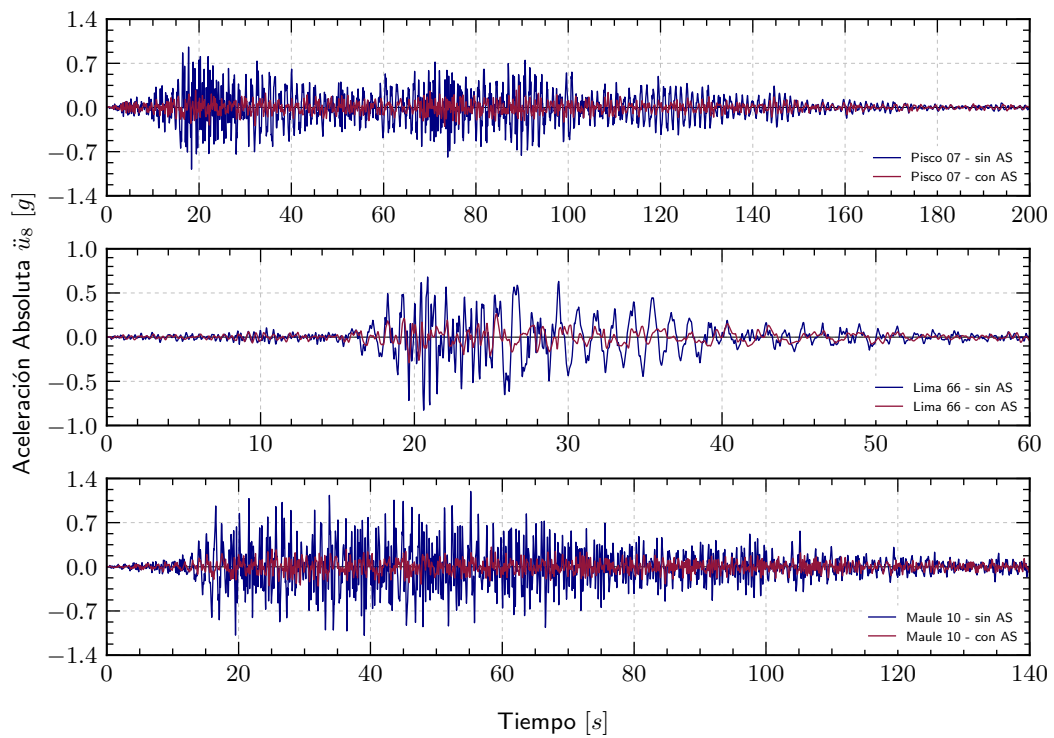


FIGURA N° 7.33: Aceleración \ddot{u}_s del centro de información FIC UNI con AS.

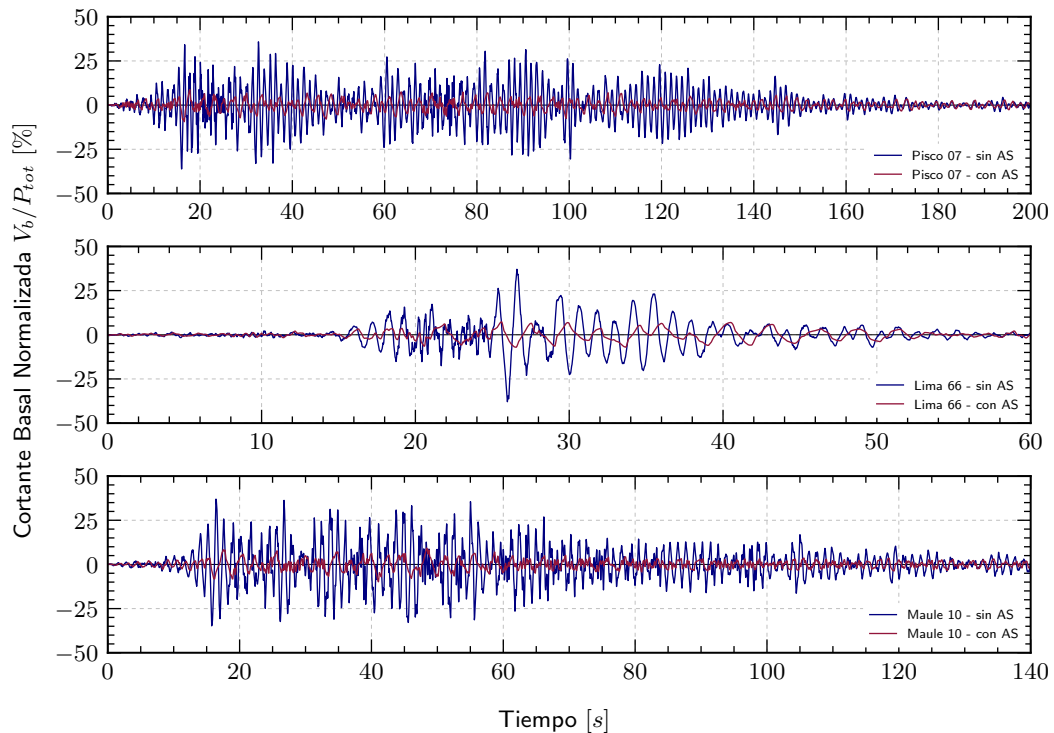


FIGURA N° 7.34: Cortante basal normalizada V_b/P_{tot} del centro de información FIC UNI con AS.

El peso de la edificación aislada es mayor que el peso de la edificación sin AS, por lo tanto se vio por conveniente normalizar las fuerzas cortantes basales respecto del peso total, tal como se aprecia en la Figura N° 7.34. Por otro lado, la Tabla N° 7.17 muestra las respuestas sísmicas máximas del centro de información FIC UNI para los tres registros sísmicos usados. Esta tabla también presenta los porcentajes de reducción de las respuestas sísmicas.

TABLA N° 7.17: Respuestas sísmicas máximas y porcentaje de reducción

Registro sísmico	Sin AS			Con AS			Reducción		
	u_8	\ddot{u}_8	V_b/P	u_8	\ddot{u}_8	V_b/P	u_8	\ddot{u}_8	V_b/P
	[mm]	[g]	[%]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]	[%]
Pisco 07	224.5	0.98	36.2	93.6	0.35	9.4	58.3	64.5	74.0
Lima 66	224.1	0.83	37.9	86.2	0.29	7.4	61.6	64.9	80.5
Maule 10	265.4	1.20	37.0	84.8	0.31	9.8	68.1	73.8	73.4

7.3.2.3 Reducción de las Respuestas Sísmicas

Los porcentajes de reducción de las respuestas sísmicas, obtenidos luego de incorporar aislamiento de base en la edificación, que se presentaron en la Tabla N° 7.17 serán promediados para cada respuesta sísmica. De este modo se ten-

drá un porcentaje de reducción promedio respecto del desplazamiento relativo del último nivel, de la aceleración absoluta del último nivel y de la fuerza cortante basal normalizada.

Por otro lado, de las Figuras N° 3.10, N° 3.11 y N° 3.12 se pueden obtener las reducciones de las respuestas sísmicas alcanzadas por una edificación de 8 niveles y con $r = 2$. Es preciso mencionar que estas reducciones corresponden a modelos simplificados.

TABLA N° 7.18: Comparación de porcentajes de reducción

Porcentaje de reducción [%]			
Modelo	u_8	\ddot{u}_8	V_b
ETABS	63	68	76
Simplificado	73	63	79

Como se aprecia en la Tabla N° 7.18, los porcentajes de reducción alcanzados tanto por el modelo modelo tridimensional en ETABS así como por el modelo simplificado tienen valores muy similares para las tres respuestas sísmicas estudiadas.

7.3.3 Edificación con Disipadores de Fluido Viscoso

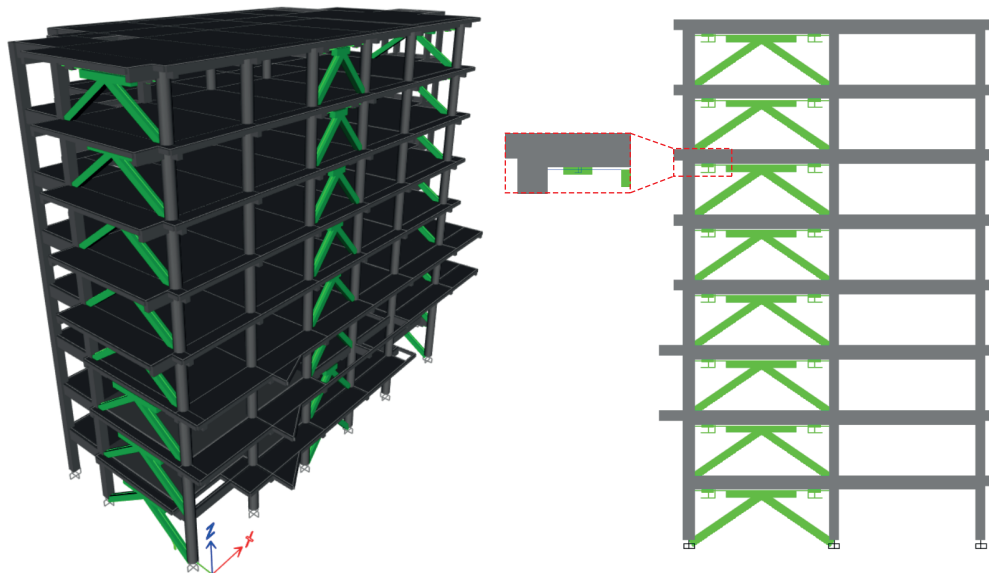


FIGURA N° 7.35: Modelo numérico del centro de información FIC UNI con DFV.

