

**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

TÍTULO:

**Análisis y Diseño de estructuras de acero con disipadores
viscoelásticos para la ciudad de Guayaquil**

AUTOR:

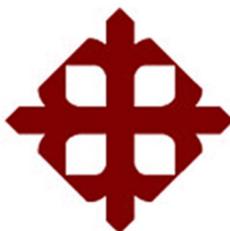
Lama Chong, Waleón Fernando

**Trabajo de Seminario de Graduación previo a la obtención del
Título de:
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Casal Rodríguez, Xavier Federico

**Guayaquil, Ecuador
2013**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **Waleón Fernando Lama Chong**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR (A)

Casal Rodríguez, Xavier Federico

REVISOR(ES)

Chon Díaz, Carlos Yldefonso

Zambrano Saltos, Ruth Mariela

DIRECTOR DE LA CARRERA

Dueñas Rossi, Mario

Guayaquil, a los 22 días del mes de Julio del año 2013



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Waleón Fernando Lama Chong**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **Análisis y Diseño de estructuras de acero con disipadores viscoelásticos para la ciudad de Guayaquil** previa a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 22 días del mes de Julio del año 2013

EL AUTOR:

Waleón Fernando Lama Chong



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Waleón Fernando Lama Chong**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Análisis y Diseño de estructuras de acero con disipadores viscoelásticos para la ciudad de Guayaquil**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 22 días del mes de Julio del año 2013

EL AUTOR:

Waleón Fernando Lama Chong

AGRADECIMIENTO

A Dios, mi familia, amigos, profesores y todos quienes han sido parte de mi vida.

DEDICATORIA

A mis padres, por el amor y sacrificio que han puesto para formarme como persona, cristiano y profesional.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Xavier Federico Casal Rodríguez
TUTOR

Carlos Yldefonso Chon Díaz
PROFESOR DELEGADO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA: INGENIERÍA CIVIL**

CALIFICACIÓN

**Xavier Federico Casal Rodríguez
TUTOR**

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: AMORTIGUAMIENTO EN ESTRUCTURAS.....	3
1.1. Introducción	3
1.2. Comportamiento Dinámico de Estructuras	4
1.3. Sistema de 1GDL Amortiguado en Vibración Libre.....	5
1.4. Sistema de 1GDL Amortiguado sujeto a una Fuerza Periódica	8
1.5. Sistema de 1GDL Amortiguado sujeto a una Fuerza Impulsiva.....	16
1.6. Sistema de 1GDL Amortiguado sujeto a un Evento Sísmico	17
CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE CONTROL PASIVO DE ENERGÍA	19
2.1. Introducción	19
2.2. Control Pasivo con Disipadores de Energía.....	21
2.3. Conservación y Disipación de Energía	22
2.4. Tipos de Disipadores Pasivos de Energía	26
2.4.1. Disipadores Metálicos.....	26
2.4.2. Disipadores Friccionantes	29
2.4.3. Disipadores de Fluidos Viscosos	31
2.4.4. Disipadores viscoelásticos (VE).....	33
CAPÍTULO 3: COMPORTAMIENTO DE UN DISIPADOR VISCOELÁSTICO ..	39
3.1. Introducción	39
3.2. Comportamiento de un Material VE sujeto a una Fuerza Sinusoidal	42
3.3. Comportamiento de un Disipador VE sujeto a una Fuerza Sinusoidal.....	44
3.4. Características del Módulo de Almacenamiento por cortante (G') y Módulo de Pérdida por cortante (G'')	45
3.5. Análisis de Estructuras con Disipadores Viscoelásticos	50
3.6. Respuesta Sísmica de un Sistema de 1GDL Amortiguado Con Disipadores Viscoelásticos	50
3.7. Consideraciones de Diseño Estructural con Disipadores Viscoelásticos...	52
3.8. Ejercicio de Aplicación	56
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS Y DISEÑO DEL PÓRTICO DE ACERO	61
4.1. Introducción	61
4.2. Normas y Códigos utilizados.....	61
4.3. Características del pórtico.....	62
4.3.1. Dimensiones.....	62
4.3.2. Materiales	63
4.4. Estados de Carga	63

4.4.1. Carga Muerta (DL).....	63
4.4.2. Carga Viva (LL).....	65
4.4.3. Carga Sísmica (EX)	65
4.5. Combinaciones de carga	67
4.6. Análisis y Diseño estructural en el programa SAP2000.....	68
4.6.1. Consideraciones en el modelo en SAP2000	68
4.6.2. Perfiles de acero de los elementos estructurales	69
4.6.3. Análisis Modal.....	70
4.6.4. Deformaciones laterales y Revisión de derivas inelásticas	71
4.6.5. Revisión del Diseño estructural	72

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y DISEÑO DEL PÓRTICO DE ACERO CON DISIPADORES VISCOELÁSTICOS	76
5.1. Introducción	76
5.2. Diseño de los Disipadores Viscoelásticos.....	76
5.3. Análisis y Diseño estructural en el programa SAP2000 con DVE.....	80
5.3.1. Análisis Modal con DVE	81
5.3.2. Deformaciones laterales y Revisión de derivas inelásticas con DVE ..	82
5.3.3. Revisión del Diseño estructural con DVE	85

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS MODAL NO LINEAL TIEMPO-HISTORIA.....	92
6.1. Introducción	92
6.2. Registros Sísmicos	92
6.3. Comparación de la Distribución de Energía.....	95
6.4. Histéresis de los Disipadores Viscoelásticos	98
6.5. Comparación de Deformaciones Laterales.....	100
6.6. Comparación de Fuerzas en Columnas.....	102
6.7. Comparación de Fuerzas en Vigas.....	103

CAPÍTULO 7: ALTERNATIVAS DE ANÁLISIS Y DISEÑO DEL PÓRTICO DE ACERO SIN Y CON DISIPADORES VISCOELÁSTICOS	104
7.1. Introducción	104
7.2. Alternativa 1: Aumento del Factor de Importancia	104
7.2.1. Comparación de fuerzas internas en elementos estructurales	105
7.2.2. Deformaciones laterales y Revisión de Derivas Inelásticas.....	108
7.3. Alternativa 2: Aumento del Coeficiente de reducción de resistencia inelástica R	108
7.3.1. Comparación de fuerzas internas en elementos estructurales	109
7.3.2. Deformaciones Laterales y Revisión de Derivas inelásticas.....	111
7.4. Alternativa 3: Rediseño del Pórtico de Acero usando DVE.....	112
7.4.1. Prediseño de los perfiles de acero de los elementos estructurales ...	112
7.4.2. Rediseño de los disipadores viscoelásticos.....	113
7.4.3. Análisis y Diseño del Nuevo Pórtico de Acero con DVE.....	115
7.4.3.1. Análisis Modal del Nuevo Pórtico de Acero con DVE.....	115

7.4.3.2. Deformaciones laterales y revisión de derivas inelásticas del nuevo pórtico con DVE	116
7.4.3.3. Revisión del Nuevo Diseño Estructural con DVE	117
7.4.4. Análisis Modal no lineal Tiempo–Historia del Rediseño del Pórtico con DVE	120
7.4.4.1. Distribución de Energía	120
7.4.4.2. Histéresis de los Nuevos Disipadores Viscoelásticos.....	122
7.4.4.3. Deformaciones Laterales.....	122
7.4.4.4. Fuerzas en Columnas	125
7.4.4.5. Fuerzas en Vigas.....	125
7.4.5. Comparación económica de pórticos diseñados	126
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	127
8.1. Conclusiones	127
8.2. Recomendaciones	130
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	132
ANEXOS.....	135
Anexo 1 Espectros de diseño Elástico e Inelástico según NEC-11	136
Anexo 2 Propiedades de los perfiles de acero W usado en el pórtico convencional.....	142
Anexo 3 Propiedades de los perfiles de acero W usado en el rediseño del pórtico con disipadores viscoelásticos.....	147
Anexo 4 Resultados de la Revisión de Diseño con el programa SAP2000 del Pórtico Convencional de Acero.....	152
Anexo 5 Resultados de la Revisión de Diseño con el programa SAP2000 del Pórtico de Acero con Disipadores Viscoelásticos	158
Anexo 6 Comparación de resultados de pórtico convencional sin y con Disipadores Viscoelásticos	164
Anexo 7 Resultados de la Revisión de Diseño con el programa SAP2000 del Rediseño del Pórtico de Acero con Disipadores Viscoelásticos	176
Anexo 8 Deformaciones y Fuerzas Axiales de los disipadores viscoelásticos adicionados al pórtico convencional	182
Anexo 9 Deformaciones y Fuerzas Axiales de los disipadores viscoelásticos del Rediseño del pórtico de Acero	184

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tipos de Disipadores Pasivos de energía (Symans et al., 2008).....	38
Tabla 3.1 Resultados de sistema de 1GDL con disipadores y sin disipadores	59
Tabla 4.1 Cálculo de carga muerta adicional.....	64
Tabla 4.2 Combinaciones de Carga.....	68
Tabla 4.3 Perfiles de acero de vigas y columnas.....	69
Tabla 4.4 Masa modal acumulada en dirección X	71
Tabla 4.5 Deformaciones laterales y Revisión de derivas inelásticas.....	72
Tabla 4.6 Resultados de revisión de diseño PMM de las columnas del pórtico	74
Tabla 4.7 Resultados de revisión de diseño PMM de las vigas del pórtico.....	75
Tabla 5.1 Masa modal acumulada en dirección X del pórtico con DVE.....	82
Tabla 5.2 Deformaciones Laterales y Revisión de derivas inelásticas con DVE	83
Tabla 5.3 Comparación de deformaciones laterales y derivas inelásticas del pórtico sin DVE y con DVE	83
Tabla 5.4 Resultados de revisión de diseño PMM de las columnas del pórtico con DVE.....	86
Tabla 5.5 Resultados de revisión de diseño PMM de las columnas del pórtico con DVE.....	86
Tabla 5.6 Comparación de resultados de Revisión de Diseño de columnas del pórtico sin DVE y con DVE	87
Tabla 5.7 Comparación de resultados de Revisión de Diseño de vigas del pórtico sin DVE y con DVE	87
Tabla 5.8 Comparación de fuerzas en columnas por COMBO 5 entre el pórtico sin DVE y con DVE	88
Tabla 5.9 Comparación de fuerzas en columnas por fuerza sísmica EX entre el pórtico sin DVE y con DVE	89

Tabla 5.10 Comparación de fuerzas en vigas por COMBO 5 entre el pórtico sin DVE y con DVE.....	89
Tabla 5.11 Comparación de fuerzas en vigas por fuerza sísmica EX entre el pórtico sin DVE y con DVE	89
Tabla 5.12 Porcentaje de reducción de V2 y M3 en columnas del pórtico con DVE	90
Tabla 5.13 Porcentaje de reducción de V2 y M3 en vigas del pórtico con DVE	91
Tabla 6.1 Distribución de Energía en el pórtico sin DVE	96
Tabla 6.2 Distribución de Energía en el pórtico con DVE	97
Tabla 6.3 Envolvente de Deformaciones máximas – Análisis Tiempo-Historia	100
Tabla 6.4 Comparación de Deformaciones laterales y Derivas entre pisos – Análisis Tiempo-Historia	100
Tabla 6.5 Fuerzas en Columnas – Análisis Tiempo-Historia	102
Tabla 6.6. Fuerzas en Vigas – Análisis Tiempo-Historia.....	103
Tabla 7.1 Comparación de fuerzas en columnas entre pórtico convencional (I=1.0) y pórtico con DVE usando un I=1.5.....	105
Tabla 7.2 Comparación de fuerzas en vigas entre pórtico convencional (I=1.0) y pórtico con DVE usando un I=1.5	106
Tabla 7.3 Porcentaje de reducción de V2 y M3 en columnas del pórtico con DVE (I=1.5).....	107
Tabla 7.4 Porcentaje de reducción de V2 y M3 en vigas del pórtico con DVE (I=1.5)	107
Tabla 7.5 Deformaciones Laterales y Revisión de derivas inelásticas con DVE (I=1.5)	108
Tabla 7.6 Comparación de fuerzas en columnas entre pórtico convencional (R=5) y pórtico con DVE (R=3)	110
Tabla 7.7 Porcentaje de reducción de V2 y M3 en columnas del pórtico con DVE (R=3)	110
Tabla 7.8 Comparación de fuerzas en columnas entre pórtico convencional (R=5) y pórtico con DVE (R=3)	110
Tabla 7.9 Porcentaje de reducción de V2 y M3 en vigas del pórtico con DVE (R=3).....	111

Tabla 7.10 Deformaciones Laterales y Revisión de derivas inelásticas con DVE (I=1.5)	112
Tabla 7.11 Nuevos perfiles de acero de vigas y columnas	113
Tabla 7.12 Diseño de nuevos disipadores viscoelásticos	114
Tabla 7.13 Masa modal acumulada en dirección X del nuevo pórtico con DV115	
Tabla 7.14 Deformaciones laterales y revisión de derivas inelásticas del nuevo pórtico con DVE	116
Tabla 7.15 Resultados de revisión de diseño PMM de las columnas del pórtico nuevo con DVE	119
Tabla 7.16 Resultados de revisión de diseño PMM de las vigas del pórtico nuevo con DVE	119
Tabla 7.17 Distribución de Energía en Pórtico rediseñado con DVE	120
Tabla 7.18 Porcentaje de Energía de Entrada absorbida	121
Tabla 7.19 Envolvente de deformaciones en rediseño con DVE – Análisis Tiempo-Historia.....	123
Tabla 7.20 Comparación de Deformaciones laterales y Derivas entre pisos – Análisis Tiempo-Historia	123
Tabla 7.21 Fuerza en Columnas en rediseño con DVE – Análisis Tiempo-Historia.....	125
Tabla 7.22 Fuerza en Vigas en rediseño con DVE – Análisis Tiempo-Historia	126
Tabla 7.23 Comparación Cantidades – Costo de Acero	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Modelo de un sistema de 1GDL	5
Figura 1.2 Vibración libre de sistemas con amortiguamiento viscoso menor, mayor e igual al amortiguamiento crítico (Chopra, 2001)	7
Figura 1.3 Sistemas en vibración libre con diferentes factores de amortiguamiento: 2, 5, 10 y 20% (Chopra, 2001)	8
Figura 1.4 Respuesta de un sistema de 1GDL amortiguado a una carga sinusoidal (Chopra, 2001).....	10
Figura 1.5 Factor de magnificación de desplazamiento y ángulo de fase para un sistema amortiguado de 1GDL bajo una fuerza sinusoidal (Chopra, 2001).....	12
Figura 1.6 Magnificación del Desplazamiento vs Periodo de excitación / Periodo natural (Villarreal & Oviedo, 2008; Villaverde, 2009)	13
Figura 1.7 Respuesta de la vibración permanente de un sistema amortiguado ($\zeta=0.2$) de 1GDL a una fuerza sinusoidal para tres valores de radio de frecuencia ω/ω_n : (a) 0.5; (b) 1; (c) 2 (Chopra, 2001)	15
Figura 1.8 Factor de magnificación de desplazamiento para un sistema amortiguado de 1GDL bajo una fuerza impulsiva (Villaverde, 2009)	16
Figura 1.9 Espectro de respuesta de desplazamiento para factores de amortiguamiento de 2, 5, 10, 20, 30 y 50% de un registro sísmico en 1999 en Taiwán. (Villaverde, 2009)	17
Figura 2.1 Técnica de aislamiento sísmico en la base (Oviedo & Duque, 2006)	20
Figura 2.2 Técnicas de sistemas de efecto masa (Oviedo & Duque, 2006)	20
Figura 2.3 Sistemas de conexión entre disipadores y la estructura (Falk, 2010)	21
Figura 2.4 Respuesta en forma de energía de una estructura bajo diferentes sismos que producen una aceleración máxima de (a) 0.33g; y (b) 0.65g. (Uang y Bertero, 1986 citado en Soong & Dargush, 1997; y en Villaverde, 2009)	24
Figura 2.5 Respuesta en función de energía de una estructura: (a) sin disipadores de energía; (b) con disipadores de energía (Lobo et al., 1993 citado en Soong & Dargush, 1997)	25
Figura 2.6 Diagrama Desplazamiento – Fuerza. Histéresis de un disipador metálico (Kelly, 2001)	27
Figura 2.7. Disipador tipo ADAS (Aiken et al., 1993)	28