La Figura N° 7.35 muestra el modelo matemático tridimensional de la edificación del centro de información FIC UNI que incorpora DFV. Es preciso indicar que dicho modelo considera que la edificación tiene base fija, no incluyendo por lo tanto la interfaz de aislamiento que tiene la edificación real. Los disipadores fueron modelados como elementos *link* con comportamiento no lineal. La estructura será sometida una

serie de ATHNL, considerando que la edificación tiene un comportamiento lineal y elástico, y son únicamente los DFV los que tienen la capacidad de incursionar en el rango no lineal.

Los DFV se ubicaron en todos los niveles de la edificación en los eje 1-1 y 6-6 entre los ejes A-A y B-B. Se usó una configuración de tipo Chevron con 4 disipadores por cada nivel.

7.3.3.1 Predimensionamiento

En predimensionamiento de los DFV se realizó siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 4.3. A continuación se muestran se muestran los resultados.

- Datos iniciales.

$$T_1 = 1.22 \text{ s}; \quad \beta = 5\%; \quad n = 8$$

- Factor de amplificación de los DFV.

$$f_{A i} = 1$$

- Cinco pasos planteados por Silvestri et al. (2010).

– *Paso 1: Identificación del amortiguamiento objetivo de la estructura.*

$$\eta_\delta = 0.35 \quad \rightarrow \quad \beta' \cong 50\%$$

– *Paso 2: Identificación de las características preliminares de los disipadores de fluido viscoso (disipadores lineales).*

La constante de amortiguamiento lineal de entrepiso se calcula de la siguiente manera:

$$\omega_1 = 5.15 \text{ rad/s}; \quad m_{tot} = 4280 \text{ kN s}^2/m$$

$$C_{Nivel} = \beta' \cdot \omega_1 \cdot m_{tot} \cdot (n + 1) = 99.2 \frac{M \cdot N \cdot s}{m}$$

$$C_{Nivel, Inclinado} = \frac{C_{Nivel}}{f_{A i}^2} = 99.2 \frac{M \cdot N \cdot s}{m}$$

– *Paso 3: Análisis tiempo historia preliminar.*

Luego de realizar el análisis tiempo historia con las propiedades lineales se obtiene las velocidades relativas máximas para cada nivel, las cuales se muestran en la Tabla N° 7.19.

- *Paso 4: Identificación de las características “equivalentes” de los disipadores viscosos no lineales.*

Considerando $\alpha = 0.50$ y $\chi = 0.80$, se puede usar la ecuación 4.21 para obtener las constantes de amortiguamiento no lineales para cada uno de los niveles (se consideraron cuatro DFV por cada nivel). Sin embargo, para el modelo final se agruparon todos los DFV en tres grupos. Los valores de las constantes de amortiguamiento de estos DFV se presentan en la Tabla N° 7.19.

- *Paso 5: Análisis tiempo historia final.*

Se realizó un análisis tiempo historia final para obtener las respuestas sísmicas de la edificación para cada uno de los registros sísmicos.

TABLA N° 7.19: Constantes de amortiguamiento no lineales de los DFV

Nivel	Δv_{max}	C_{NL}	$C_{NL A}$
	[mm/s]	[kN(s/m) ^{0.5}]	[kN(s/m) ^{0.5}]
8	8.3	2016	2500
7	14.8	2697	
6	22.2	3303	3800
5	30.0	3842	
4	38.7	4363	
3	45.2	4716	4500
2	48.7	4894	
1	33.5	4058	

7.3.3.2 Respuestas Sísmicas

En la Figura N° 7.36a se aprecian las derivas de entrepiso en la dirección transversal del centro de información FIC UNI con DFV, observándose que están por debajo del límite de 5 ‰ que se tiene como objetivo. Por otro lado, la Figura N° 7.36b presenta los desplazamientos máximos de la estructura, de donde se observa que el último nivel de la edificación sufre desplazamientos de hasta 85 milímetros.

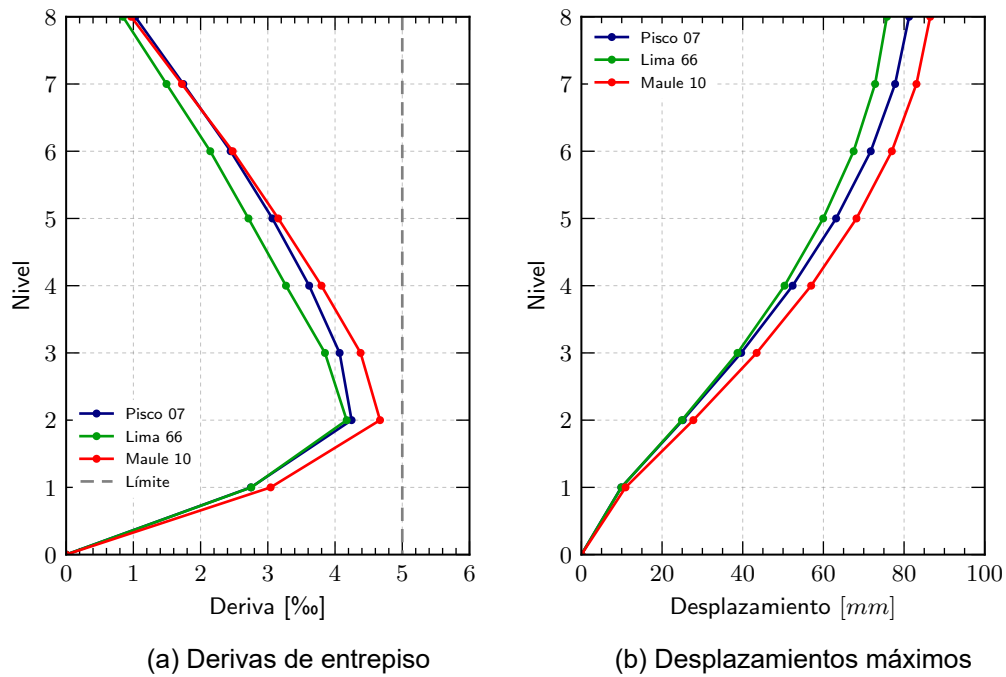


FIGURA N° 7.36: Respuestas del centro de información FIC UNI con DFV.

A continuación, se muestran las respuestas sísmicas de la edificación con DFV en superposición con las repuestas para la misma edificación pero sin DFV, con el fin de observar las reducciones en estas respuestas.

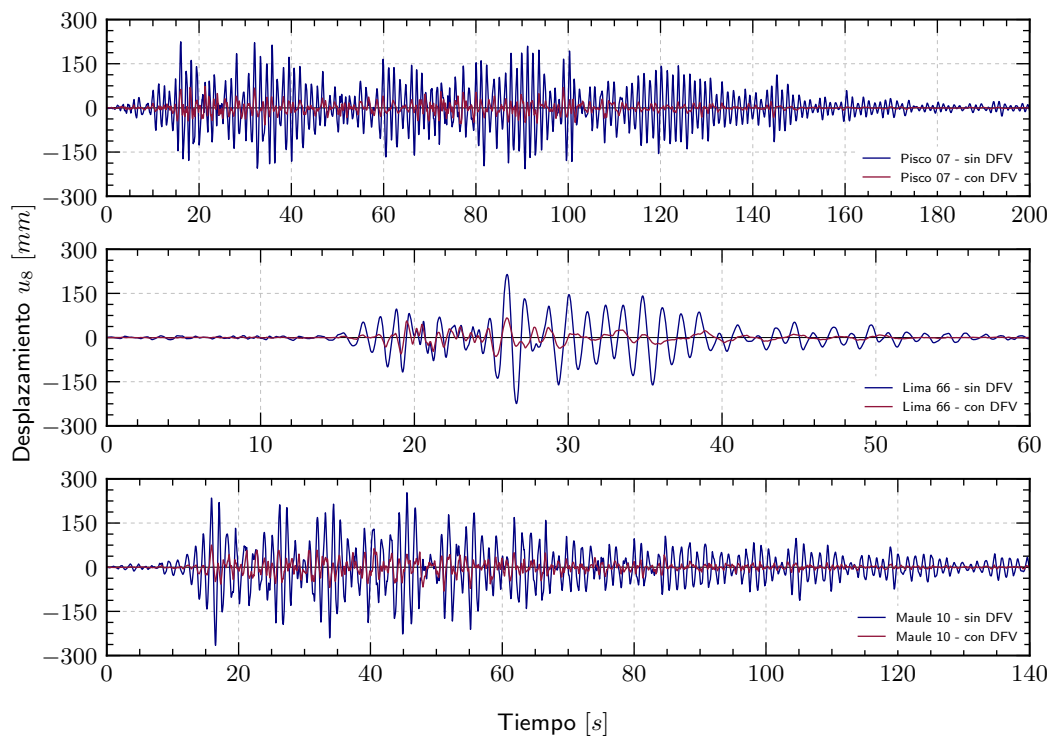


FIGURA N° 7.37: Desplazamiento u_s del centro de información FIC UNI con DFV.

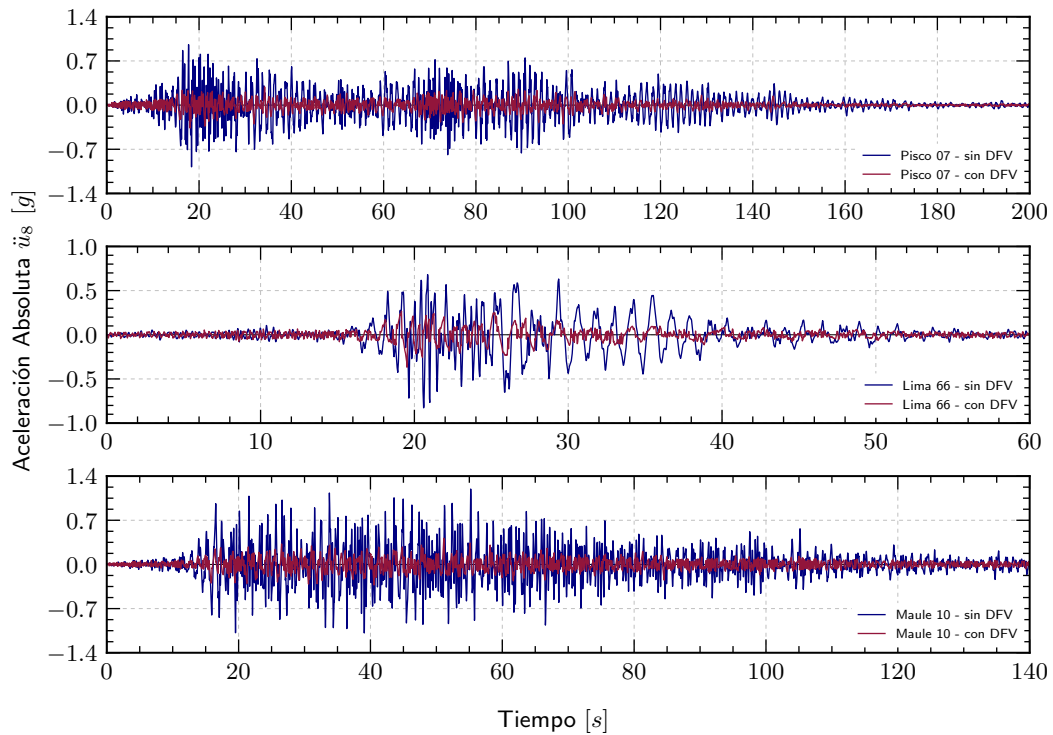


FIGURA N° 7.38: Aceleración \ddot{u}_s del centro de información FIC UNI con DFV.

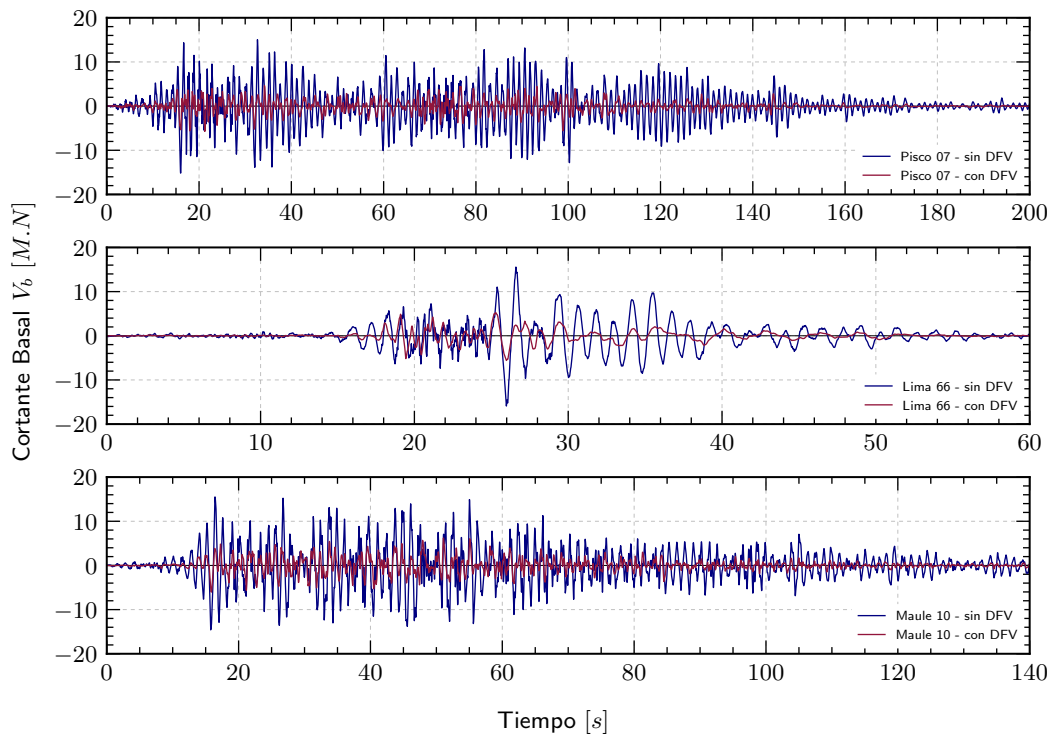


FIGURA N° 7.39: Cortante basal V_b del centro de información FIC UNI con DFV.

En las Figuras N° 7.37, N° 7.38 y N° 7.39 se presentan las respuestas sísmicas de la edificación del centro de información FIC UNI tales como el desplazamiento

del último nivel, la aceleración absoluta del último nivel y la fuerza cortante basal, respectivamente. De estas imágenes es fácil apreciar que el uso de DFV reduce las respuestas sísmicas de manera significativa.

La Tabla N° 7.20 muestra las respuestas sísmicas máximas (en valor absoluto) del centro de información FIC UNI para los tres registros sísmicos usados. Asimismo, esta tabla también presenta los porcentajes de reducción de las respuestas sísmicas, dichos valores se obtuvieron luego de aplicar la ecuación 4.22.

TABLA N° 7.20: Respuestas sísmicas máximas y porcentaje de reducción

Registro sísmico	Sin DFV			Con DFV			Reducción		
	u_8	\ddot{u}_8	V_b	u_8	\ddot{u}_8	V_b	u_8	\ddot{u}_8	V_b
	[mm]	[g]	[M.N]	[mm]	[g]	[M.N]	[%]	[%]	[%]
Pisco 07	224.5	0.98	15.2	73.0	0.36	5.7	67.5	62.8	62.3
Lima 66	224.1	0.83	15.9	66.8	0.37	5.6	70.2	55.6	64.8
Maule 10	265.4	1.20	15.5	81.3	0.41	6.2	69.4	65.3	59.9

7.3.3.3 Reducción de las Respuestas Sísmicas

Los porcentajes de reducción de las respuestas sísmicas, obtenidos luego de incorporar DFV en la edificación, que se presentaron en la Tabla N° 7.20 serán promediados para cada respuesta sísmica. De este modo se tendrá un porcentaje de reducción promedio respecto del desplazamiento del último nivel, de la aceleración absoluta del último nivel y de la fuerza cortante basal.

Por otro lado, de las Figuras N° 4.9, N° 4.10 y N° 4.11 se pueden obtener las reducciones de las respuestas sísmicas para una edificación de 8 niveles y con $\eta_\delta = 0.35$ que incorpora DFV. Se debe precisar que estas reducciones se obtuvieron usando modelos simplificados.

TABLA N° 7.21: Comparación de porcentajes de reducción

Porcentaje de reducción [%]			
Modelo	u_8	\ddot{u}_8	V_b
ETABS	69	61	62
Simplificado	72	58	54

Como se aprecia en la Tabla N° 7.21, los porcentajes de reducción alcanzados tanto por el modelo modelo tridimensional en ETABS así como por el modelo simplificado tienen valores muy similares. Siendo la mayor diferencia entre ambas reducciones la correspondiente a la fuerza cortante basal, con un valor de 8%.

CONCLUSIONES

1. Los modelos simplificados permiten realizar una predicción rápida y aceptable de los niveles de reducción de las respuestas sísmicas que se pueden alcanzar en edificaciones tridimensionales de concreto armado que incorporen dispositivos de control pasivo.
2. Los cuatros sistemas de control pasivo estudiados permiten reducir las respuestas sísmicas de las edificaciones. Sin embargo, cada uno de ellos tiene una efectividad diferente.
3. Cada sistema de control pasivo presenta ventajas y desventajas en su implementación; por lo tanto, la elección del uso de uno u otro sistema debe responder a las características y objetivo particulares de cada proyecto. Así por ejemplo, si bien el aislamiento de base reduce de manera significativa las respuestas sísmicas, su uso implica considerar separaciones (juntas sísmicas) grandes entre edificios vecinos e instalaciones sanitarias flexibles. Por otro lado, los disipadores de energía son de fácil instalación en edificaciones ya existentes y pueden ser la solución más efectiva en estructuras de gran altura.
4. Se logró proponer un procedimiento para el predimensionamiento de los disipadores histeréticos que se incorporarán en una edificación. Dicho procedimiento es el resultado de realizar un gran número de análisis tiempo historia no lineales a modelos simplificados de edificaciones con disipadores de energía con comportamiento histerético de Bouc Wen.
5. La razón de aislamiento sísmico (r) es el principal parámetro que controla el porcentaje de reducción de las respuestas sísmicas alcanzado por las edificaciones aisladas. A mayor razón de aislamiento, mayores son las reducciones obtenidas. No obstante, en la práctica optar por razones de aislamiento altas implica usar aisladores sísmicos más grandes. Asimismo, se debe tener en cuenta la esbeltez de la edificación, ya que la combinación de una esbeltez elevada y una razón de aislamiento alta pueden implicar problemas de volteo y tracciones en los aisladores.
6. En edificaciones aisladas, las reducciones obtenidas por las propiedades mínimas (λ_{min}) son mayores a las obtenidas con propiedades nominales (λ_{nom}), las cuales a su vez son mayores a las obtenidas con las propiedades máximas (λ_{max}). Por otro lado, las respuestas sísmicas se ven prácticamente inalteradas si se usa $\beta = 2\%$ o $\beta = 5\%$ como porcentaje de amortiguamiento crítico al modelar la superestructura.