Figura 2.8. (a) Disipador TADAS; (b) Disipador instalado; y (c) Disipador TADAS en el edificio Core Pacific City, en construcción, Taipei, Taiwan (Tsai, 1993 citado en Chopra, 2001)	28
Figura 2.9 Diagrama Desplazamiento – Fuerza. Histéresis de un disipador friccionante (Kelly, 2001)	30
Figura 2.10 (a) Diagrama esquemático de un disipador tipo SBC; (b) SBC instalado en una estructura de prueba. (Grigorian & Popov, 1994, citado en Chopra, 2001)	30
Figura 2.11 Diagrama Desplazamiento – Fuerza. Histéresis de un disipador de fluido viscoso (Kelly, 2001)	32
Figura 2.12 (a) Disipador HiDAM entre el arriostramiento y la viga; (b) Componentes de HiDAM (Avilés, 2001)	32
Figura 2.13 (a) Componentes de disipador TFVD; (b) Disipador TFVD instalado (Taylor & Katz)	33
Figura 2.14 Diagrama Desplazamiento – Fuerza. Histéresis de un disipador viscoelástico (Kelly, 2001)	34
Figura 2.15. (a) Componentes disipador viscoelástico (Kelly, 2001); (b) Vista isométrica del disipador viscoelástico; (c) Instalación típica del disipador viscoelástico (Kitamura et al., 1991, citado en Oviedo et al., 2006).....	35
Figura 2.16 Disipador viscoelástico instalado en el World Trade Center (Soong & Dargush, 1997) (http://911research.wtc7.net/talks/collapse/angleclips.html)	36
Figura 2.17 Esquema del disipador SAVE (Avilés, 2001)	37
Figura 2.18 Descripción de la distorsión del dispositivo V-SAVE ubicado por debajo de la viga (Avilés, 2001)	37
Figura 3.1 Modelo físico idealizado de un disipador VE (Symans et al., 2008)	39
Figura 3.2 Comportamiento a Fluencia: esfuerzo vs tiempo y deformación vs tiempo (Balart, 2007)	40
Figura 3.3 Comportamiento a Relajación: esfuerzo vs tiempo y deformación vs tiempo (Balart, 2007)	41
Figura 3.4 Comportamiento a Recuperación: esfuerzo vs tiempo y deformación vs tiempo (Balart, 2007).....	41
Figura 3.5 Esfuerzo y Deformación debido a una carga sinusoidal (Soong & Dargush, 1997)	42
Figura 3.6 Diagrama esfuerzo vs deformación para un material viscoelástico (Soong & Dargush, 1997; Villaverde, 2008).....	44

Figura 3.7 Variación aproximada del Módulo de almacenamiento de cortante G' con respecto a la frecuencia y la temperatura ambiente. Soong & Dargush (1997), Villaverde (2009)	46
Figura 3.8 Variación aproximada del Módulo de pérdida de cortante G'' con respecto a la frecuencia y la temperatura ambiente. Soong & Dargush (1997), Villaverde (2009).....	47
Figura 3.9 Comparación de valores del módulo de almacenamiento y pérdida por cortante calculados a partir de una ecuación con los resultados obtenidos de ensayos. (Soong & Dargush, 1997; Villarreal, 2008)	48
Figura 3.10 (a) Sistema de 1GDL con disipadores viscoelásticos; (b) Diagrama de cuerpo libre (Villaverde, 2009)	51
Figura 3.11 Diagrama de Flujo del proceso de diseño estructural con disipadores VE (Soong & Dargush, 1997)	53
Figura 3.12. Sistema estructural considerado en Ejercicio de Aplicación	56
Figura 3.13 Espectros de diseño elásticos e inelásticos usando el Método de Newmark.....	60
Figura 4.1 Dimensiones del pórtico a diseñar (metros).....	62
Figura 4.2 Dimensiones de losa nervada.....	63
Figura 4.3 Carga muerta DL asignada al modelo en SAP2000 (4.48 Ton/m)..	64
Figura 4.4 Carga viva LL asignada al modelo en SAP2000 (1.44 Ton/m)	65
Figura 4.5 Espectro Elástico e Inelástico ($I=1$, $R=3$) de aceleraciones $Z=0.4$, Suelo Tipo E	67
Figura 4.6 Estructura en SAP2000 con sus respectivos perfiles.....	70
Figura 4.7 Resultados de la Revisión de Diseño estructural del pórtico en SAP2000.....	74
Figura 5.1 Propiedades del disipador VE asignadas en SAP2000	79
Figura 5.2 Modelo en SAP2000 del pórtico con disipadores VE.....	81
Figura 5.3 Comparación de Deformaciones X del pórtico sin DVE y con DVE	84
Figura 5.4 Comparación de Derivas Inelásticas del pórtico sin DVE y con DVE	84
Figura 5.5 Resultados de la Revisión de Diseño estructural del pórtico con DVE en SAP2000.....	85

Figura 6.1 Registro Sísmico Guayaquil – Estación Centenario, 26 de abril de 1993, Escalado a Aceleración máxima =0.46g	94
Figura 6.2 Propiedades no lineales del DVE ingresadas en SAP2000	95
Figura 6.3 Distribución de Energía en el pórtico sin DVE	96
Figura 6.4 Distribución de Energía en el pórtico con DVE	97
Figura 6.5 Histéresis elíptica del disipador viscoelástico D12.....	99
Figura 6.6 Comparación de Deformaciones X del pórtico sin DVE y con DVE – Análisis Tiempo-Historia	101
Figura 6.7 Comparación de Derivas entre pisos del pórtico sin DVE y con DVE – Análisis Tiempo-Historia	101
Figura 6.8 Diagrama Momento vs. Tiempo para la columna EJE B NIVEL 7	102
Figura 6.9. Diagrama Momento vs. Tiempo para la viga EJE C NIVEL 2.....	103
Figura 7.1 Comparación de Deformaciones X del pórtico original sin DVE y rediseño del pórtico con DVE.....	116
Figura 7.2 Comparación de Deformaciones X del pórtico original sin DVE y rediseño del pórtico con DVE.....	117
Figura 7.3 Resultados de la Revisión del nuevo diseño estructural con DVE	118
Figura 7.4 Distribución de Energía en pórtico rediseñado	121
Figura 7.5 Histéresis elíptica del nuevo disipador viscoelástico D12.....	122
Figura 7.6 Comparación de Deformaciones X del pórtico original sin DVE y rediseño del pórtico con DVE – Análisis Tiempo-Historia	124
Figura 7.7 Comparación de Derivas entre pisos del pórtico original sin DVE y rediseño del pórtico con DVE – Análisis Tiempo-Historia	124

RESUMEN

La ciudad de Guayaquil se encuentra en una zona de alta actividad sísmica. Actualmente las estructuras de acero en Guayaquil son diseñadas para tener la suficiente resistencia y ductilidad ante un evento sísmico con el fin de que no colapsen, aunque puedan resultar con daños estructurales importantes.

En varios países se están desarrollando mecanismos de protección de estructuras, que aparte de evitar el colapso de la estructura, buscan reducir los daños que sufre la estructura ante la acción de un sismo. Uno de estos mecanismos son los disipadores viscoelásticos, cuyo objetivo es disipar la energía de entrada debido al sismo, ya que otorga un amortiguamiento adicional a la estructura y disminuir los daños en los elementos estructurales.

Este trabajo de grado presenta el estudio del comportamiento de estructuras de acero en la ciudad de Guayaquil usando disipadores viscoelásticos para lo cual se ha comparado el análisis y diseño convencional de un pórtico de acero de ocho niveles con los resultados que se obtienen al agregar disipadores.

Al realizar la comparación se ha concluido que es beneficioso usar disipadores viscoelásticos, ya que efectivamente disminuyen los daños en la estructura al absorber gran porcentaje de la energía de entrada y reducir esfuerzos y deformaciones en los elementos estructurales provocados por la carga sísmica. Además gracias al uso de disipadores viscoelásticos, el ingeniero civil puede optar por alternativas de análisis y diseño que presentan ventajas tanto técnicas como económicas.

Palabras Claves: disipadores, amortiguamiento, sismos, acero, viscoelástico, energía, análisis, diseño, daños

INTRODUCCIÓN

Los terremotos son fenómenos naturales que han causado grandes catástrofes en todo el mundo. Muchas estructuras han colapsado causando pérdidas humanas y materiales elevadas. La principal causa es el inadecuado diseño de las estructuras que no son capaces de soportar la acción de sismos severos.

La ciudad de Guayaquil ha sido testigo de estos fenómenos desde su fundación, como el caso del terremoto del 13 de mayo de 1942 y del sismo del 18 de agosto de 1980, que ocasionaron grandes daños no solo por la incapacidad de sus estructuras para resistir las fuerzas sísmicas, sino también por el tipo de suelo blando en que se haya asentada la mayor parte de la ciudad, y que contribuye a que se amplifiquen las vibraciones. Guayaquil es considerada una zona de alto peligro sísmico por la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2011, categorizándola como Zona sísmica V con un factor $Z=0.4g$.

Tenemos que ser conscientes que los sismos son inevitables, por lo que es responsabilidad del ser humano reducir los efectos luego de la acción de estos. Las normas y códigos existentes son una herramienta para el diseño sísmico resistente que permiten daños estructurales siempre y cuando se evite el colapso, luego de un evento sísmico grande. En países desarrollados como Estados Unidos y Japón se ha exigido que además de evitar el colapso de la estructura, los daños ocasionados no sean significativos.

Con el avance de la tecnología se han creado sistemas adicionales a los componentes convencionales de una estructura o edificación. Su objetivo es modificar las características dinámicas de la estructura, ya que buscan controlar o disipar parte de la energía sísmica entregada a la estructura. Al disipar la

energía se controla las deformaciones que sufre la estructura y por tanto su daño. Se han desarrollado diferentes sistemas de disipación de energía tales como: plastificación de metales, sistemas de fricción, disipadores de fluidos viscosos, disipadores viscoelásticos.

Debido a las posibles ventajas que puede presentar el uso de disipadores frente al diseño sísmo resistente convencional de estructuras, se ha decidido enfocar este trabajo de grado en la aplicación de disipadores viscoelásticos en estructuras de acero para la ciudad de Guayaquil.

CAPÍTULO 1

AMORTIGUAMIENTO EN ESTRUCTURAS

1.1. Introducción

“El amortiguamiento es el proceso que hace que el sistema con vibración libre disminuya su amplitud de manera constante” (Chopra, 2001, p. 12)

En una estructura, la disipación de energía surge generalmente del efecto térmico de deformaciones elásticas repetitivas y de la fricción interna que se produce cuando un sólido es deformado, como es el caso de la fricción entre conexiones de acero, la abertura y cierre de microgrietas en el concreto, la fricción entre la propia estructura con elementos no estructurales como las paredes de mampostería, entre otros. Como resulta imposible calcular cada uno de estos mecanismos de disipación de energía en una estructura actual, el amortiguamiento en estructuras es normalmente idealizado. En un sistema sencillo de un grado de libertad, el amortiguamiento es idealizado como un amortiguamiento viscoso lineal. En una estructura, el coeficiente del amortiguamiento es seleccionado de tal manera que la energía que disipa sea equivalente a toda la energía disipada por todos los mecanismos de disipación combinados. Esta idealización es conocida como amortiguamiento viscoso equivalente. (Chopra, 2001)

1.2. Comportamiento Dinámico de Estructuras

Las estructuras actualmente deben ser analizadas y diseñadas considerando su comportamiento dinámico. Para estudiar dicho comportamiento, se puede partir de un modelo de un grado de libertad (1GDL).

ECUACIÓN GENERAL DE MOVIMIENTO DE UN SISTEMA DE 1GDL

Según Soong & Dargush (1997), Chopra (2001) y Villarreal & Oviedo (2009):

Se toma como referencia el movimiento lateral de en un sistema de 1GDL, con masa m , rigidez k y coeficiente de amortiguamiento viscoso c . En la Figura 1.1, se supone que el sistema está sujeto a un movimiento sísmico representado por un desplazamiento del terreno $u_g(t)$ con respecto a un punto referencial, y por una fuerza lateral $p(t)$ que provoca un desplazamiento lateral $u(t)$ del modelo estructural con respecto a su base. El tiempo se define por t . Por tanto, el desplazamiento total del sistema idealizado es:

$$u_T(t) = u_g(t) + u(t) \quad (1.1)$$

Por definición, un resorte linealmente elástico produce una fuerza proporcional al desplazamiento y la fuerza producida por un amortiguador viscoso lineal es proporcional a su velocidad. Por tanto la ecuación general de movimiento queda definida así:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g + p \quad (1.2)$$

Donde u es función de t , y sus derivadas representan: \dot{u} es la velocidad y \ddot{u} es la aceleración del sistema; y \ddot{u}_g es la aceleración del terreno provocada por un sismo.

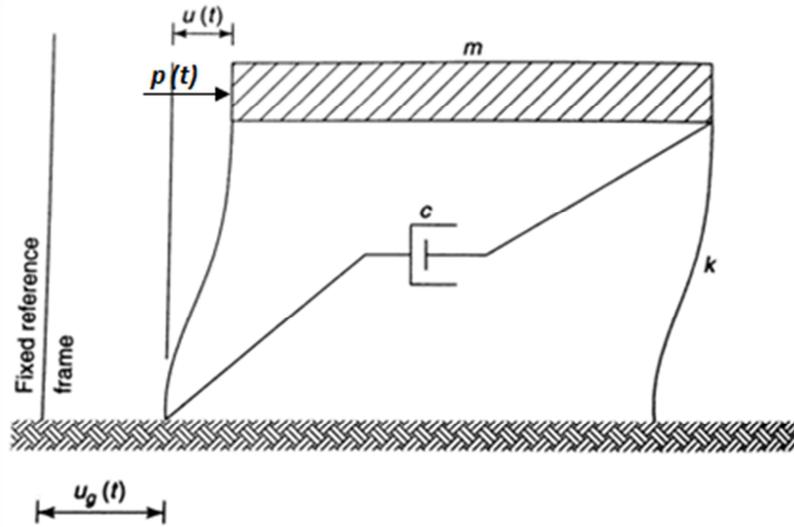


Figura 1.1 Modelo de un sistema de 1DGL

1.3. Sistema de 1DGL Amortiguado en Vibración Libre

La ecuación que describe las vibraciones libres amortiguadas de un modelo con un solo grado de libertad es (Soong & Dargush, 1997; Chopra, 2001; Bozzo & Barbat, 2004; Villaverde, 2009):

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (1.3)$$

Dividiendo para m resulta

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = 0 \quad (1.4)$$

Siendo $\omega_n = \sqrt{k/m}$ que representa la frecuencia natural del sistema, y

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_{cr}} \quad (1.5)$$

Donde c_{cr} es el coeficiente de amortiguamiento crítico, y ζ se lo conoce como factor o fracción de amortiguamiento crítico.