7. El factor de reducción objetivo (η_δ) es el principal parámetro que controla el porcentaje de reducción de las respuestas sísmicas en edificaciones que incorporan disipadores de energía, tanto disipadores de fluido viscoso como disipadores histeréticos. A menor η_δ , mayores son las reducciones obtenidas.
8. En edificaciones con disipadores de energía, los porcentajes de reducción que se obtienen para estructuras flexibles son mayores en comparación a los obtenidas para edificaciones rígidas. Por otra parte, en el caso de edificaciones con disipadores de fluido viscoso, la tendencia general es obtener mayores porcentajes de reducción para factores de amplificación (f_A) más altos.
9. Los disipadores histeréticos permiten reducir los desplazamientos y las derivas de entrepiso de las edificaciones. Sin embargo, tal y como lo muestran los resultados de los modelos tridimensionales de edificaciones existentes, en ciertos casos la adición estos dispositivos incrementa las aceleraciones y la fuerza cortante basal total de la estructura. No obstante, se debe precisar que aún cuando la fuerza cortante total se incrementa, la fuerza cortante efectiva que recibe la estructura principal es menor en comparación con la alternativa sin disipadores, ya que gran parte de la cortante es tomada por los disipadores de energía.
10. La razón de masas (r_a) es el principal parámetro que controla el porcentaje de reducción de las respuestas sísmicas en edificaciones con amortiguadores de masa sintonizada. A mayor masa del amortiguador, mayores son las reducciones obtenidas. Sin embargo, dado que en la práctica el amortiguador de masa sintonizada se ubicará en la parte superior de la edificación, no es viable que estos dispositivos tengan masas muy altas.
11. El uso de amortiguadores de masa sintonizada permite reducir las respuestas sísmicas de una edificación. No obstante, tiene la menor efectividad de entre los cuatros sistemas de control pasivo estudiados. Además, los resultados indican que usar porcentajes de amortiguamiento crítico altos para este tipo de dispositivos no garantiza obtener mayores reducciones en las respuestas sísmicas.

RECOMENDACIONES

1. En la presente investigación se propuso un procedimiento (en el apartado 5.3) para el predimensionamiento de los disipadores histeréticos, dicho procedimiento hace uso de algunos gráficos que son el resultado de realizar análisis tiempo historia no lineales en modelos simplificados. Con la finalidad de mejorar estos gráficos, y por ende hacer más confiable al procedimiento de predimensionamiento, se recomienda incrementar el número de modelos y registros sísmicos usados para su elaboración.
2. Se recomienda explorar la eficiencia de otros sistemas de control sísmico tales como los arriostres de pandeo restringido o los disipadores de fricción.
3. Asimismo sería conveniente continuar las investigaciones relativas a la posible combinación de dispositivos de control pasivo de distinto tipo. Por ejemplo, estudiar edificaciones que incorporen aisladores sísmicos y disipadores de fluido viscoso en la interfaz de aislamiento.
4. En la presente tesis no se han considerado los costos y ni las limitaciones constructivas que tiene cada sistema de control pasivo. Se recomienda que en futuras investigaciones se comparen los precios y la viabilidad constructiva de implementar cada uno de los sistemas de control.
5. Se sugiere estudiar la posibilidad de usar amortiguadores de masa sintonizada en pisos intermedios de las edificaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahumada, J. (2010). Sistemas de control en estructuras. *INGE CUC*, 6(1), 79–84.
- American Society of Civil Engineers. (2017). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. American Society of Civil Engineers.
- Bathe, K. J. (2014). *Finite Element Procedures* (2.^a ed.). Klaus-Jurgen Bathe.
- Berquist, M., De Pasquale, R., Frye, S., Gilani, A., y Klembczyk, A. (2019). *Fluid viscous dampers-general guidelines for engineers including a brief history*. Taylor Devices Inc.
- Bozzo, L., Gonzales, H., Pantoja, M., Muñoz, E., y Ramirez, J. (2019). Modeling, analysis and seismic design of structures using energy dissipators SLB. *Tecnia*, 29(2), 81–90. doi: 10.21754/tecnica.v29i2.713
- Bridgestone. (2015). *Seismic isolation product line-up* (Vol. 1). Tokio.
- Buckle, I. G. (2000). Passive control of structures for seismic loads. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33(3), 209–221. doi: 10.5459/bnzsee.33.3.209-221
- Burden, R. L., y Faires, J. D. (2011). *Numerical Analysis* (9.^a ed.). Thomson Brooks/Cole.
- Calderón, D., Sekiguchi, T., Nakai, S., Aguilar, Z., y Lazares, F. (2012). Study of soil amplification based on microtremor and seismic records in Lima Peru. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 12(2), 2_1–2_20. doi: 10.5610/jaee.12.2_1
- Charalampakis, A. E. (2010). Parameters of Bouc-Wen hysteretic model revisited. *Proceedings of the 9th HSTAM International Congress on Mechanics*.
- Chopra, A. K. (2016). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (5.^a ed.). NJ, USA: Prentice Hall.
- Constantinou, M. C., y Symans, M. D. (1993). Experimental study of seismic response of buildings with supplemental fluid dampers. *The Structural Design of Tall Buildings*, 2(2), 93–132.
- De Domenico, D., Falsone, G., y Ricciardi, G. (2018). Improved response-spectrum analysis of base-isolated buildings: A substructure-based response spectrum method. *Engineering Structures*, 162, 198–212. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.02.037
- De la Llera, J. C., Vásquez, J., Poulos, A., y Favier, P. (2015). Trends in research and design of structures with seismic protection systems. *XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015*(1), 1–28.

- Fenz, D. M., y Constantinou, M. C. (2008). *Mechanical behavior of multi-spherical sliding bearings*. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Ferj, M. (2016). *Evaluación del desempeño sísmico de hospitales aislados y convencionales a través de un análisis de fragilidad* (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- Fuentes, J. (2019). *Procedimientos para el análisis y diseño de estructuras con sistemas de disipación de energía en el Perú* (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Garrido, B. (2016). *Amortiguadores de masa sintonizada en edificios sometidos a registros sísmicos en Chile* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago.
- Gavin, H. P. (2018). *Numerical integration in structural dynamics* (Notas de Clase). Duke University, Durham.
- Hernández, H. (2016). *Comportamiento sísmico de edificios aislados en la base en distintas etapas del proceso constructivo* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Inga, W. (2015). *Mejora de la respuesta dinámica de edificaciones usando amortiguadores de masa sintonizada* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Lee, C. L., Chen, Y. T., Chung, L. L., y Wang, Y. P. (2006). Optimal design theories and applications of tuned mass dampers. *Engineering Structures*, 28(1), 43–53. doi: 10.1016/j.engstruct.2005.06.023
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente*. Diario El Peruano.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2019). *Norma Técnica E.031 Aislamiento Sísmico*. Diario El Peruano.
- Mohammadi, R. K., Nasri, A., y Ghaffary, A. (2017). TADAS dampers in very large deformations. *International Journal of Steel Structures*, 17(2), 515–524. doi: 10.1007/s13296-017-6011-y
- Naeim, F., y Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. John Wiley & Sons.
- Narváez, M. (2019). *Análisis comparativo técnico económico de una edificación de doce pisos, empleando amortiguadores de fluido viscoso y disipadores histeréticos*. (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.

- Newmark, N. M., y Hall, W. J. (1982). Earthquake Spectra and Design. *Earthquake Engineering Research Institute*.
- Nuzzo, I., Losanno, D., Caterino, N., Serino, G., y Bozzo, L. M. (2018). Experimental and analytical characterization of steel shear links for seismic energy dissipation. *Engineering Structures*, 172, 405–418. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.06.005
- Parulekar, Y. M., y Reddy, G. R. (2009). Passive response control systems for seismic response reduction: A state-of-the-art review. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 9(01), 151–177.
- Polat, E., y Constantinou, M. C. (2017). Open-space damping system description, theory, and verification. *Journal of Structural Engineering*, 143(4). doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0001698
- Popov, E. P., y Engelhardt, M. D. (1988). Seismic eccentrically braced frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 10, 321–354.
- Portillo, A. (2019). *Diseño de un hospital con aislamiento sísmico según la normatividad peruana* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Pratap, R., Mukherjee, S., y Moon, F. C. (1994). Dynamic behavior of a bilinear hysteretic elasto-plastic oscillator, part I: Free oscillations. *Journal of Sound and Vibration*, 172(3), 321–337. doi: 10.1006/jsvi.1994.1178
- Ras, A., y Boumechra, N. (2016). Seismic energy dissipation study of linear fluid viscous dampers in steel structure design. *Alexandria Engineering Journal*, 55(3), 2821–2832. doi: 10.1016/j.aej.2016.07.012
- Saeedi, F., Shabakhty, N., y Mousavi, S. R. (2016). Seismic assessment of steel frames with triangular-plate added damping and stiffness devices. *Journal of Constructional Steel Research*, 125, 15–25. doi: 10.1016/j.jcsr.2016.06.011
- Saghafi, M. H., Golafshar, A., Yahyae, A., y Zareian, S. (2019). Analytical assessment of reinforced concrete frames equipped with TADAS dampers. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 7(2), 138–151. doi: 10.22075/jrce.2018.13701.1249
- Silvestri, S., Gasparini, G., y Trombetti, T. (2010). A five-step procedure for the dimensioning of viscous dampers to be inserted in building structures. *Journal of Earthquake Engineering*, 14(3), 417–447. doi: 10.1080/13632460903093891
- Skinner, R. I., Robinson, W. H., y McVerry, G. H. (1993). *An introduction to seismic isolation*. John Wiley & Sons.

- Vaiana, N., Sessa, S., Marmo, F., y Rosati, L. (2018). A class of uniaxial phenomenological models for simulating hysteretic phenomena in rate-independent mechanical systems and materials. *Nonlinear Dynamics*, 93(3), 1647–1669. doi: 10.1007/s11071-018-4282-2
- Wu, T. C. (2001). *Design of base isolation system for buildings* (Tesis de maestría). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Yucra, M. (2018). *Evaluación del desempeño sísmico de hospitales aislados en el Perú* (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.

ANEXOS

ANEXO A: CÓDIGOS EN PYTHON

A continuación se presentan los códigos desarrollados en *Python* que permiten calcular la respuesta sísmica de modelos simplificados de edificaciones que incorporan sistemas de control pasivo. El Código A.1 muestra el algoritmo usado para edificaciones con aislamiento de base con comportamiento bilineal. Por su parte, los Códigos A.2 y A.3 presentan los algoritmos usados para edificaciones con disipadores de fluido viscoso y disipadores histeréticos respectivamente. Asimismo, en el Código A.4 se puede observar el algoritmo usado por edificaciones que incorporan amortiguadores de masa sintonizada. Por último, el Código A.5 muestra las funciones usadas por los algoritmos anteriormente mencionados.

Respuesta Sísmica de una Edificación con AS

```

1 # REPUESTA SÍSMICA DE UNA EDIFICACIÓN DE n NIVELES CON AS
2 import Funciones_KS as fun
3 import numpy as np
4 from scipy import linalg as LA
5 import copy
6
7 # PROPIEDADES DINÁMICAS
8 # Parámetros dinámicos de la Superestructura
9 n=3 # N° de Pisos
10 gdl=n+1 # GDL = N° de Pisos+1
11 Tnf=0.3 # Periodo base fija , [s]
12 ξ=5 # Amortiguamiento , [%]
13 λ=(gdl-1)/gdl # Relación de masas
14
15 # Parámetros dinámicos de la interfaz de aislamiento
16 r=0.1 # Razón de rigideces Kp/Ke
17 Q=105 # Fuerza característica normalizada , [cm/s2]
18 K2=30 # Rigidez postfluencia normalizada , [1/s2]
19
20 # LECTURA DEL REGISTRO SÍSMICO
21 ug=np.genfromtxt("./Sismo_Lima66NS.txt") #[cm/s2]
22 Δt=0.002; N=len(ug)
23 t=[i*Δt for i in range(N)]
24
25 # DEFINICIÓN DE PARAMETROS DINÁMICOS Y MATRICES
26 Ts,V,Lp,mp=fun.eigen(Tnf,n)
27 ωip=K2**0.5 # Frecuencia angular plástica
28 ωie=(ωip**2/r)**0.5 # Frecuencia angular elástica
29 ωs,ωs2=np.zeros(gdl),np.zeros(gdl)
30

```



```

31 for i in range(n):
32     ωs[i]=2*np.pi/Ts[i]
33     ωs2[i]=ωs[i]**2
34
35 M=np.zeros((gdl,gdl)); Ks=np.zeros((gdl,gdl)); C=np.zeros((gdl,gdl))
36
37 for i in range(n):
38     for j in range(n):
39         M[i][j]=0; C[i][j]=0; Ks[i][j]=0
40     M[i][i]=1; M[i][n]=1; M[n][i]=λ*mp[i]
41     C[i][n]=0; C[n][i]=0; C[i][i]=2*ωs[i]*ξ/100
42     Ks[i][n]=0; Ks[n][i]=0; Ks[i][i]=ωs2[i]
43 M[n][n]=1; C[n][n]=0; Ks[n][n]=0
44
45 # DEFINICIÓN DE PARÁMETROS NUMÉRICOS
46 γ=1/2; β=1/4 # Parámetros de Newmark
47 A1=np.zeros((gdl,gdl)); A2=np.zeros((gdl,gdl)); A3=np.zeros((gdl,gdl))
48
49 for i in range(gdl):
50     for j in range(gdl):
51         A1[i][j]=M[i][j]/(β*Δt**2)+γ*C[i][j]/(β*Δt)+Ks[i][j]
52         A2[i][j]=M[i][j]/(β*Δt)+γ*C[i][j]/β
53         A3[i][j]=M[i][j]/(2*β)+Δt*(γ/(2*β)-1)*C[i][j]
54
55 M_inv=np.linalg.inv(M)
56 a4=γ/(β*Δt); a5=γ/β; a6=(γ/(2*β)-1)*Δt
57
58 fp=open("Respuesta_Sismica_AS.txt","w")
59 fp.write("t\tU''g\tX''i\tXi\tR")
60 for i in range(n):
61     fp.write("\tAs%s"%(i+1))
62 for i in range(n):
63     fp.write("\tUs%s"%(i+1))
64
65 # DEFINICIÓN DE VARIABLES
66 X=np.zeros((2,gdl)); Xp=np.zeros((2,gdl)); Xpp=np.zeros((2,gdl));
67 dX=np.zeros(gdl); Fy=np.zeros(2); d=np.zeros(2);
68 K=np.zeros(2); P_temp=np.zeros(gdl); R=np.zeros(2);
69 U=np.zeros(n); RR=np.zeros(n); dU=np.zeros(n);
70
71 # STEP 0
72 for i in range(gdl):
73     Xpp[0][i]=-ug[0]
74
75 Fy[0]=Q+ωip**2*X[0][n]; K[0]=ωie**2; A1p=copy.copy(A1)
76 fp.write("\n%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f" %(0,ug[0],Xpp[0][n],Xp[0][n],X[0][n],R[0]))
77
78 for i in range(n):

```

```

79     fp.write("\t%f"%(0))
80 for i in range(n):
81     fp.write("\t%f"%(X[0][i]))
82
83 # BUCLE STEP i=1...N-1
84 for i in range(N-1):
85     # ASIGNACIONES DEL PASO i
86     A1p[n][n]=A1[n][n]+K[0]
87     A1p_inv=np.linalg.inv(A1p)
88
89     #INCREMENTOS STEP i -> i+1
90     P_temp=np.zeros(gdl)
91
92     for j in range(gdl):
93         for k in range(gdl):
94             P_temp[j]+=A2[j][k]*Xp[0][k]+A3[j][k]*Xpp[0][k]
95             P_temp[j]-=(ug[i+1]-ug[i])
96         for j in range(gdl):
97             for k in range(gdl):
98                 dX[j]+=A1p_inv[j][k]*P_temp[k]
99         for j in range(gdl):
100             X[1][j]=X[0][j]+dX[j]
101         for j in range(gdl):
102             Xp[1][j]=Xp[0][j]+a4*dX[j]-a5*Xp[0][j]-a6*Xpp[0][j]
103
104     # VERIFICACIÓN DE FLUENCIA
105     Fy[1]=Q*np.sign(Xp[1][n])+wip**2*X[1][n]; K[1]=K[0]; d[1]=d[0]
106
107     if(K[1]==wie**2 and Xp[1][n]>0 and K[1]*(X[1][n]-d[1])>Fy[1]):
108         K[1]=wip**2; d[1]=-Q/wip**2
109     if(K[1]==wie**2 and Xp[1][n]<0 and K[1]*(X[1][n]-d[1])<Fy[1]):
110         K[1]=wip**2; d[1]=Q/wip**2
111
112     # VERIFICACIÓN DE REVERSIÓN DE CARGA
113     if(K[1]==wip**2 and Xp[1][n]*Xp[0][n]<0):
114         K[1]=wie**2; d[1]= X[1][n]-r*(X[1][n]-d[1])
115
116     # EQUILIBRIO DE FUERZAS
117     R[1]=K[1]*(X[1][n]-d[1]); P_temp=np.zeros(gdl)
118
119     for j in range(gdl):
120         for k in range(gdl):
121             P_temp[j]+=C[j][k]*Xp[1][k]+Ks[j][k]*X[1][k]
122             P_temp[j]+=ug[i+1]
123         P_temp[n]+=R[1]
124     for j in range(gdl):
125         for k in range(gdl):
126             Xpp[1][j]-=M_inv[j][k]*P_temp[k]
127

```

```

128     # SUPERPOSICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS
129     for j in range(n):
130         U[j]=0
131         for k in range(n):
132             U[j]+=X[1][k]*Lp[k]*V[k][j]
133
134     # SUPERPOSICIÓN DE ACELERACIONES
135     for j in range(n):
136         RR[j]=0
137         for k in range(n):
138             RR[j]+=X[1][k]*Lp[k]*V[k][j]* $\omega$ s2[k]
139
140     # IMPRESIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE RESULTADOS
141     fp.write("\n%f\t%f\t%f\t%f\t%f\t%f" % ((i+1)* $\Delta$ t, ug[i+1],Xpp[1][n],
142     Xp[1][n],X[1][n],R[1]))
143     for j in range(n):
144         fp.write("\t%f" %RR[j])
145     for j in range(n):
146         fp.write("\t%f" %U[j])
147     for j in range(gdl):
148         X[0][j]=X[1][j]; Xp[0][j]=Xp[1][j]; Xpp[0][j]=Xpp[1][j]
149         Fy[0]=Fy[1]; d[0]=d[1]; R[0]=R[1]; K[0]=K[1]
150     for j in range(gdl):
151         Xpp[1][j]=0; dX[j]=0
152     fp.close()
    
```