La frecuencia de vibración amortiguada se define como

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (1.6)$$

El periodo de vibración amortiguada, $T_D = 2\pi/\omega_D$, también se lo puede relacionar al periodo natural sin amortiguamiento T_n :

$$T_D = T_n / \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (1.7)$$

A partir de la fracción de amortiguamiento crítico se definen tres tipos de movimiento (Chopra, 2001; Bozzo & Barbat, 2004):

$c = c_{cr}$ ó $\zeta = 1$: El sistema regresa a su posición de equilibrio sin oscilar. El coeficiente de amortiguamiento crítico c_{cr} toma este nombre porque es el mínimo valor que debe tener c para que no ocurra la oscilación del sistema.

$c > c_{cr}$ ó $\zeta > 1$: El sistema regresa a su posición de equilibrio sin oscilar, como en el primer caso pero a un ritmo más lento. Este caso no se presenta generalmente en la ingeniería civil.

$c < c_{cr}$ ó $\zeta < 1$: El sistema oscila sobre su posición de equilibrio con una disminución progresiva de su amplitud. Este es el comportamiento habitual en estructuras de ingeniería civil sometidas a acciones dinámicas, que generalmente tienen un factor de amortiguamiento crítico menor al 10% (Chopra, 2001).

Villareal & Oviedo (2008) expresan que:

A pesar que la naturaleza de la disipación de energía inherente en los edificios no ha sido explícitamente identificada, el amortiguamiento viscoso inherente equivalente de alrededor del 2-5% del amortiguamiento

crítico ha sido aceptado en la práctica para el análisis de la respuesta lineal de edificios típicos. La mayoría de los espectros de diseño desarrollados asumen el 5% del amortiguamiento viscoso crítico en el sistema. (p. 14)

En la siguiente figura se detalla los tres movimientos descritos arriba.

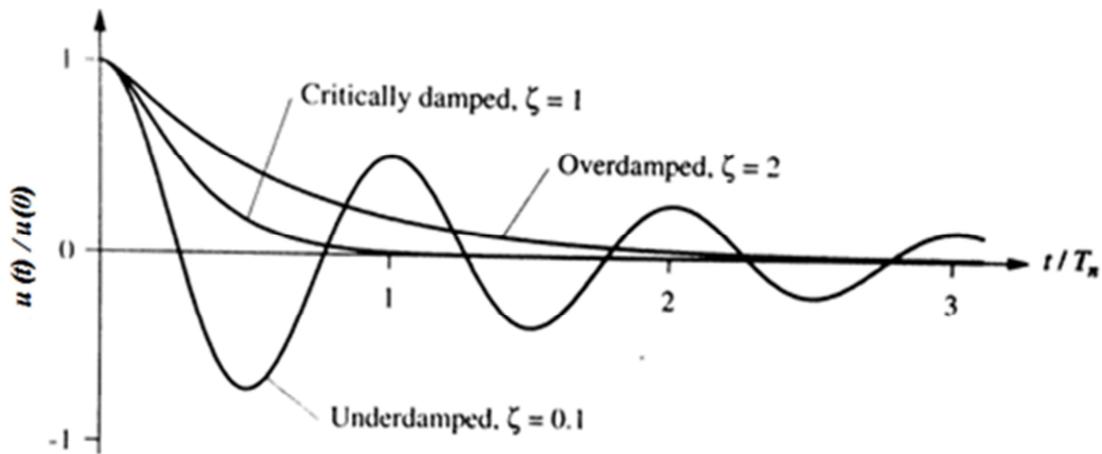


Figura 1.2 Vibración libre de sistemas con amortiguamiento viscoso menor, mayor e igual al amortiguamiento crítico (Chopra, 2001)

La solución para la ecuación (1.2) asumiendo un desplazamiento inicial $u(0)$ y velocidad inicial $\dot{u}(0)$ diferente de cero, en un sistema con $c < c_{cr}$ ó $\zeta < 1$ es:

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[u(0) \cos \omega_D t + \frac{\dot{u}(0) + \zeta\omega_n u(0)}{\omega_D} \sin \omega_D t \right] \quad (1.8)$$

Para ilustrar el efecto que tiene el aumento de amortiguamiento viscoso en un sistema de un grado de libertad en vibración libre, la siguiente figura muestra la ecuación (1.5) graficada para el mismo periodo natural T pero con diferentes factores de amortiguamiento ζ .

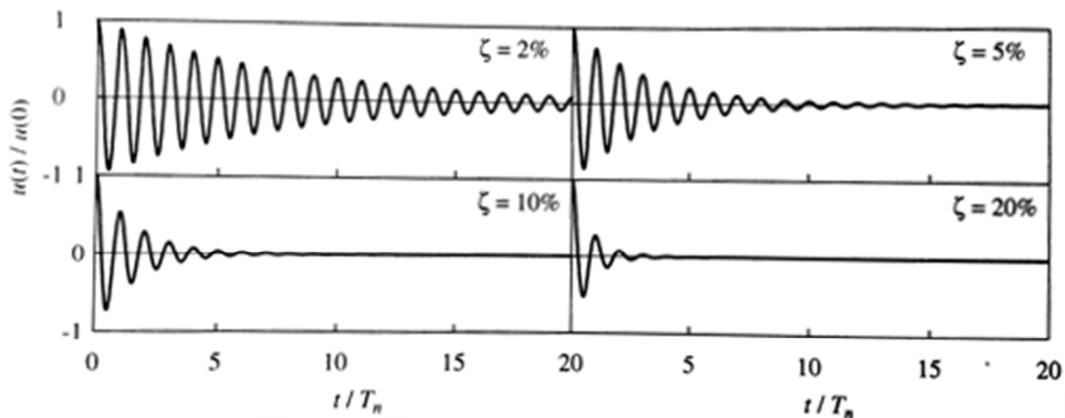


Figura 1.3 Sistemas en vibración libre con diferentes factores de amortiguamiento: 2, 5, 10 y 20% (Chopra, 2001)

En la Figura 1.3 se observa que el efecto más importante del aumento de amortiguamiento, es la reducción del número de ciclos necesarios para que la amplitud de la vibración libre decaiga a un valor determinado. Por ejemplo, para reducir la amplitud a $0.25u(0)$, con $\zeta = 2\%$ el sistema necesita oscilar cerca de diez ciclos antes de obtener dicha amplitud; con $\zeta = 5\%$ el sistema necesitó cerca de cinco ciclos; con $\zeta = 10\%$ necesitó alrededor de dos ciclos y con $\zeta = 20\%$ necesitó aproximadamente un ciclo.

1.4. Sistema de 1GDL Amortiguado sujeto a una Fuerza Periódica

A partir de Soong & Dargush (1997), Chopra (2001), Villarreal & Oviedo (2008) y Villaverde (2009):

Se considera el sistema de 1GDL, explicado anteriormente, sujeto a una fuerza sinusoidal $p(t) = p_o \sin \omega t$, siendo P_o la amplitud, y ω la frecuencia de excitación. La ecuación que representa la respuesta dinámica del sistema es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p_o \sin \omega t \quad (1.9)$$

Que tiene por solución la ecuación (1.8):

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} [A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t] + \frac{P_o}{k} \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2}} \sin(\omega t - \phi)$$

Donde β es la razón de frecuencia igual a: $\beta = \omega/\omega_n$ (1.10)

El ángulo de desfase ϕ , que define el tiempo en que se atrasa la respuesta del sistema con respecto a la aplicación de la fuerza, es igual a:

$$\phi = \tan^{-1}[2\zeta\beta/(1-\beta^2)] \quad (1.11)$$

Los valores de A y B pueden obtenerse a partir de condiciones iniciales.

La ecuación (1.8) está compuesta de dos componentes diferentes de vibración, conocidas como:

Respuesta de vibración transitoria, que es la solución complementaria del sistema representada por: $e^{-\zeta\omega_n t} [A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t]$. Esta respuesta disminuye con el tiempo de forma exponencial.

Respuesta de vibración permanente, que es la solución particular del sistema representada por: $\frac{P_o}{k} \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2}} \sin(\omega t - \phi)$. Esta respuesta se mantiene constante durante la aplicación de la fuerza periódica.

De esta manera, luego del tiempo en que la respuesta transitoria se desvanece, solo la respuesta de vibración permanente tiene una contribución importante en la respuesta total del sistema. Aunque se debe tener en cuenta que la deformación máxima ocurre antes que el sistema solo dependa de la vibración permanente, tal como se observa en la Figura 1.4.

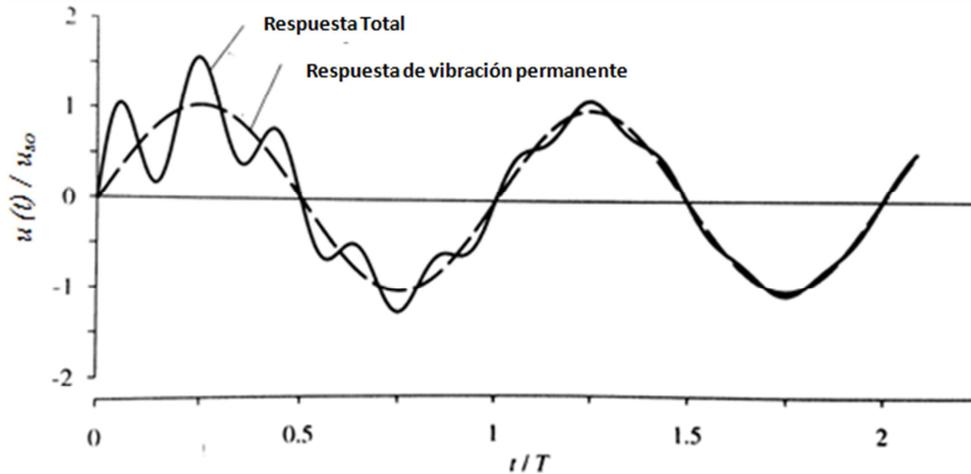


Figura 1.4 Respuesta de un sistema de 1GDL amortiguado a una carga sinusoidal (Chopra, 2001)

El desplazamiento debido a la respuesta permanente está dada por:

$$u(t) = u_{so} R_d \sin(\omega t - \phi) \quad (1.12)$$

Donde u_{so} es la deformación máxima del sistema cuando la carga es aplicada de forma estática (sin los efectos dinámicos de la aceleración):

$$u_{so} = p_o/k \quad (1.13)$$

Y R_d representa el factor de magnificación de desplazamiento:

$$R_d = \frac{u_o}{u_{so}} = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2}} \quad (1.14)$$

La Figura 1.5 permite entender el efecto del amortiguamiento. El amortiguamiento reduce el factor R_d , y en consecuencia, disminuye la amplitud de deformación.

La magnitud de la disminución depende de la frecuencia de excitación ω , y por tanto de la razón de frecuencia $\beta = \omega/\omega_n$. Soong & Dargush (1997), Chopra (2001), Villarreal & Oviedo (2008) y Villaverde (2009) indican que:

- a) Si $\beta \ll 1$, es decir, $T \gg T_n$; indica que R_d es ligeramente mayor a la unidad, por tanto, se considera independiente del amortiguamiento y que su respuesta es controlada por la rigidez del sistema. Partiendo de la ecuación (1.13), la respuesta de deformación sería:

$$u_o \cong u_{so} = \frac{p_o}{k}$$

- b) Si $\beta \gg 1$, es decir, $T \ll T_n$; R_d tiende a cero a medida que ω/ω_n aumenta y no es afectado por el amortiguamiento. Para valores grandes de β , la respuesta puede ser aproximada a:

$$u_o \cong u_{so} \frac{\omega_n^2}{\omega^2} = \frac{p_o}{m\omega^2}$$

Lo anterior indica que la respuesta es controlada por la masa del sistema.

- c) Si $\beta \cong 1$, R_d es controlado por el amortiguamiento del sistema. Para valores pequeños de amortiguamiento, R_d puede ser mucho mayor a la unidad, por tanto, la amplitud de la respuesta mecánica del sistema puede ser mucho mayor a la deformación estática (alcanzado el valor dando como resultado:

$$u_o = \frac{u_{so}}{2\zeta} = \frac{p_o}{c\omega_n}$$

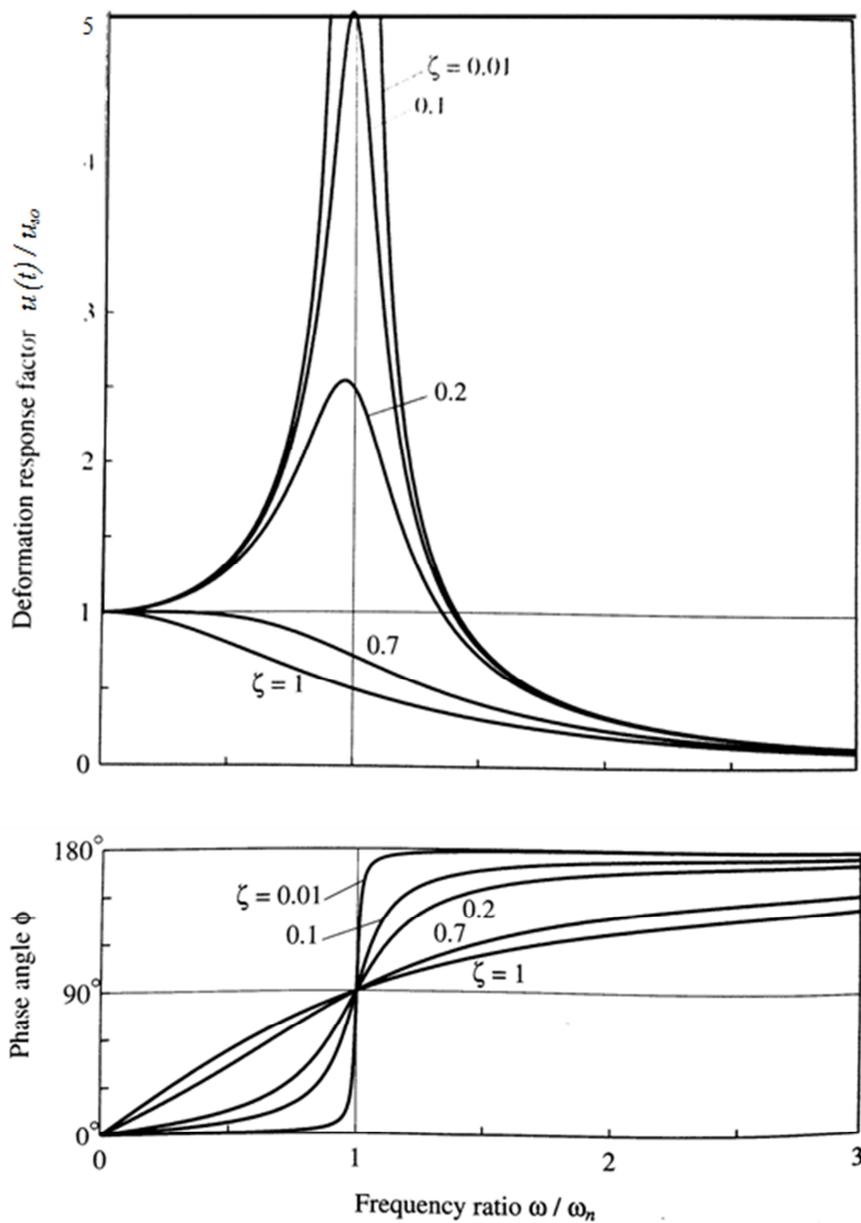


Figura 1.5 Factor de magnificación de desplazamiento y ángulo de fase para un sistema amortiguado de 1GDL bajo una fuerza sinusoidal (Chopra, 2001)

Villaverde (2009) adiciona que la importancia de la reducción de la respuesta debido al aumento de amortiguamiento, también depende del nivel de amortiguamiento inicial. Por ejemplo, en la Figura 1.6:

Si el factor de amortiguamiento se incrementa 2.5 veces de 2% a 5%, el factor de magnificación de desplazamiento varía de 25 a 10. Mientras que si el mismo incremento de 2.5 se lleva de un amortiguamiento inicial de 20% a 50%, R_d disminuye de 2.55 a 1.15, logrando una reducción pequeña de 1.4 veces la respuesta estática.

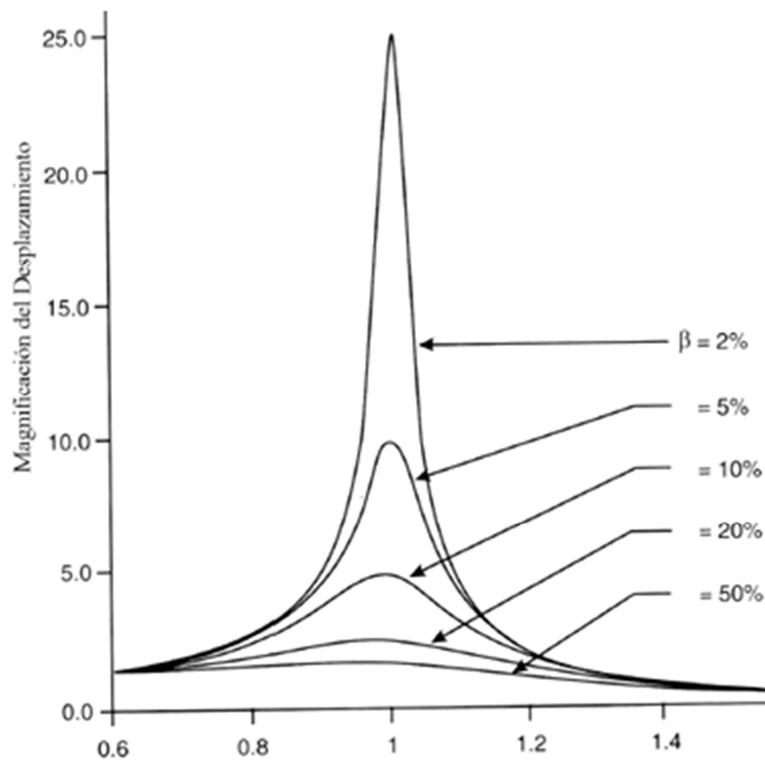


Figura 1.6 Magnificación del Desplazamiento vs Periodo de excitación / Periodo natural (Villarreal & Oviedo, 2008; Villaverde, 2009)

Chopra (2001) incluye una explicación (en la Figura 1.5) del comportamiento del ángulo de fase ϕ con respecto a β :

- a) Si $\beta \ll 1$, ϕ se acerca a 0° y el desplazamiento está en fase con la fuerza aplicada, es decir, el sistema se desplaza en la dirección que la fuerza es aplicada.

- b) Si $\beta \gg 1$, ϕ se acerca a 180° y el desplazamiento está fuera de fase con la fuerza aplicada, es decir, el sistema tiene un desplazamiento contrario a la dirección de la fuerza aplicada.
- c) Si $\beta=1$, para cualquier valor de ζ , $\phi= 90^\circ$. Esto indica que el desplazamiento alcanza su máximo valor en las ocasiones en que la fuerza llega a cero.

El comportamiento descrito de R_d y ϕ se observan también en la Figura 1.7, que muestra gráficas con tres valores de β pero con el mismo factor de amortiguamiento crítico ζ . Se observa que el movimiento, ocasionado por la respuesta permanente del sistema, ocurre en el periodo de la fuerza $T = 2\pi/\omega$, pero con un *tiempo de retraso* que es definido en las gráficas como $\phi/2\pi$.

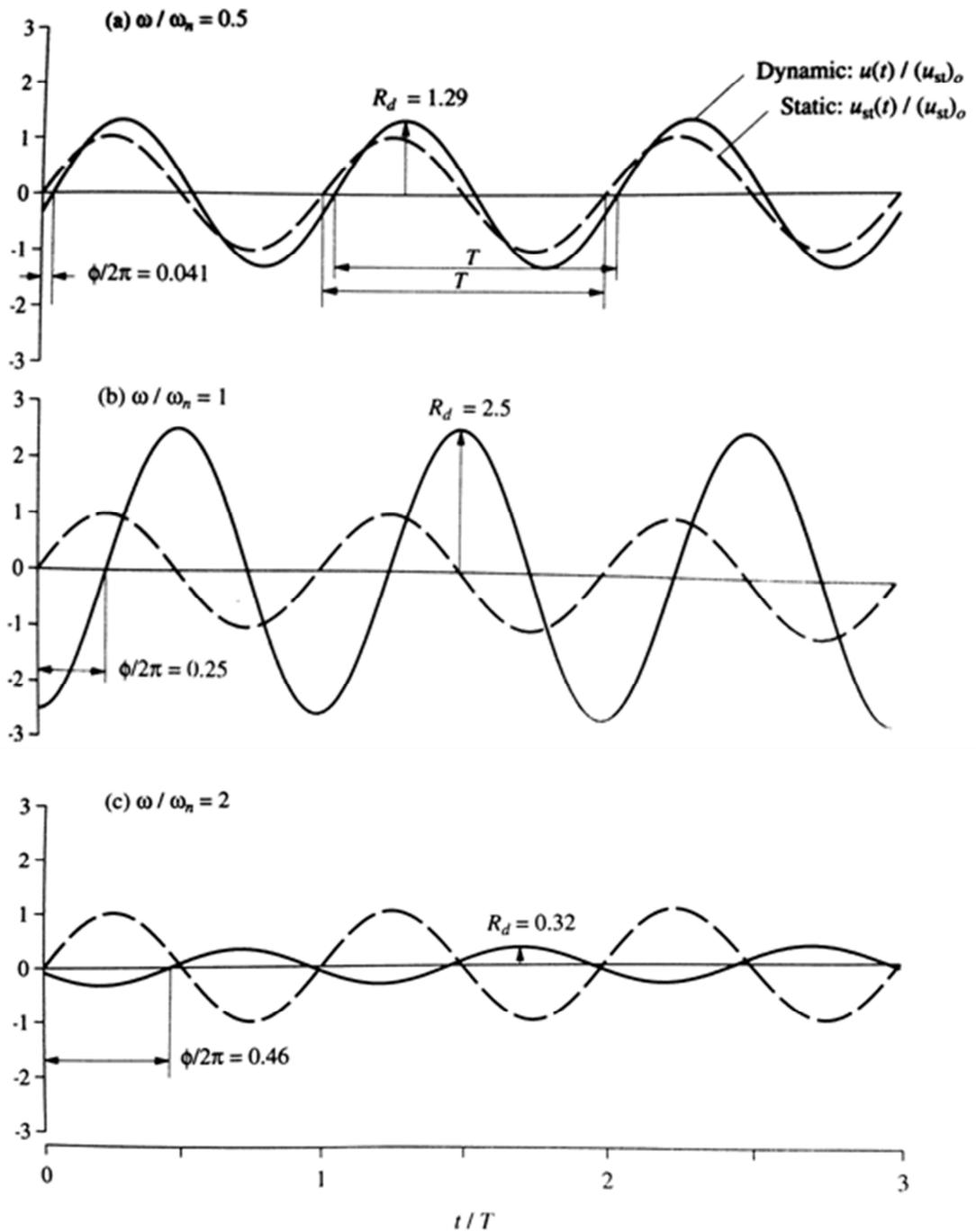


Figura 1.7 Respuesta de la vibración permanente de un sistema amortiguado ($\zeta=0.2$) de 1GDL a una fuerza sinusoidal para tres valores de radio de frecuencia ω/ω_n : (a) 0.5; (b) 1; (c) 2 (Chopra, 2001)

1.5. Sistema de 1GDL Amortiguado sujeto a una Fuerza Impulsiva

Se considera un sistema de 1GDL amortiguado como en el caso anterior pero sujeto a una fuerza impulsiva, que se considera como un pulso sinusoidal de duración de medio ciclo (Figura 1.8). La magnificación del desplazamiento máximo ocurre a un pulso de medio ciclo con una duración de alrededor de tres cuartos del período natural del sistema. Tal como en los casos de vibración libre y de una fuerza sinusoidal, la respuesta del sistema disminuye con un incremento del factor de amortiguamiento crítico. Pero comparado al efecto del aumento de amortiguamiento en sistemas bajo excitación periódica, el efecto en un sistema sometido a una fuerza impulsiva es menor.

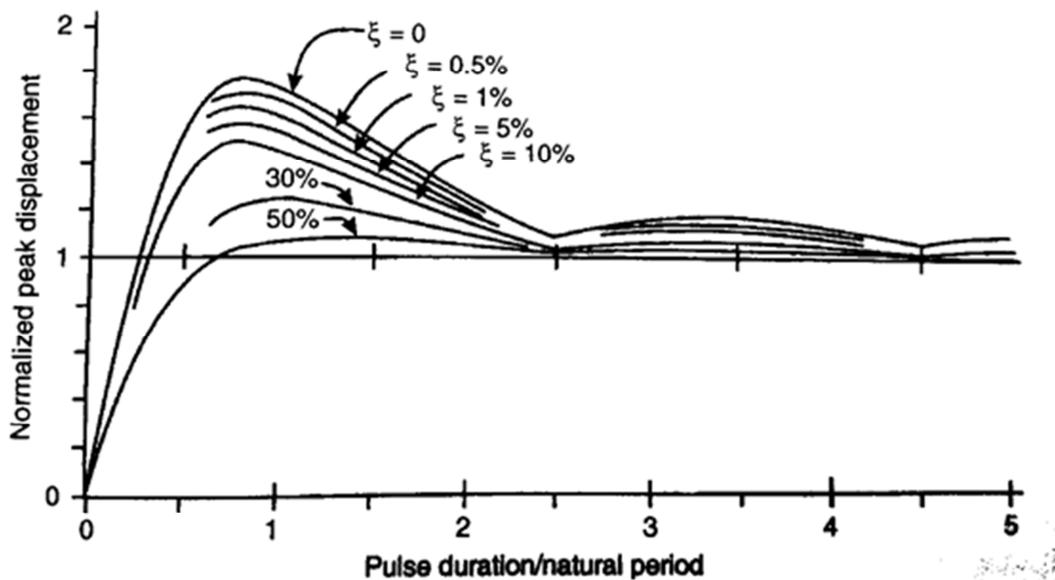


Figura 1.8 Factor de magnificación de desplazamiento para un sistema amortiguado de 1GDL bajo una fuerza impulsiva (Villaverde, 2009)

1.6. Sistema de 1GDL Amortiguado sujeto a un Evento Sísmico

Villaverde (2009) indica que la excitación del terreno debido a un sismo, se puede asemejar a una serie de pulsos cortos o a una serie de fuerzas periódicas con diferente frecuencia; por lo que la respuesta de un sistema de 1GDL bajo un evento sísmico se puede considerar similar a la respuesta bajo una fuerza impulsiva o periódica, como se observa en la Figura 1.9, que es un espectro de respuesta de desplazamiento que corresponde a un registro sísmico en Taiwán:

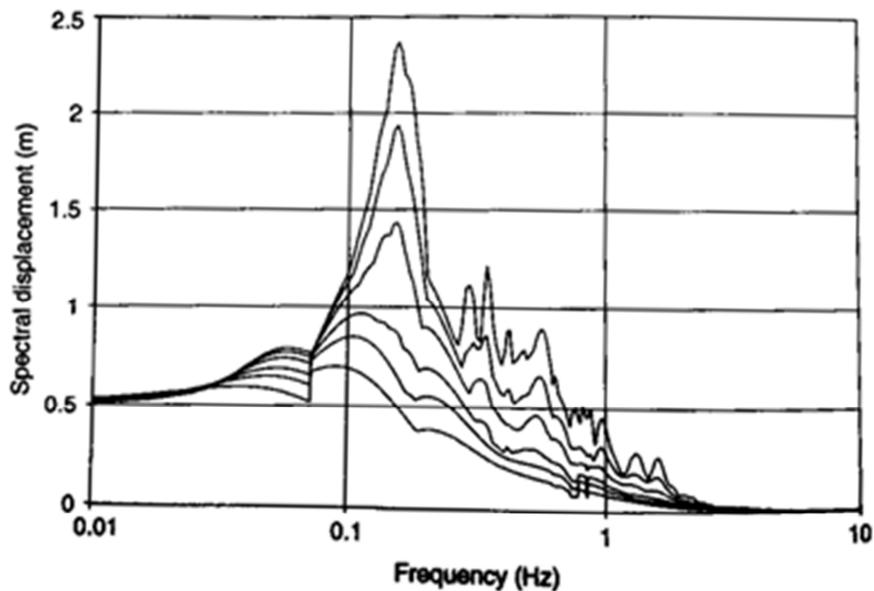


Figura 1.9 Espectro de respuesta de desplazamiento para factores de amortiguamiento de 2, 5, 10, 20, 30 y 50% de un registro sísmico en 1999 en Taiwán. (Villaverde, 2009)

- El efecto del amortiguamiento es más eficiente cuando se presentan movimientos resonantes, que cuando la frecuencia del sistema no está cerca de la frecuencia del movimiento del terreno.

- Un aumento del factor de amortiguamiento crítico reduce la respuesta del sistema de forma más efectiva, cuando el amortiguamiento inicial es bajo que cuando es elevado.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE CONTROL PASIVO DE ENERGÍA

2.1. Introducción

Los sistemas de control pasivo consisten en dispositivos que reaccionan ante la acción sísmica, alteran el comportamiento dinámico de la estructura y reducen su respuesta estructural; y no necesitan de una fuente de energía para funcionar (Soong & Dargush, 1997; Villarreal & Oviedo, 2008).

Los sistemas pasivos se clasifican en (Soong & Dargush, 1997; Oviedo & Duque, 2006; Villarreal & Oviedo, 2008):

- *Aisladores de base*: como su nombre lo indica se instalan en la base de la estructura, desacoplándola parcialmente del suelo, disminuyendo la energía de entrada y por consiguiente su respuesta estructural. Diferentes tipos de aisladores de base se pueden observar en la Figura 2.1.

- *Sistemas de efecto masa*: consisten en introducir una masa adicional, normalmente situadas en la parte alta de los edificios, para que vibre con la misma frecuencia natural de vibración de la estructura, generando fuerzas contrarias a la excitación, y así reduce los movimientos y deformaciones de la estructura. Dos sistemas: Tuned Mass Damper (TMD) y Tuned Liquid Damper (TLD) se observan en la Figura 2.2.

- *Disipadores de energía*: son eficientes maximizando la energía disipada y disminuyendo la respuesta estructural. Generalmente son instalados en riostras adicionales a los pórticos de la estructura como indica la Figura 2.3, y resultan más económicos que los sistemas antes mencionados.