Código A.1: Edificación con aislamiento sísmico bilineal

Respuesta Sísmica de una Edificación con DFV

```

1  # RESPUESTA SÍSMICA DE UNA EDIFICACIÓN DE n NIVELES CON DFV
2
3  import numpy as np
4  import Funciones_KS as fun
5  from scipy import linalg as LA
6  import copy
7
8  # PROPIEDADES DINÁMICAS
9  # Parámetros dinámicos de la estructura
10 T1=0.3                # Periodo, [s]
11 n=3                  # N° de Pisos
12  $\beta$ =5                # Amortiguamiento, [%]
13
14 # Parámetros dinámicos de los DFV
15 C2=[[200],[190],[140]] # Coef. de amort.(**), [cm2/s1.5]
16  $\alpha$ =0.5            # Exponente de la velocidad
17 f=0.9                # Factor de amplificación
18
    
```

```

19 # LECTURA DEL REGISTRO SÍSMICO
20 ug=np.genfromtxt("./Sismo_Lima66NS.txt") #[cm/s^2]
21 Δt=0.002; N=len(ug)
22 t=[i*Δt for i in range(N)]
23
24 # DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS Y MATRICES
25 Ts,ωs,K,M,C,ζ=fun.eigen2(T1,n,β)
26
27 # CREACIÓN DE ARCHIVO PARA GUARDAR RESULTADOS
28 fp=open("Respuesta_Sismica_DfV.txt","w")
29 fp.write("t\tU''g\tVb")
30 for i in range(n):
31     fp.write("\tU%s"%(i+1))
32 for i in range(n):
33     fp.write("\tUp%s"%(i+1))
34 for i in range(n):
35     fp.write("\tUpp%s"%(i+1))
36 for i in range(n):
37     fp.write("\tFd%s"%(i+1))
38
39 # DEFINICIÓN DE VARIABLES
40 X=np.zeros((n,1)); Xp=np.zeros((n,1)); Xpp=np.zeros((n,1));
41 Xb=np.zeros((n,1)); Xa=np.zeros((n,1)); Xpb=np.zeros((n,1));
42 R=np.zeros((n,1)); FF1=np.zeros((n,1)); F=np.zeros((n,1));
43 I=np.ones((n,1)); FF2=np.zeros((n,1)); Xpt=np.zeros((n+2,1));
44 C2t=np.zeros((n+1,1))
45
46 # DEFINICIÓN DE PARÁMETROS
47 a0=1/Δt**2; a1=1/(2*Δt); a2=2*a0; a3=1/a2
48
49 # VECTOR F INICIAL
50 for k in range(n):
51     C2t[k][0]=C2[k][0]
52     Xpt[k+1][0]=Xp[k][0]
53
54 for k in range(n):
55     FF1[k][0]=f**(1+α)*C2t[k][0]*np.sign(Xpt[k+1][0]-Xpt[k][0])*abs(
56         Xpt[k+1][0]-Xpt[k][0])**α
57     FF2[k][0]=f**(1+α)*C2t[k+1][0]*np.sign(Xpt[k+2][0]-Xpt[k+1][0])*
58         abs(Xpt[k+2][0]-Xpt[k+1][0])**α
59     F=FF1-FF2
60
61 # ACELERACIÓN Y FUERZA CORTANTE INICIAL
62 Xpp=(-np.dot(M,I)*ug[0]-(np.dot(K,X)+np.dot(C,Xp)+F))
63 Vb=(Xpp+ug[0]*I).sum(axis=0)[0]
64
65 # IMPRESIÓN DE DATOS INICIALES
66 fp.write("\n%f\t%f\t%f" %(0,ug[0],Vb))
67 for j in range(n):
    
```

```

66     fp.write("\t%f" % (X[j][0]))
67 for j in range(n):
68     fp.write("\t%f" % (Xp[j][0]))
69 for j in range(n):
70     fp.write("\t%f" % (Xpp[j][0]))
71 for j in range(n):
72     fp.write("\t%f" % (FF1[j][0]/f))
73
74 Xa=X-Δt*Xp+a3*Xpp; MT_inv=np.linalg.inv(a0*M+a1*C)
75
76 # BUCLE STEP i=1...N-1
77 for i in range(N-1):
78     Xb=np.dot(MT_inv,(-np.dot(M,I)*ug[i]-F-np.dot(K-a2*M,X)-np.dot(a0*M
79     -a1*C,Xa)))
80     if i==0:
81         Xpb=Xp+Xpp*Δt/2
82         for k in range(n):
83             Xpt[k+1][0]=Xpb[k][0]
84     else:
85         Xpp=a0*(Xb-2*X+Xa)
86         Xp=a1*(Xb-Xa)
87         for k in range(n):
88             Xpt[k+1][0]=Xp[k][0]
89         Vb=(Xpp+ug[i]*I).sum(axis=0)[0]
90
91 # IMPRESIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE RESULTADOS
92 fp.write("\n%f\t%f\t%f" % ((i)*Δt,ug[i],Vb))
93 for j in range(n):
94     fp.write("\t%f" % (X[j][0]))
95 for j in range(n):
96     fp.write("\t%f" % (Xp[j][0]))
97 for j in range(n):
98     fp.write("\t%f" % (Xpp[j][0]))
99 for j in range(n):
100     fp.write("\t%f" % (FF1[j][0]/f))
101
102 for k in range(n):
103     FF1[k][0]=f**(1+α)*C2t[k][0]*np.sign(Xpt[k+1][0]-Xpt[k][0])*
104     abs(Xpt[k+1][0]-Xpt[k][0])**α
105     FF2[k][0]=f**(1+α)*C2t[k+1][0]*np.sign(Xpt[k+2][0]-Xpt[k+
106     1][0])*abs(Xpt[k+2][0]-Xpt[k+1][0])**α
107     F=FF1-FF2
108     Xa=copy.copy(X); X=copy.copy(Xb)
109
110 fp.close()

```

Código A.2: Edificación con DFV no lineales

Respuesta Sísmica de una Edificación con DH

```

1 # REPUESTA SÍSMICA DE UNA EDIFICACIÓN DE n NIVELES CON DH
2 import numpy as np
3 import Funciones_KS as fun
4 from scipy import linalg as LA
5 import copy
6
7 # PROPIEDADES DINÁMICAS
8 # Parámetros dinámicos de la estructura
9 T1=0.3 # Periodo, [s]
10 n=3 # N° de Pisos
11 β=5 # Amortiguamiento, [%]
12
13 # Parámetros dinámicos de los DH
14 KKe=np.array([[3200],[1600],[1600]]) # Ke Normalizada, [1/s^2]
15 FFy=np.array([[450],[390],[240]]) # Fy Normalizada, [cm/s^2]
16 α=0.025 # Relación de rigideces, Ke/Kp
17 η=1 # Exp. del modelo de Bouc Wen
18
19 # LECTURA DEL REGISTRO SÍSMICO
20 ug=np.genfromtxt("./Sismo_Lima66NS.txt") #[cm/s^2]
21 Δt=0.002; N=len(ug)
22 t=[i*Δt for i in range(N)]
23
24 # DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS Y MATRICES
25 Ts,ωs,K,M,C,ζ=fun.eigen2(T1,n,β)
26
27 # CREACIÓN DE ARCHIVO PARA GUARDAR RESULTADOS
28 fp=open("Respuesta_Sismica_DH.txt","w")
29 fp.write("t\tU'g\tVb")
30 for i in range(n):
31     fp.write("\tU% s"%(i+1))
32 for i in range(n):
33     fp.write("\tUpp% s"%(i+1))
34 for i in range(n):
35     fp.write("\tFh% s"%(i+1))
36
37 # DEFINICIÓN DE VARIABLES
38 X=np.zeros((n,1)); Xp=np.zeros((n,1)); Z=np.zeros((n,1));
39 Xpp=np.zeros((n,1)); YY=np.zeros((3*n,1)); Fh=np.zeros((n,1));
40 XX=np.zeros((3*n,1)); Uuy=np.ones((n,1)); I=np.ones((n,1)); Vb=0;
41
42 for j in range(n):
43     Uuy[j][0]=FFy[j][0]/KKe[j][0]
44
45 # IMPRESIÓN DE DATOS INICIALES
46 fp.write("\n%f\t%f\t%f" % (0,ug[0],Vb))
47 for j in range(n):
    
```

```

48     fp.write("\t%f" % (X[j][0]))
49 for j in range(n):
50     fp.write("\t%f" % (Xpp[j][0]))
51 for j in range(n):
52     fp.write("\t%f" % (Fh[j][0]))
53
54 XX=fun.fun_XX(X, Xp, Z, n)
55
56 # BUCLE STEP i=1...N-1
57 for i in range(N-1):
58     k1, Fh=fun.YY(XX, C, M, K, FFy, UUy,  $\alpha$ ,  $\eta$ , ug[i+1], n)
59     k2, Fh=fun.YY(XX+0.5*k1* $\Delta t$ , C, M, K, FFy, UUy,  $\alpha$ ,  $\eta$ , ug[i+1], n)
60     k3, Fh=fun.YY(XX+0.5*k2* $\Delta t$ , C, M, K, FFy, UUy,  $\alpha$ ,  $\eta$ , ug[i+1], n)
61     k4, Fh=fun.YY(XX+k3* $\Delta t$ , C, M, K, FFy, UUy,  $\alpha$ ,  $\eta$ , ug[i+1], n)
62     XX=XX+ $\Delta t$ *(k1+2*k2+2*k3+k4)/6
63     YY, Fh=fun.YY(XX, C, M, K, FFy, UUy,  $\alpha$ ,  $\eta$ , ug[i+1], n)
64     YY1, YY2, YY3=fun.fun_inv_XX(YY, n)
65     Vb=(YY2+ug[i+1]*I).sum(axis=0)[0]
66
67 # IMPRESIÓN DE RESULTADOS
68 fp.write("\n%f\t%f\t%f" % ((i+1)* $\Delta t$ , ug[i+1], Vb))
69 for j in range(n):
70     fp.write("\t%f" % (XX[j][0]))
71 for j in range(n):
72     fp.write("\t%f" % (YY2[j][0]))
73 for j in range(n):
74     fp.write("\t%f" % (Fh[j][0]))
75
76 fp.close()