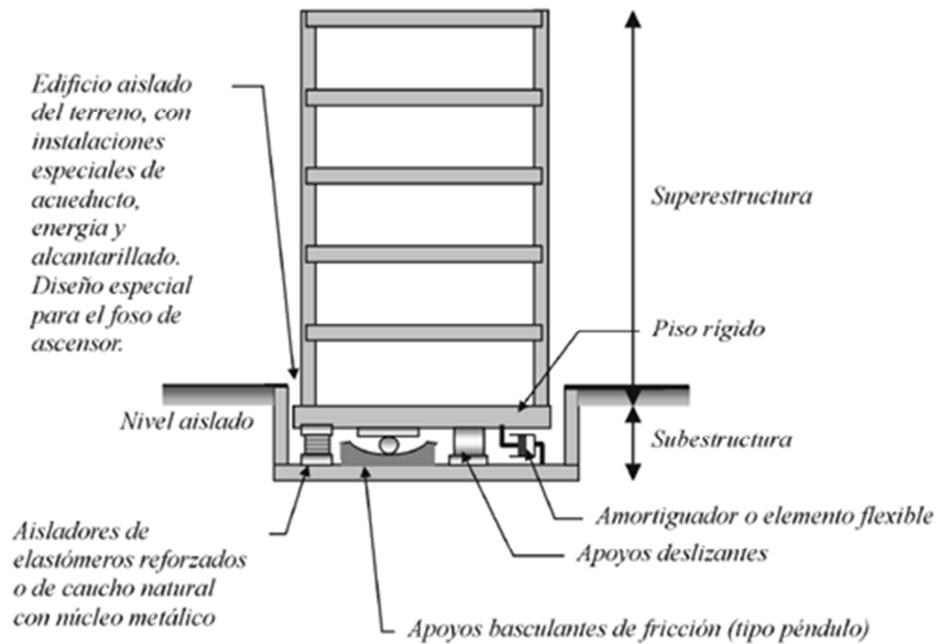


Figura 2.1 Técnica de aislamiento sísmico en la base (Oviedo & Duque, 2006)

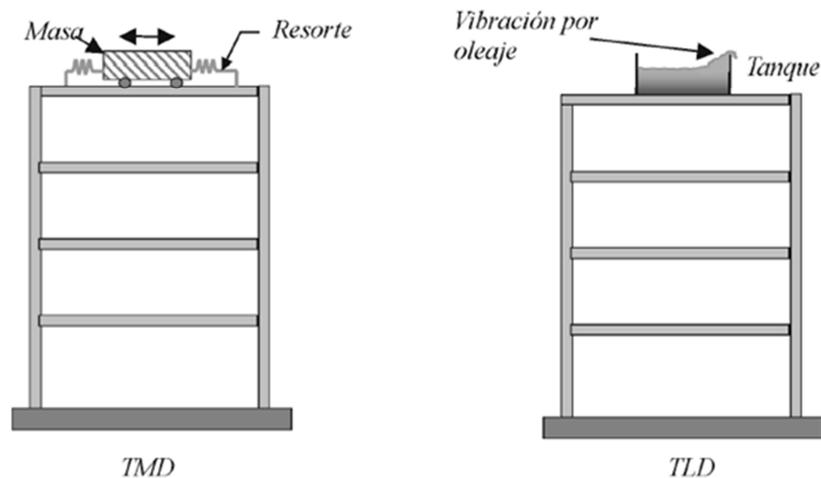


Figura 2.2 Técnicas de sistemas de efecto masa (Oviedo & Duque, 2006)

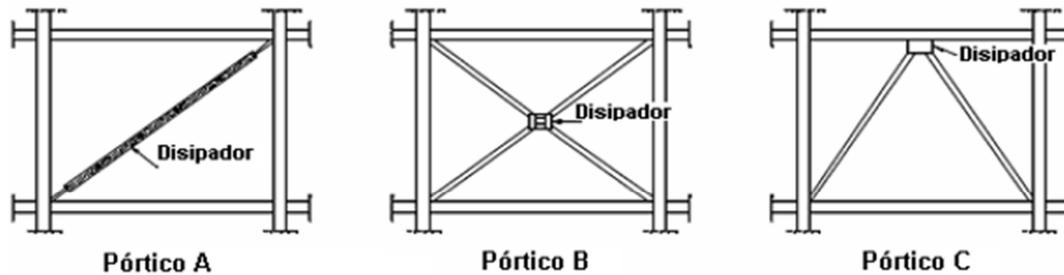


Figura 2.3 Sistemas de conexión entre disipadores y la estructura (Falk, 2010)

2.2. Control Pasivo con Disipadores de Energía

La disipación de energía en estructuras puede lograrse con elementos adicionales usados para reducir las deformaciones producidas por cargas laterales, ya sean cargas de viento o sismos. El principal objetivo es disipar la mayor cantidad de energía de entrada que ha recibido sistema estructural; a diferencia de los casos más convencionales de diseño de estructuras, que buscan aumentar la resistencia de la estructura (Kelly, 2001, Oviedo & Duque, 2006).

La filosofía del diseño de estructuras está expresada por:

$$\text{RESISTENCIA} > \text{DEMANDA}$$

Si se logra disipar la energía entregada en la demanda, el daño estructural puede reducirse. En el uso de estos disipadores se debe evaluar el costo-beneficio al momento de diseñar nuevas estructuras o al ser agregados a edificios construidos cuyas características sean deficientes ante un evento sísmico (Chopra, 2001).

2.3. Conservación y Disipación de Energía

A continuación se explica cómo se distribuye la energía, entregada por el sismo, en la estructura, y la importancia de los disipadores (Oviedo & Duque, 2006; Villarreal & Oviedo, 2008; Falk, 2010):

1. Un sismo representa una liberación de energía interna de la Tierra. Las estructuras, dependiendo de la cercanía al epicentro del sismo, reciben una parte de esta energía liberada, que se la identifica como Energía de entrada (E). Villarreal & Oviedo (2008, p. 11) indica que “la energía de entrada representa el trabajo hecho por la fuerza de corte total en la cimentación debido al desplazamiento del terreno y contiene el efecto de las fuerzas de inercia de la estructura”.
2. La Energía de entrada es disipada por la estructura a través de los varios medios:
 - a. Energía de deformación inelástica o ductilidad (E_H), también es conocida como energía histerética. Se disipa por la ductilidad de los elementos que conforman la estructura que resisten la carga impuesta por el sismo. Esta es la mayor fuente de disipación de energía, por lo que la mayoría de códigos y normas sismo resistentes confían en la ductilidad o comportamiento no lineal de la estructura para resistir el sismo.
 - b. Energía de deformación elástica recuperable (E_S).

- c. Energía cinética (E_K) que representa el movimiento de la estructura. La Energía cinética y potencial (deformación) deben ser disipadas a través del calor.
- d. Energía de amortiguamiento inherente de la estructura (E_A). Siempre existe algún nivel de amortiguamiento interno de la estructura que disipa parte de la energía de entrada y reduce la amplitud de la vibración hasta que el movimiento cese. Si no existiera un amortiguamiento interno, la vibración de la estructura sería infinita.

De esta manera la ecuación de conservación de energía se representa por:

$$E = E_H + E_S + E_K + E_A \quad (1.1)$$

Tal como se indicó a inicios del Capítulo 1, todos los mecanismos de disipación de energía de un sistema estructural son difíciles de identificar y calcular; por lo que la disipación de energía en una estructura se representa por amortiguamiento viscoso equivalente o factor de amortiguamiento crítico.

La Figura 2.4 (a) y (b) muestran como la energía de entrada (debida a un sismo) es disipada por una estructura. La Figura 2.4 (a) muestra una energía de entrada que produce una aceleración máxima de 0.33g provocando deformaciones inelásticas moderadas, ya que la disipación de energía se produjo en parte por la energía histerética o deformación inelástica y por la energía de amortiguamiento propio de la estructura. La Figura 2.4 (b) muestra un sismo más severo que entrega una energía de entrada que genera una aceleración máxima de 0.65g, produciendo deformaciones inelásticas excesivas. En este último caso a diferencia del primero, se observa que gran parte de la energía de entrada es absorbida por las deformaciones inelásticas,

mientras el amortiguamiento viscoso solo disipa una pequeña porción de energía.

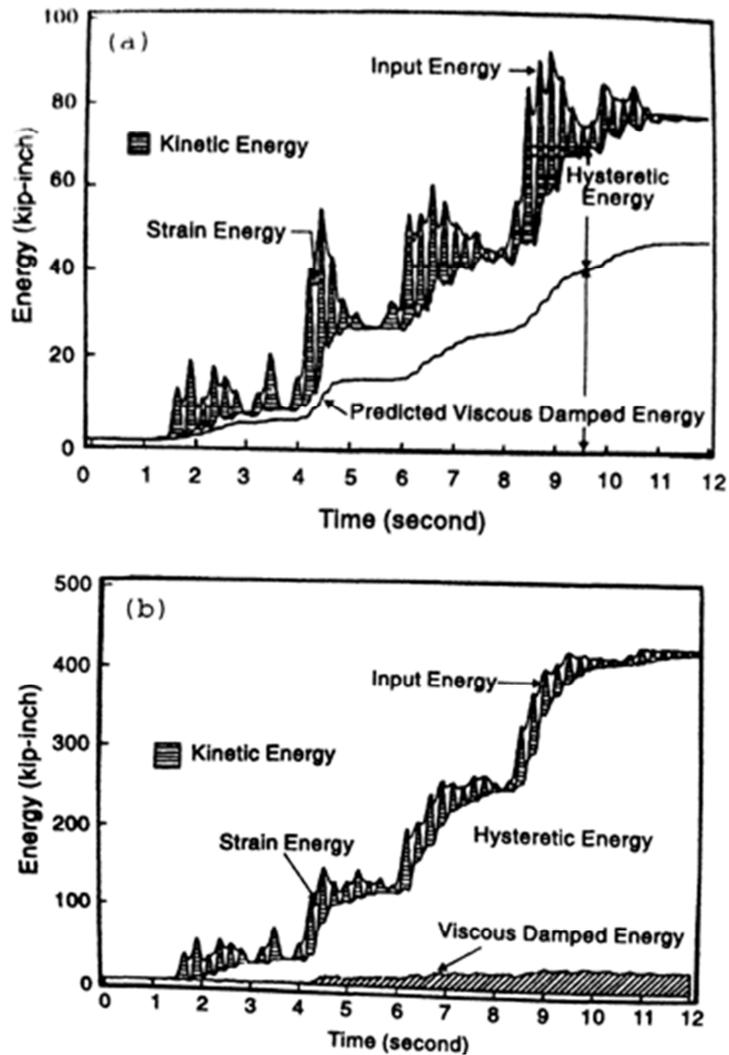


Figura 2.4 Respuesta en forma de energía de una estructura bajo diferentes sismos que producen una aceleración máxima de (a) 0.33g; y (b) 0.65g. (Uang y Bertero, 1986 citado en Soong & Dargush, 1997; y en Villaverde, 2009)

El objetivo de usar disipadores de energía es minimizar la energía disipada por la deformación inelástica de la estructura (E_H), maximizando el amortiguamiento de la estructura. Los disipadores de energía absorben parte de la energía de entrada y otorgan amortiguamiento adicional a la estructura,

reduciendo los daños de la estructura provocado por las deformaciones inelásticas. La ecuación (1.1) se modifica al agregar la energía absorbida por los disipadores de energía (E_D):

$$E = E_H + E_S + E_K + E_A + E_D \quad (1.2)$$

A continuación se muestra en la Figura 2.5 el efecto de los disipadores de energía en la respuesta dinámica de la estructura. La Figura 2.5 (a) muestra la respuesta de la estructura sometida a un sismo que genera una aceleración máxima de 0.2g sin usar disipadores, y la Figura 2.5 (b) muestra la misma situación pero con disipadores de energía.

En el primer caso, la energía de entrada es disipada a través de la ductilidad de los elementos estructurales provocando grandes daños a la estructura. En el segundo caso, el daño es mínimo debido a la acción de los disipadores de energía y se puede apreciar que aunque la energía de entrada haya tenido un ligero incremento, los disipadores consumen una cantidad importante de energía y protegen de esta manera la estructura principal.

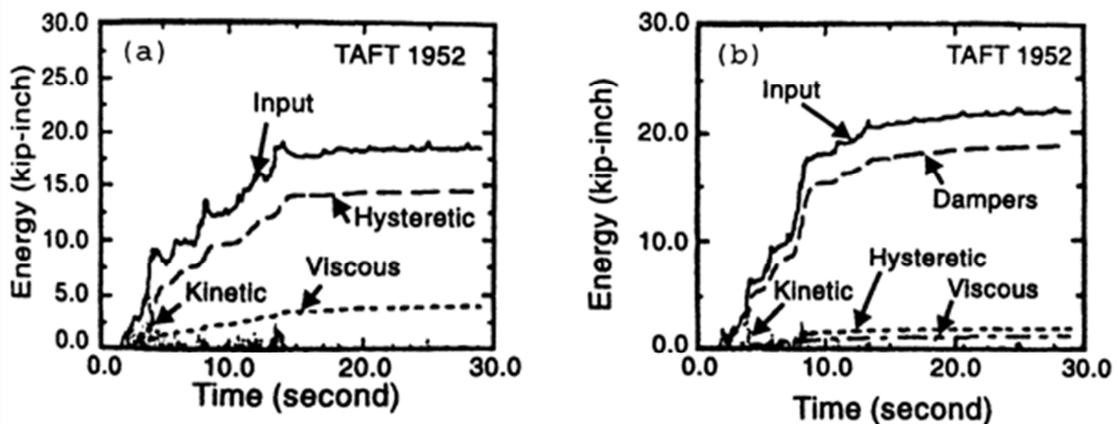


Figura 2.5 Respuesta en función de energía de una estructura: (a) sin disipadores de energía; (b) con disipadores de energía (Lobo et al., 1993 citado en Soong & Dargush, 1997)

2.4. Tipos de Disipadores Pasivos de Energía

La disipación de energía no es una tecnología nueva. Muchos dispositivos han sido desarrollados desde 1970 para alcanzar este objetivo (Chopra, 2001; Kelly, 2001). Algunos autores (Kelly, 2001; Oviedo & Duque, 2006; Symans et al., 2008) coinciden en que los sistemas de control pasivo de disipación de energía, también llamados disipadores o amortiguadores, pueden ser clasificados en:

- Metálicos (acero, plomo, entre otros)
- De fricción
- De fluidos viscosos
- Viscoelásticos

Los gráficos de carga cíclica *versus* deformación de todos los mecanismos de disipación de energía forman curvas de histéresis. El área encerrada por las curvas de histéresis representa la energía disipada por amortiguamiento. (Falk, 2010)

2.4.1. Disipadores Metálicos

Los disipadores metálicos disipan energía a través del comportamiento histerético de los metales cuando se llegan a deformar en el rango inelástico, ya sea debido a esfuerzos de flexión, cortante, torsión o axial (Chopra, 2001; Villarreal & Oviedo, 2008). Algunos de los disipadores metálicos de acero usados en el mundo son las placas a flexión, los amortiguadores torsionales de barras, los anillos amortiguadores por fluencia y las riostras metálicas. Oviedo & Duque (2006) y Villarreal & Oviedo (2008) explican los siguientes disipadores:

- Tipo *ADAS* (Added Damping and Stiffness), que es un disipador de placas en paralelo que se plastifican a flexión. Las placas se encuentran empernadas en ambos extremos impidiendo la rotación, de forma que un desplazamiento relativo entre estos en dirección perpendicular al plano de la placa produce una distribución de momentos flectores lineales, simétricos y con doble curvatura.
- Tipo *TADAS* (Triangular Added Damping and Stiffness), está formado también por placas en paralelo con la diferencia que un extremo de las placas esta empotrado y el otro articulado, de tal manera que con un desplazamiento relativo entre extremos de la placa perpendicular a su plano, se consigue la plastificación por flexión por curvatura simple.