```

Código A.3: Edificación con DH con comportamiento de Bouc Wen

Respuesta Sísmica de una Edificación con AMS

```

1 # REPUESTA SÍSMICA DE UNA EDIFICACIÓN DE n NIVELES CON AMS
2 import numpy as np
3 import Funciones_KS as fun
4 from scipy import linalg as LA
5 import copy
6
7 # PROPIEDADES DINÁMICAS
8 # Parámetros dinámicos de la estructura
9 T1=0.3 # Periodo, [s]
10 n=3 # N° de Pisos
11  $\beta$ =5 # Amortiguamiento, [%]
12
13 # Propiedades dinámicas del AMS
14 Ta=T1 # Periodo del AMS, [s]
15 ra=2 # Razón de masa para el AMS, [%]

```

```

16 beta=10                                # Amortiguamiento del AMS, [%]
17
18 # LECTURA DEL REGISTRO SÍSMICO
19 ug=np.genfromtxt("./Sismo_Lima66NS.txt") #[cm/s^2]
20 dt=0.002; N=len(ug)
21 t=[i*dt for i in range(N)]
22
23 # DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS Y MATRICES
24 Ts,ws,K,M,C,ζ=fun.eigen2(T1,n,β)
25 MM,KK,CC=fun.AMS(M,K,C,n,Ta,ra,βa)
26
27 # DEFINICIÓN DE PARÁMETROS
28 a0=1/dt**2; a1=1/(2*dt); a2=2*a0; a3=1/a2
29
30 # CREACIÓN DE ARCHIVO PARA GUARDAR RESULTADOS
31 fp=open("Respuesta_Sismica_AMS.txt","w")
32 fp.write("t\tU'\tVb")
33 for i in range(n+1):
34     fp.write("\tU%s"%(i+1))
35 for i in range(n+1):
36     fp.write("\tUpp%s"%(i+1))
37
38 # DEFINICION DE CONDICIONES INICIALES
39 X=np.zeros((n+1,1)); Xp=np.zeros((n+1,1)); Xpp=np.zeros((n+1,1))
40 R=np.zeros((n+1,1)); Xb=np.zeros((n+1,1)); Xpb=np.zeros((n+1,1))
41 I=np.ones((n+1,1)); Xa=np.zeros((n+1,1))
42
43 # ACELERACIÓN Y FUERZA CORTANTE INICIAL
44 Xpp=(-np.dot(MM,I)*ug[0]-(np.dot(KK,X)+np.dot(CC,Xp)))
45 Vb=(Xpp+ug[0]*I).sum(axis=0)[0]
46
47 # IMPRESIÓN DE DATOS INICIALES
48 fp.write("\n%f\t%f\t%f"%(0,ug[0],Vb))
49 for j in range(n+1):
50     fp.write("\t%f"%(X[j][0]))
51 for j in range(n+1):
52     fp.write("\t%f"%(Xpp[j][0]))
53
54 Xa=X-dt*Xp+a3*Xpp
55 MT_inv=np.linalg.inv(a0*MM+a1*CC)
56
57 # BUCLE STEP i=1...N-1
58 for i in range(N-1):
59     Xb=np.dot(MT_inv,(-np.dot(MM,I)*ug[i]-np.dot(KK-a2*MM,X)-np.dot(a0*
        MM-a1*CC,Xa)))
60
61     if i!=0:
62         Xpp=a0*(Xb-2*X+Xa)
63         Xp=a1*(Xb-Xa)

```



```

64     Vb=np.dot(MM,Xpp+ug[i]*I).sum(axis=0)[0]
65
66     # IMPRESIÓN Y ACTUALIZACIÓN DE RESULTADOS
67     fp.write("\n%f\t%f\t%f" % ((i)*Δt,ug[i],Vb))
68     for j in range(n+1):
69         fp.write("\t%f" %X[j][0])
70     for j in range(n+1):
71         fp.write("\t%f" %Xpp[j][0])
72     Xa=copy.copy(X); X=copy.copy(Xb)
73
74 fp.close()

```

Código A.4: Edificación con AMS

Funciones

```

1 import numpy as np
2 from scipy import linalg as LA
3 import copy
4
5 # FUNCIÓN EIGEN
6 def eigen(Tsf=1,n=5):
7     Z=np.identity(n); ke=(4*n/Tsf)**2; k=np.zeros(n)
8     for i in range(n):
9         if i==0:
10            k[i]=2*ke
11        else:
12            k[i]=ke
13    K=tridiag(k,n); M=np.identity(n)
14    vp,φp=LA.eigh(K,M); φp=φp.T; FP=[]; MP=[]
15    for i in range(n):
16        FP.append(sum(φp[i].T@M))
17    for i in range(n):
18        MP.append((sum(φp[i].T@M)**2))
19    T=2*np.pi/(vp)**0.5; MMP=MP/sum(MP)
20    return T,φp,FP,MMP
21
22 # FUNCIÓN TRIDIAG
23 def tridiag(k=[1,2], n=5):
24    K=np.zeros((n,n))
25    for i in range(n-1):
26        K[i][i]=k[i]+k[i+1]
27        K[i+1][i]=-k[i+1]
28        K[i][i+1]=-k[i+1]
29    K[n-1][n-1]=k[n-1]
30    return K
31
32 # FUNCIÓN EIGEN2
33 def eigen2(Tsf=1,n=5,β=5.0):

```

```

34     Z=np.identity(n); ke=(4*n/Tsf)**2; k=np.zeros(n)
35     for i in range(n):
36         if i==0:
37             k[i]=2*ke
38         else:
39             k[i]=ke
40     K=tridiag(k,n); M=np.identity(n)
41     vp,φp=LA.eigh(K,M); ωp=vp**0.5
42     a0=(β/100)*2*ωp[0]*ωp[2]/(ωp[0]+ωp[2])
43     a1=(β/100)*2/(ωp[0]+ωp[2])
44     C=a0*M+a1*K; T=2*np.pi/(vp)**0.5; ζn=np.zeros(n)
45     for j in range(n):
46         ζn[j]=a0/(2*ωp[j])+a1*ωp[j]/2
47     return T,vp,K,M,C,ζn
48
49 # FUNCIÓN VECTORYY
50 def VectorYY(X=[1,1,1], C1=0.5, K=1, Fy=1, uy=1, α=0.025, η=2, ug=1):
51     u=X[0]; up=X[1]; z=X[2]; YY=np.zeros(3)
52     Fh=(α*(Fy/uy)*u+(1-α)*Fy*z)
53     YY[0]=up; YY[1]=-C1*up-K*u-Fh-ug
54     YY[2]=(1-abs(z)**η*np.sign(up*z))*up/uy
55     return YY,Fh
56
57 # FUNCIÓN FUN_XX
58 def fun_XX(X=[1,2],Xp=[1,2],Z=[1,2],n=5):
59     XX=np.zeros((3*n,1))
60     for i in range(n):
61         XX[i][0]=X[i][0]
62     for i in range(n):
63         XX[n+i][0]=Xp[i][0]
64     for i in range(n):
65         XX[2*n+i][0]=Z[i][0]
66     return XX
67
68 # FUNCIÓN FUN_INV_XX
69 def fun_inv_XX(X=np.zeros((9,1)),n=3):
70     XX1=np.zeros((n,1)); XX2=np.zeros((n,1)); XX3=np.zeros((n,1))
71     for i in range(n):
72         XX1[i][0]=X[i][0]
73     for i in range(n):
74         XX2[i][0]=X[n+i][0]
75     for i in range(n):
76         XX3[i][0]=X[2*n+i][0]
77     return XX1,XX2,XX3
78
79 # FUNCIÓN YY
80 def YY(XX=np.zeros((9,1)), C=np.zeros((3,3)), M=np.ones((3,3)), K=np.
    zeros((3,3)), Fy=np.zeros((3,1)), uy=np.zeros((3,1)), α=0.025, η=2,
    ug=1.0, n=5):

```

```

81
82     xx=np.zeros((n,1));     xxp=np.zeros((n,1));
83     zz=np.zeros((n,1));     YY=np.zeros(3*n);
84     XXxx=np.zeros((n+2,1)); FFyy=np.zeros((n+1,1));
85     UUyy=np.ones((n+1,1)); ZZzz=np.ones((n+1,1));
86     FF1=np.zeros((n,1));   FF2=np.zeros((n, 1))
87     FZ=np.zeros((n, 1));   XPxp=np.zeros((n+2,1))
88     I=np.ones((n, 1));     F=np.zeros((n,1))
89     xx, xxp, zz=fun_inv_XX(XX, n)
90
91     # Vector F inicial
92     for k in range(n):
93         XXxx[k+1][0]=xx[k][0]
94         XPxp[k+1][0]=xxp[k][0]
95         FFyy[k][0]=Fy[k][0]
96         UUyy[k][0]=uy[k][0]
97         ZZzz[k][0]=zz[k][0]
98     for k in range(n):
99         FF1[k][0]=α*FFyy[k][0]/UUyy[k][0]*(XXxx[k+1][0]-XXxx[k][0])+
100         (1+α)*FFyy[k][0]*ZZzz[k][0]
101         FF2[k][0]=α*FFyy[k+1][0]/UUyy[k+1][0]*(XXxx[k+2][0]-XXxx[k
102         +1][0])+(1+α)*FFyy[k+1][0]*ZZzz[k+1][0]
103     F=FF1-FF2
104     for k in range(n):
105         FZ[k][0]=(1-abs(zz[k][0]))*η*np.sign((XPxp[k+1][0]-XPxp[k][0])*
106         zz[k][0])*(XPxp[k+1][0]-XPxp[k][0])/uy[k][0]
107     YY1=copy.copy(xxp)
108     YY2=(-np.dot(M, I)*ug-(np.dot(K, xx)+np.dot(C, xxp)+F))
109     YY3=copy.copy(FZ)
110     YY=fun_XX(YY1, YY2, YY3, n)
111     return YY, FF1

```

Código A.5: Funciones-KS

ANEXO B: HISTÉRESIS DE LOS DISPOSITIVOS DE CONTROL

Los modelos estructurales de las edificaciones estudiadas en el Capítulo VII usaron elementos de tipo *link* no lineales para representar el comportamiento de los dispositivos de control pasivo frente una carga sísmica. A continuación, se presentan las histéresis de dichos dispositivos para cada uno de los tres casos de estudio.

Edificio Principal del Aeropuerto Jorge Chavez

La Figura B.1 muestra las histéresis de uno de los dos los DFV instalados en el eje 5-5 del primer nivel del edificio principal del aeropuerto Jorge Chavez. Asimismo, la Figura B.2 presenta la histéresis de uno de los tres DH-SLB colocado en el eje 5-5 del primer nivel de la misma edificación.

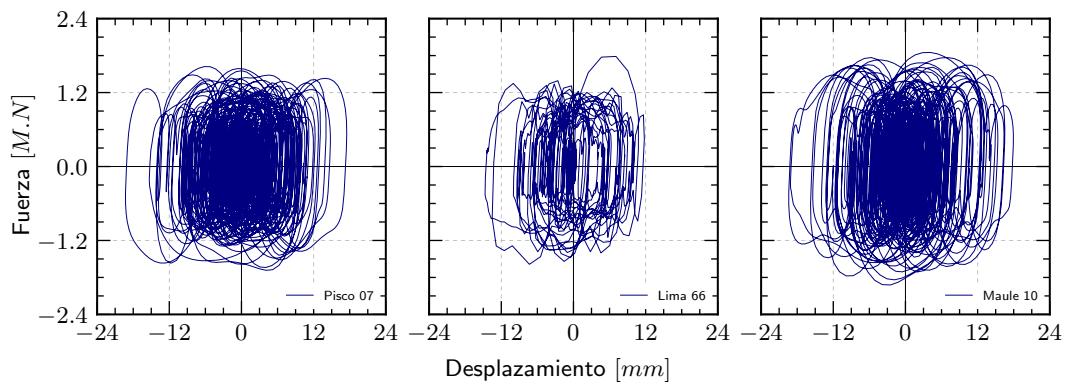


FIGURA B.1: Histéresis del DFV del edificio del aeropuerto Jorge Chavez.

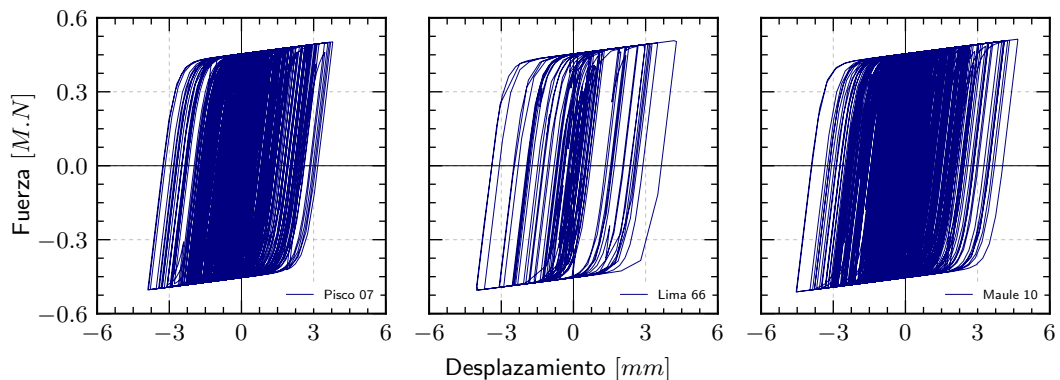


FIGURA B.2: Histéresis del DH-SLB del edificio del aeropuerto Jorge Chavez.

Edificio de Vivienda Multifamiliar

En la Figura B.3 se observa las histéresis de uno de los tres DH-SLB que se incorporaron en el primer nivel de la edificación de vivienda a lo largo del eje E-E entre los ejes 2-2 y 3-3. Por otro lado, dado que el AMS fue modelado con elementos de tipo *link* con comportamiento lineal, no se tiene histéresis de este dispositivo.

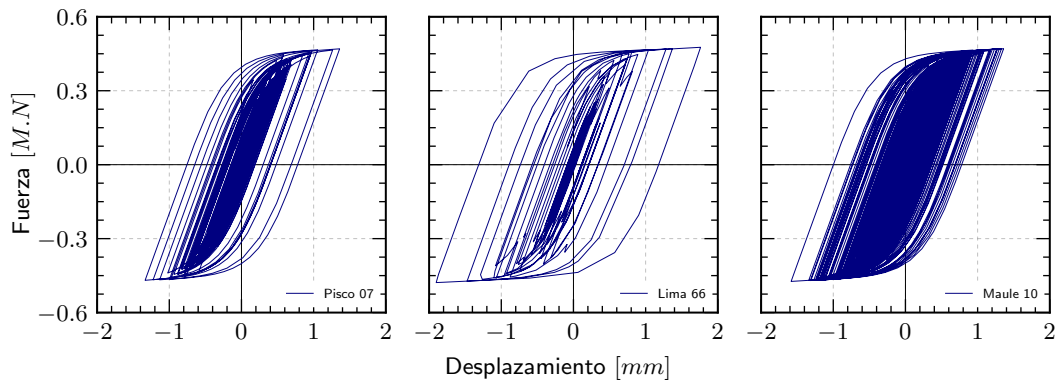


FIGURA B.3: Histéresis del DH-SLB del edificio de vivienda multifamiliar.

Edificio del Centro de Información FIC UNI

La Figura B.4 presenta las histéresis de la interfaz de aislamiento del edificio del centro de información FIC UNI. Asimismo, la Figura B.5 muestra las histéresis de uno de los dos DFV que se instalaron en el primer nivel, a lo largo del eje 1-1 entre A-A y B-B, de la edificación en cuestión.

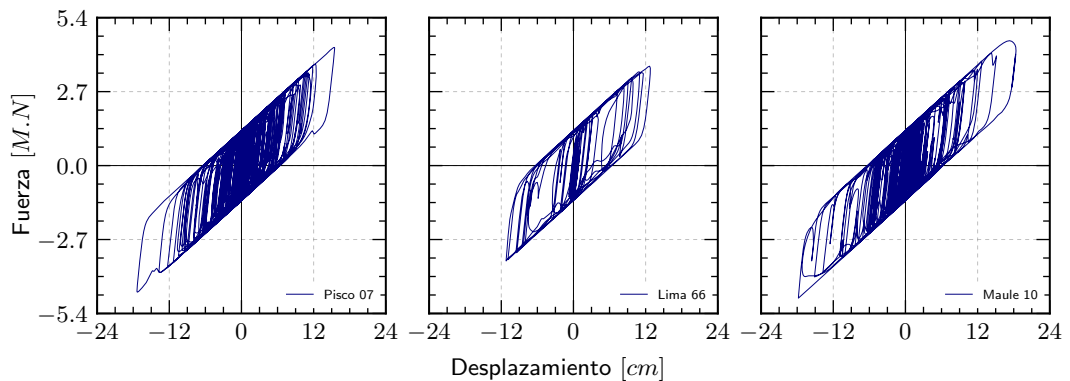


FIGURA B.4: Histéresis del interfaz de aislamiento del centro de información FIC UNI.

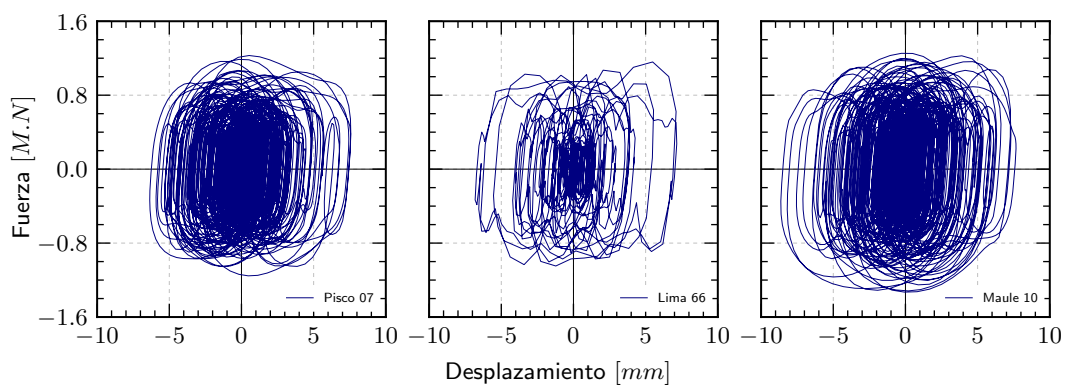


FIGURA B.5: Histéresis del DH-SLB del centro de información FIC UNI.