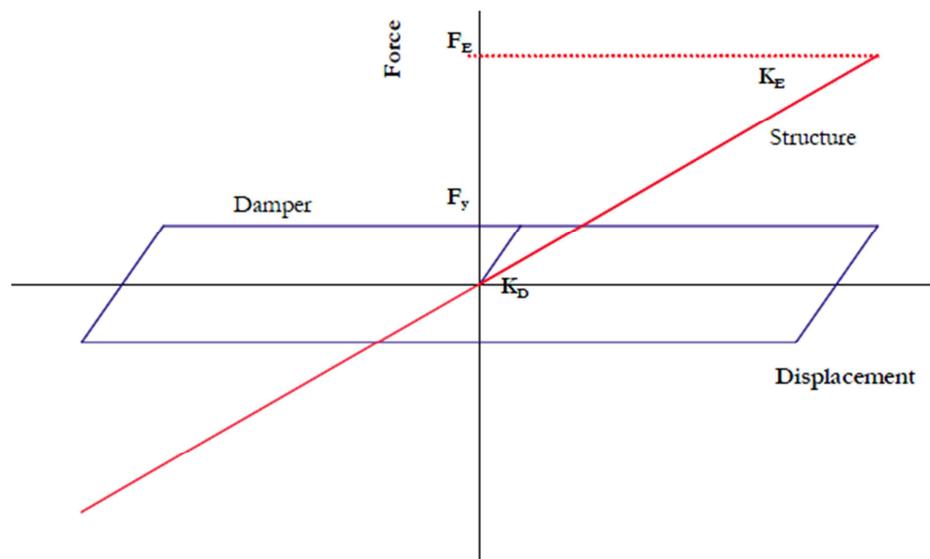


Figura 2.6 Diagrama Desplazamiento – Fuerza. Histéresis de un disipador metálico (Kelly, 2001)

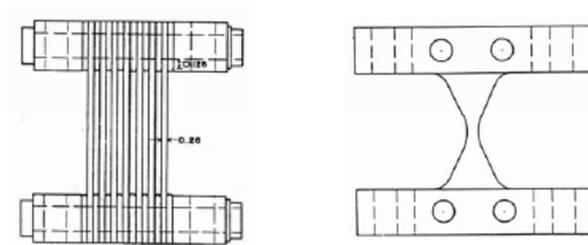
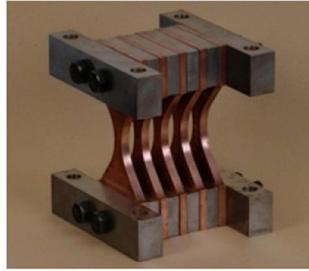
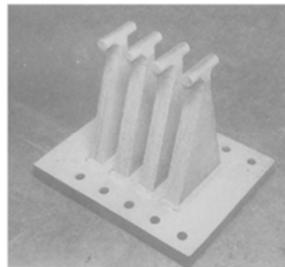


Figura 2.7. Disipador tipo ADAS (Aiken et al., 1993)



(a)



(b)



(c)

Figura 2.8. (a) Disipador TADAS; (b) Disipador instalado; y (c) Disipador TADAS en el edificio Core Pacific City, en construcción, Taipei, Taiwan (Tsai, 1993 citado en Chopra, 2001)

2.4.2. Disipadores Friccionantes

Los disipadores friccionantes trabajan tal como su nombre lo indica, a fricción, la cual es generada por el deslizamiento entre dos miembros metálicos en contacto bajo presión, disipando de esta manera la energía entregada, a través de calor; y generando curvas histéresis rectangulares (Oviedo & Duque, 2006; Falk, 2010). La energía disipada por ciclo es máxima para un determinado valor de la fuerza de deslizamiento (Villarreal & Oviedo, 2008).

La fuerza de fricción que se genera es igual a la fuerza normal que actúa sobre el disipador multiplicado por el coeficiente de fricción del material. Por esto Villarreal & Oviedo (2008) indican que:

El mayor inconveniente que presentan estos dispositivos disipadores es que el coeficiente de fricción, durante el desplazamiento, depende de la velocidad, de la presión normal y de las condiciones de las superficies en contacto. Consecuentemente, resulta difícil garantizar un coeficiente de fricción independiente del tiempo y de las condiciones de los disipadores. Sin embargo, se ha observado que la variación del coeficiente de fricción durante el desplazamiento no afecta significativamente a la respuesta estructural si la estructura permanece en rango lineal, mientras que esta influencia puede ser significativa si esta entra en rango no lineal. (p. 39)

Chopra (2001) indica que estos disipadores aumentan la capacidad de la estructura para disipar energía, pero no cambia significativamente el periodo natural de la estructura (alrededor de 10% a 20%). Un ejemplo de este tipo de

disipador es el SBC (Slotted Bolted Connection), que se observa en la Figura 2.10.

Los esfuerzos que se generan en los disipadores friccionantes y metálicos antes mencionados, dependen del desplazamiento al que sean sometidos (Kelly, 2001).

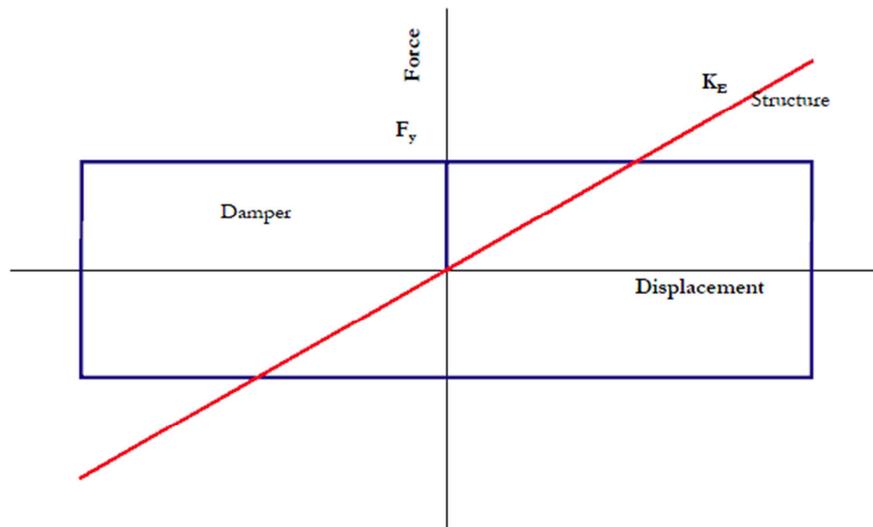


Figura 2.9 Diagrama Desplazamiento – Fuerza. Histéresis de un disipador friccionante (Kelly, 2001)

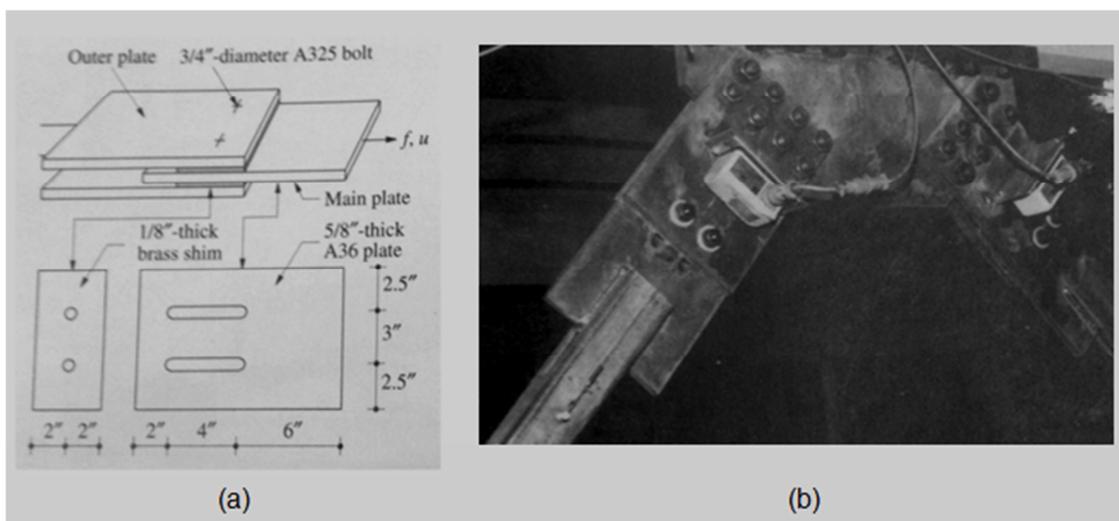


Figura 2.10 (a) Diagrama esquemático de un disipador tipo SBC; (b) SBC instalado en una estructura de prueba. (Grigorian & Popov, 1994, citado en Chopra, 2001)

2.4.3. Disipadores de Fluidos Viscosos

Los disipadores de fluidos viscosos se basan en la respuesta elástica de un líquido viscoso. Uno de los disipadores de fluidos viscosos de mayor uso es el dispositivo compuesto por un pistón inmerso en un fluido viscoelástico. Al generarse un desplazamiento interno del pistón, el fluido es forzado a pasar por un grupo de pequeños orificios, lo que da como resultado disipación de energía (Oviedo & Duque, 2006).

Un disipador de fluido viscoso es un dispositivo que disipa energía aplicando una fuerza resistente a un desplazamiento finito. La fuerza de salida del disipador actúa en la dirección opuesta al movimiento de entrada (Villarreal & Oviedo, 2008). El esfuerzo depende de la velocidad con la que se genera la deformación del disipador durante los ciclos de carga y la energía disipada depende de la viscosidad del fluido (Kelly, 2001; Falk, 2010).

Ejemplo de estos disipadores son: Disipador de Aceite de Alto Rendimiento (HiDam) y el Disipador de fluido viscoso de Taylor (TFVD) (Avilés, 2001).

La Figura 6 muestra las histéresis que resultan para disipadores viscosos con diferentes coeficientes de disipación. Para una mayor explicación de la gráfica se detalla la fórmula general que siguen los disipadores viscosos (Kelly, 2001):

$$F_D = C|u|^\alpha \operatorname{sgn}(u)$$

La ecuación viene dada por F_D que es la fuerza del disipador, C es el coeficiente del amortiguador o disipador, α es el exponente del amortiguador, u representa la velocidad y sgn es la función que indica el signo de la velocidad.

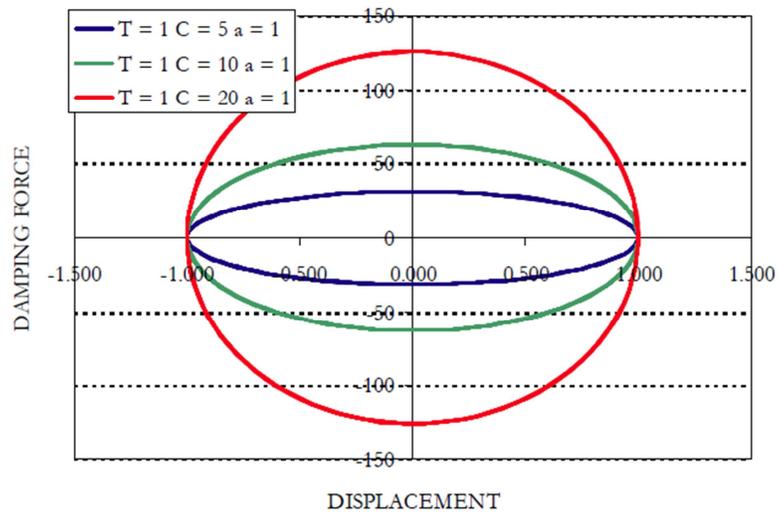


Figura 2.11 Diagrama Desplazamiento – Fuerza. Histéresis de un disipador de fluido viscoso (Kelly, 2001)

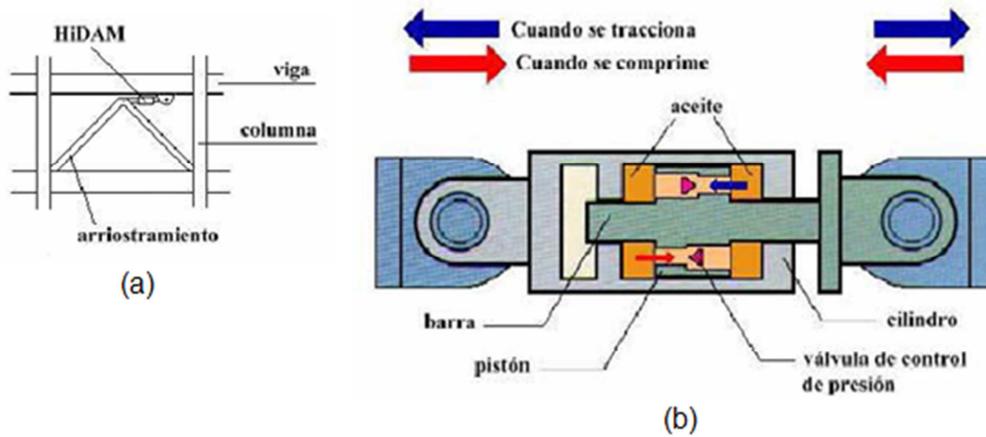
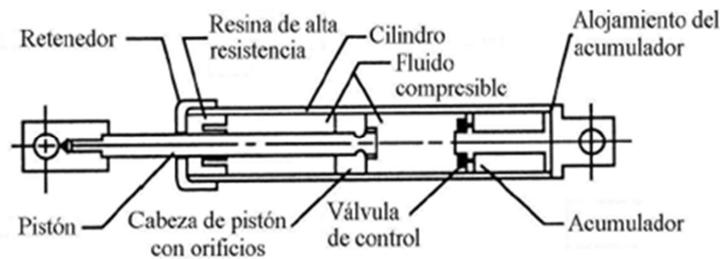


Figura 2.12 (a) Disipador HiDAM entre el arriostramiento y la viga; (b) Componentes de HiDAM (Avilés, 2001)



(a)



(b)

Figura 2.13 (a) Componentes de disipador TFVD; (b) Disipador TFVD instalado (Taylor & Katz)

2.4.4. Disipadores viscoelásticos (VE)

Los disipadores viscoelásticos son formados generalmente con polímeros sólidos que disipan energía por deformación al corte. Estos disipadores aumentan considerablemente la capacidad de la estructura para disipar energía, pero tienen poca influencia en el periodo natural de vibración de la estructura, se reduce solamente entre 10% y 20% (Chopra, 2001; Oviedo, R., 2006).

Una clase de polímero sólido ha sido desarrollado por la compañía 3M. Estos materiales tienen una rigidez elástica que hace que el esfuerzo al que trabajan sea dependiente del desplazamiento al que son sometidos; pero también tienen características viscosas que hacen que dicho esfuerzo también

dependa de la velocidad de variación de las deformaciones. El amortiguamiento depende de la viscosidad del material (Kelly, 2001).

Los disipadores VE generalmente consisten en placas de acero unidas con capas de material viscoelástico 3M en una configuración tipo sándwich como se observa en Figura 2.15. Los disipadores VE presentan curvas de histéresis casi elípticas. La energía es disipada por el desplazamiento relativo entre las placas metálicas exteriores y la placa metálica central del disipador (Chopra, 2001; Avilés, 2001).

Los materiales viscoelásticos son materiales cuyas características mecánicas dependen de la temperatura que se genere durante la disipación de energía, de la amplitud de tensión y deformación consecuente y de la frecuencia de vibración. (Avilés, 2001; Oviedo & Duque, 2006; Oviedo, R., 2006; Falk, 2010)

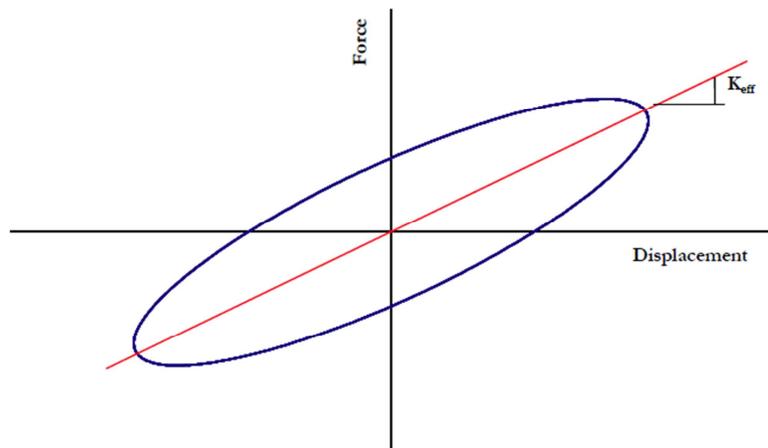


Figura 2.14 Diagrama Desplazamiento – Fuerza. Histéresis de un disipador viscoelástico (Kelly, 2001)

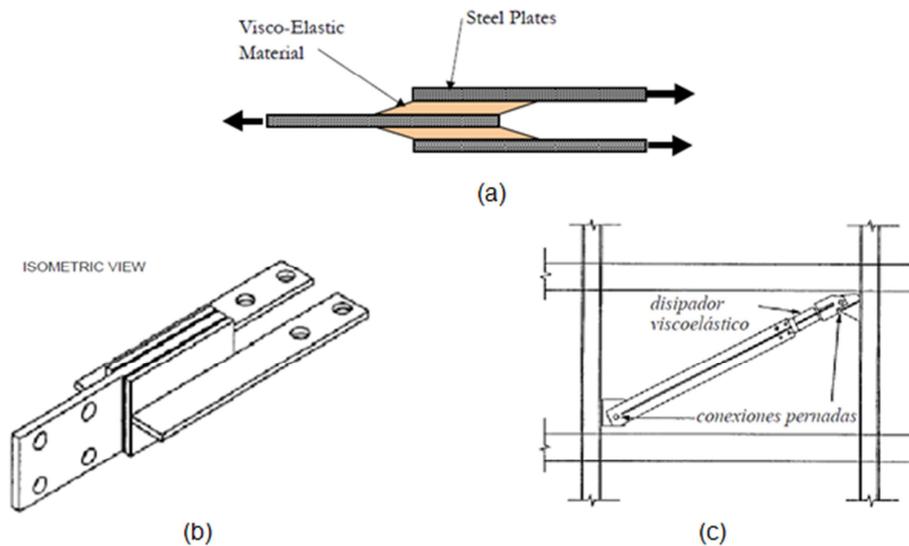


Figura 2.15. (a) Componentes disipador viscoelástico (Kelly, 2001); (b) Vista isométrica del disipador viscoelástico; (c) Instalación típica del disipador viscoelástico (Kitamura et al., 1991, citado en Oviedo et al., 2006)

Los disipadores viscoelásticos se usaron en sus inicios para controlar los efectos por carga de viento en las estructuras. En la actualidad se ha estudiado su aplicación sismo resistente.

Avilés (2001) relata que:

El primero y más notable ejemplo en que se han utilizado disipadores viscoelásticos 3M lo constituyen las torres gemelas en New York, el World Trade Center, en el cual se instalaron los dispositivos en el año 1969. [...]. En estas torres fueron instalados cerca de 10000 disipadores, puestos en el perímetro de cada edificio y localizados en la parte inferior del entramado del sistema de piso, desde el piso N°10 al N°110 (último piso). Las pequeñas deformaciones en los disipadores producto del

movimiento de la estructura por acción del viento, es suficientemente necesaria como para aumentar el amortiguamiento natural de la estructura [...]. (p. 55)

Soong & Dargush (1997) precisan que los disipadores fueron colocados entre las correas inferiores de las cerchas horizontales y las columnas, como se observa en la Figura 2.16.

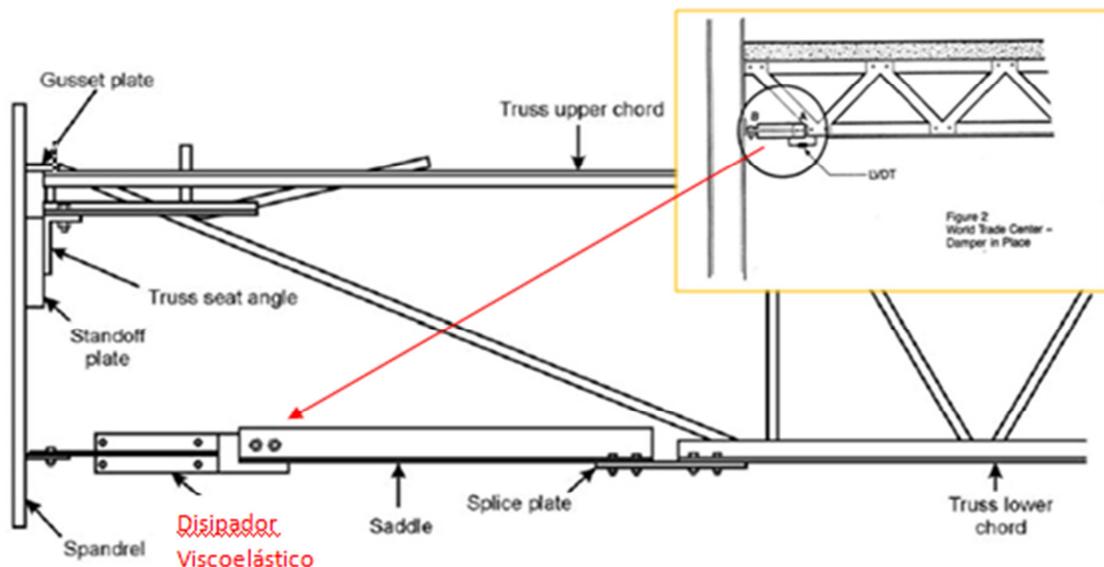


Figura 2.16 Disipador viscoelástico instalado en el World Trade Center (Soong & Dargush, 1997) (<http://911research.wtc7.net/talks/collapse/angleclips.html>)

Avilés (2001) detalla otros tipos de disipadores viscoelásticos:

- *SAVE* (desarrollado por la empresa japonesa Shimizu Corporation): utilizado en muros de edificios. Está compuesto de múltiples capas, que van alternando placas de acero y material viscoelástico, que son insertados dentro de los muros del edificio. De esta forma, en respuesta a la distorsión del edificio, los materiales viscoelásticos se deforman y

absorben energía reduciendo así las vibraciones. Usa un tipo de asfalto en vez de polímero y utiliza el desplazamiento relativo entre pisos para disipar energía.

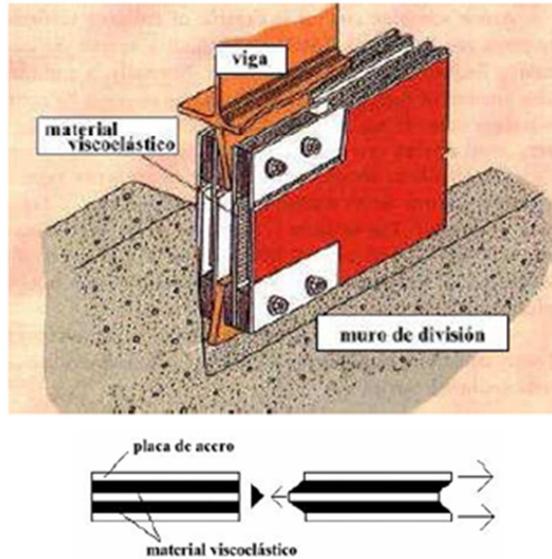


Figura 2.17 Esquema del disipador SAVE (Avilés, 2001)

- V-SAVE (desarrollado por la empresa japonesa Shimizu Corporation): similar al SAVE con la diferencia que busca reducir la deformación vertical en pisos y vigas principales. El disipador es empernado por debajo de la viga, como se observa en la Figura 2.18. Avilés (2001) en ese tiempo indicaba que este dispositivo se encontraba en fase de desarrollo y no había sido probado en estructuras reales.

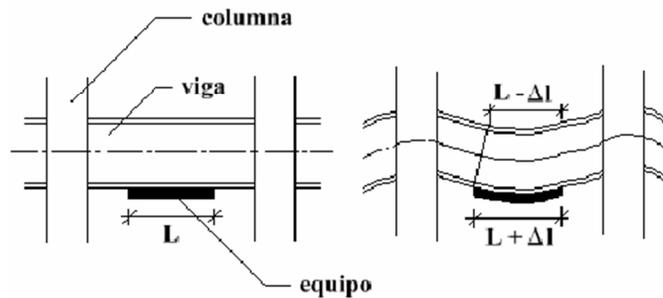


Figura 2.18 Descripción de la distorsión del dispositivo V-SAVE ubicado por debajo de la viga (Avilés, 2001)

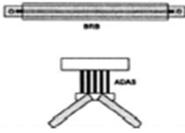
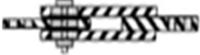
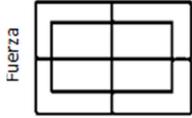
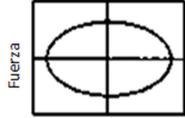
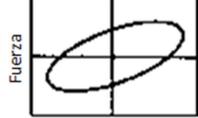
TIPOS DE DISIPADORES PASIVOS DE ENERGÍA				
	METÁLICOS	FRICCIONANTES	DE FLUIDOS VISCOSOS	VISCOELÁSTICOS
Modelo Básico				
Comportamiento histerético idealizado	 Fuerza Desplazamiento	 Fuerza Desplazamiento	 Fuerza Desplazamiento	 Fuerza Desplazamiento
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Insensibles a la temperatura ambiente. - Confiables a largo plazo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Energía disipada por ciclo es elevada. - Insensibles a la temperatura ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se activan a desplazamientos pequeños. - Mínima fuerza de restauración necesaria - Propiedades independientes generalmente de la frecuencia y temperatura ambiente. - Modelamiento del disipador es simplificado, si se considera amortiguamiento lineal 	<ul style="list-style-type: none"> - Se activan a desplazamientos pequeños. - Proporciona fuerzas de restauración. - Comportamiento lineal, que lleva a un modelamiento simplificado del disipador
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Daños en los dispositivos luego de un sismo. Pueden necesitar reemplazo. - Comportamiento no lineal, requiere análisis no lineal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coeficiente de fricción puede cambiar con el tiempo. - Comportamiento no lineal, requiere análisis no lineal. - Deformaciones permanentes si no se proporciona mecanismos de fuerza de restauración. 	<ul style="list-style-type: none"> - Posible fugas de líquido viscoso. 	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de deformación limitada. - Propiedades dependientes de la frecuencia y temperatura ambiente. - Posible desprendimiento del material VE (problema de confiabilidad).

Tabla 2.1 Tipos de Disipadores Pasivos de energía (Symans et al., 2008)

CAPÍTULO 3

COMPORTAMIENTO DE UN DISIPADOR VISCOELÁSTICO

3.1. Introducción

La fuerza del disipador viscoelástico (VE) sigue el modelo de Kelvin-Voigt:

$$F(t) = k'u(t) + c'\dot{u}(t) \quad (3.1)$$

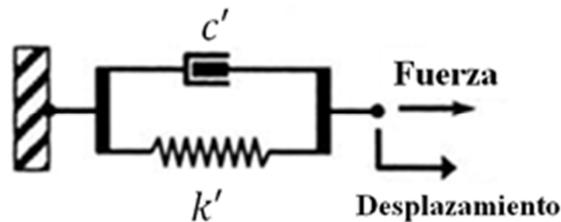


Figura 3.1 Modelo físico idealizado de un disipador VE (Symans et al., 2008)

El modelo físico idealizado (Figura 3.1) consiste en un resorte lineal con rigidez k' que actúa en paralelo con un amortiguador viscoso de coeficiente c' .

La expresión básica que rigen el comportamiento elástico del resorte es la ley de Hooke, que establece la proporcionalidad entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones obtenidas. De esta manera, la primera componente de la fuerza del disipador conocida como la *Fuerza de restauración*, definida por $k'u(t)$ que es proporcional al desplazamiento y depende de la elasticidad del material. (Balart, 2007; Symans et al., 2008)

Por otro lado, los materiales viscosos definen su comportamiento a partir de la Ley de Newton, que establece la proporcionalidad entre los esfuerzos aplicados y la velocidad de variación de las deformaciones. De este modo el

segundo componente de la fuerza del disipador es conocida como la *Fuerza de disipación*, definida por $c'\dot{u}(t)$ que es proporcional a la velocidad de las deformaciones y depende la viscosidad del material (Balart, 2007; Symans et al., 2008). Por tanto, el material viscoelástico tiene la capacidad de almacenar energía además de disipar energía (Symans et al., 2008).

La ecuación (3.1) explica tres fenómenos de largo plazo: fluencia, relajación y recuperación. Balart (2007) realiza la siguiente explicación:

Comportamiento a Fluencia: indica que el material trabaje en condiciones de esfuerzo constante ($F(t)$ es constante). En el modelo provoca una fluencia creciente de tipo exponencial. Una limitación del modelo de Kelvin – Voigt es que no explica la deformación instantánea.

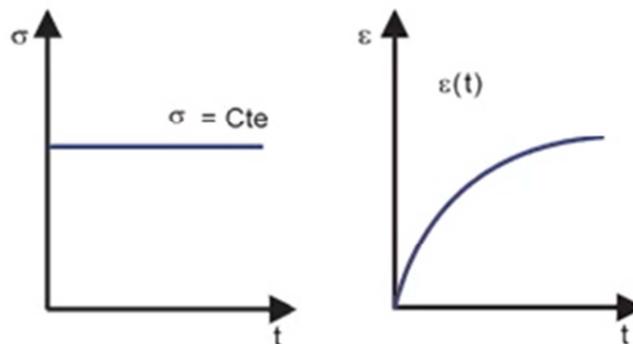


Figura 3.2 Comportamiento a Fluencia: esfuerzo vs. tiempo y deformación vs. tiempo (Balart, 2007)

Comportamiento a Relajación: cuando el material trabaja bajo una deformación constante ($u(t)$ es constante). El modelo indica que no se produce relajación en función del tiempo ($\dot{u}(t) = 0$), por lo que no se liberan tensiones, es decir, se mantiene el esfuerzo constante. El problema es que esta idealización no se ajusta a la realidad.

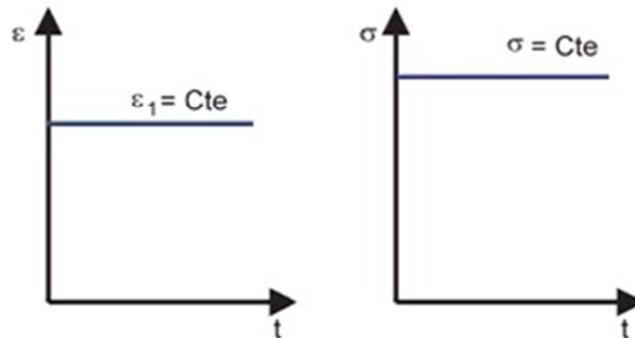


Figura 3.3 Comportamiento a Relajación: esfuerzo vs. tiempo y deformación vs. tiempo (Balart, 2007)

Comportamiento a recuperación: el esfuerzo que trabajaba sobre el material se anula ($F(t) = 0$); produciendo una relajación exponencial decreciente con el paso del tiempo. Esta idealización se ajusta bastante a la realidad.

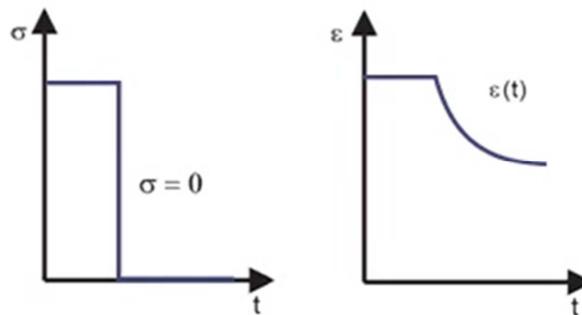


Figura 3.4 Comportamiento a Recuperación: esfuerzo vs. tiempo y deformación vs. tiempo (Balart, 2007)

Aunque la ecuación (3.1) tiene limitaciones, aporta las bases para construir modelos más reales sobre el comportamiento de los materiales viscoelásticos.

3.2. Comportamiento de un Material VE sujeto a una Fuerza Sinusoidal

De acuerdo a Lai (1996), Soong & Dargush (1997) y Villaverde (2009) cuando un material viscoelástico se encuentra bajo una fuerza sinusoidal con frecuencia ω , el esfuerzo de cortante $\tau(t)$ y la deformación por cortante $\gamma(t)$ oscilan a la misma frecuencia ω pero generalmente desfasados a un ángulo δ , siguiendo la forma:

$$\tau(t) = \tau_o \sin(\omega t + \delta) \quad \gamma(t) = \gamma_o \sin \omega t \quad (3.2)$$

Tal como se observa en la Figura 3.5, donde τ_o y γ_o son el máximo esfuerzo de cortante y la máxima deformación por cortante respectivamente; y δ es el ángulo de desfase.

La curva de esfuerzo y desplazamiento no coinciden, lo que indica que solo una parte de la energía almacenada por desplazamiento es recuperada una vez que se remueve la fuerza sinusoidal, mientras la energía que queda es disipada en forma de calor.

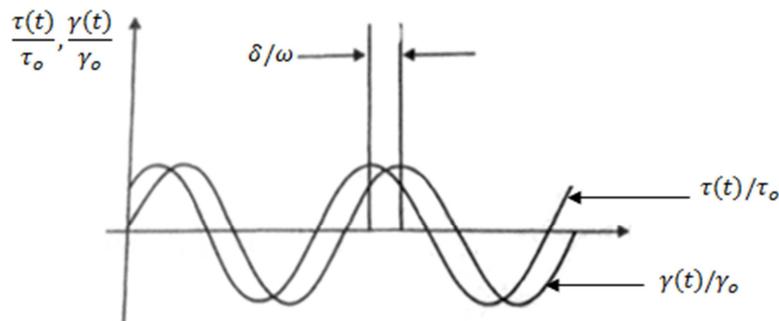


Figura 3.5 Esfuerzo y Deformación debido a una carga sinusoidal (Soong & Dargush, 1997)

El comportamiento de los materiales viscoelásticos es caracterizado generalmente por el *módulo de almacenamiento por cortante* G' , que es una medida de la energía almacenada y recuperada por ciclo; y el *módulo de pérdida por cortante* G'' , que indica una medida de la energía disipada por ciclo.

La razón entre el módulo de pérdida y de almacenamiento por cortante es el factor de pérdida η :

$$\eta = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)} = \tan \delta \quad (3.3)$$

donde

$$G'(\omega) = \frac{\gamma_o}{\tau_o} \cos \delta \quad G''(\omega) = \frac{\gamma_o}{\tau_o} \sin \delta \quad (3.4)$$

El factor de pérdida η también es usado como un indicador de la capacidad de disipación de energía de un material VE.

El esfuerzo de cortante puede ser expresado en función del desplazamiento:

$$\tau(t) = \gamma_o [G'(\omega) \sin \omega t + G''(\omega) \cos \omega t] \quad (3.5)$$

También puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\tau(t) = G'(\omega)\gamma(t) + \frac{G''(\omega)}{\omega} \dot{\gamma}(t) \quad (3.6)$$

Donde $\dot{\gamma}(t) = \gamma_o \omega \cos \omega t$

En la ecuación (3.6), el primer término es la porción que está en fase con $G'(\omega)$ representando la rigidez elástica, y el segundo término es la porción fuera de fase con $\frac{G''(\omega)}{\omega}$ representando la constante de amortiguamiento.

Si se grafica, a partir de la ecuación (3.6), el esfuerzo de cortante para la deformación de corte, se obtiene una histéresis elíptica como se muestra en la Figura 3.6, cuya área encerrada por la elipse representa la energía disipada por ciclo.

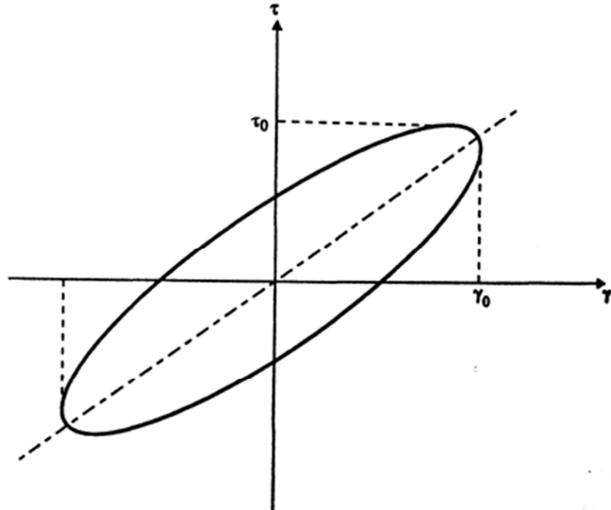


Figura 3.6 Diagrama esfuerzo vs deformación para un material viscoelástico (Soong & Dargush, 1997; Villaverde, 2008)

3.3. Comportamiento de un Disipador VE sujeto a una Fuerza Sinusoidal

Siguiendo a Lai (1996), Soong & Dargush (1997) y Villaverde (2009):

El comportamiento de un disipador viscoelástico puede ser caracterizado por el almacenamiento de rigidez k' y la pérdida de rigidez k'' que están relacionados con G' y G'' de la siguiente manera:

$$k' = \frac{G' A}{h} \quad k'' = \frac{G'' A}{h} \quad \eta = \frac{k'}{k''} \quad (3.7)$$

Donde A es el área total de corte y h es el espesor de la capa de material viscoelástico.

El coeficiente k'' también puede ser relacionado con el coeficiente de amortiguamiento del disipador c' de la siguiente manera:

$$c' = \frac{k''}{\omega} = \frac{G''A}{\omega h} \quad (3.8)$$

El factor de amortiguamiento crítico del disipador viscoelástico está expresado por:

$$\zeta' = \frac{c'}{2m\omega} = \frac{c'\omega}{2k'} \quad (3.9)$$

Substituyendo la primera ecuación de (3.7) y (3.8) en (3.9) se obtiene:

$$\zeta' = \frac{G''}{2G'} = \frac{\eta}{2} \quad (3.10)$$

3.4. Características del Módulo de Almacenamiento por cortante (G') y Módulo de Pérdida por cortante (G'')

Los dos módulos G' y G'' no solo son función de la frecuencia ω , sino también de la temperatura del medio donde se encuentre y del cambio de energía interna del material viscoelástico, y en algunos casos también depende de la deformación por cortante. (Soong & Dargush, 1997)

A partir de varios ensayos en campo y en laboratorio, Soong & Dargush (1997) llega a las siguientes conclusiones:

- La rigidez del disipador y la cantidad de energía disipada tienden a disminuir frente a un aumento de la temperatura ambiente.

En escala logarítmica, la Figura 3.7 y la Figura 3.8 muestran que el efecto del cambio de temperatura en las propiedades del disipador ocasiona un desplazamiento de las curvas de G' y G'' en un rango de frecuencia de 0.5 Hz a 8 Hz.

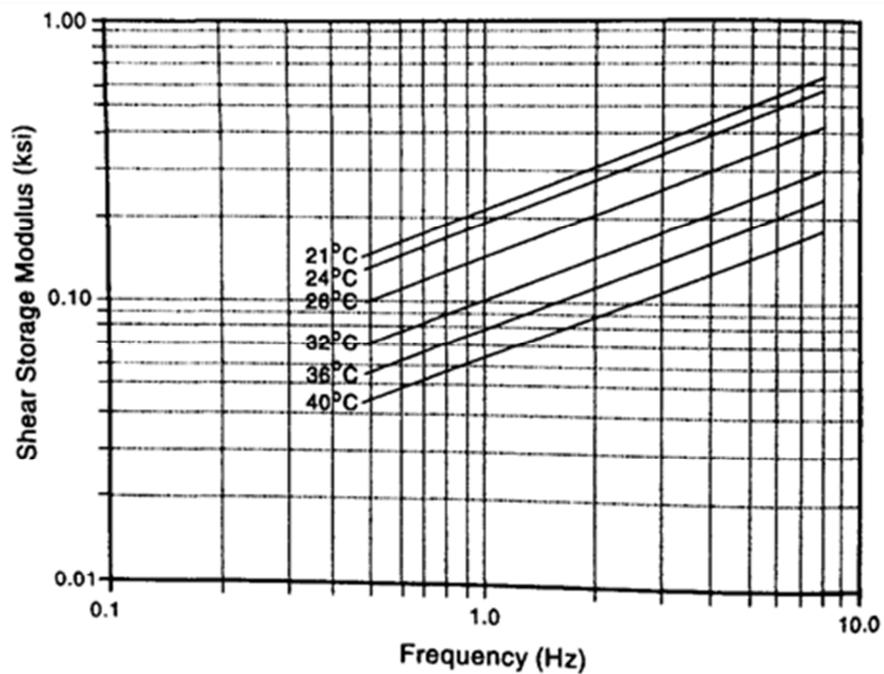


Figura 3.7 Variación aproximada del Módulo de almacenamiento de cortante G' con respecto a la frecuencia y la temperatura ambiente. Soong & Dargush (1997), Villaverde (2009)

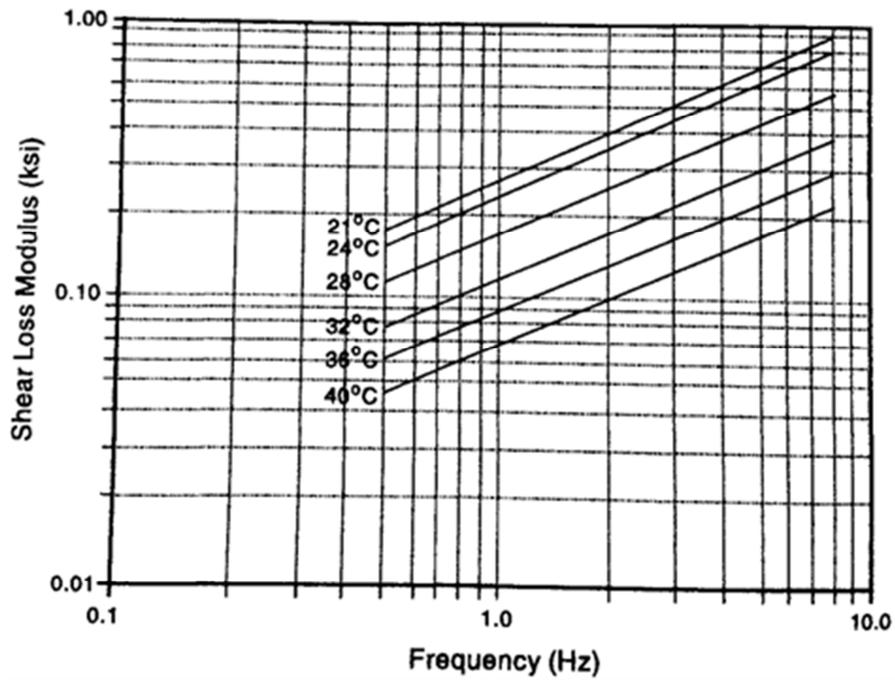


Figura 3.8 Variación aproximada del Módulo de pérdida de cortante G'' con respecto a la frecuencia y la temperatura ambiente. Soong & Dargush (1997), Villaverde (2009)

- La variación de los módulos G' y G'' con respecto a la frecuencia se comporta linealmente a una temperatura dada; siendo necesaria solo dos ensayos de disipadores a diferente frecuencia para identificar la relación lineal en un gráfico a escala logarítmica como se muestra en la Figura 3.9.

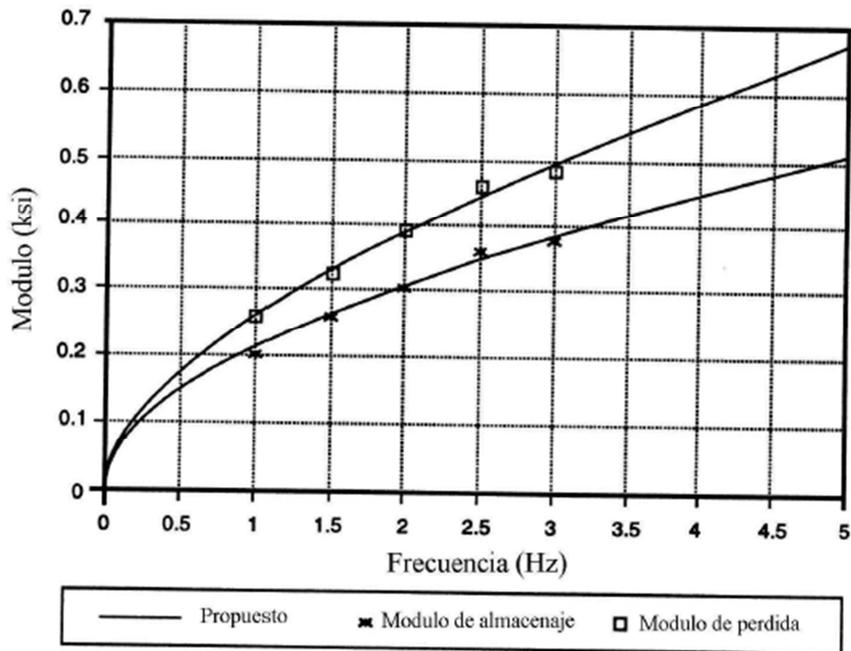


Figura 3.9 Comparación de valores del módulo de almacenamiento y pérdida por cortante calculados a partir de una ecuación con los resultados obtenidos de ensayos. (Soong & Dargush, 1997; Villarreal, 2008)

- El aumento de temperatura interna del material viscoelástico ocurre cuando la energía es disipada en forma de calor. Durante un evento sísmico, el aumento de temperatura interna es generalmente menor a 10°C y tiene un efecto despreciable en el comportamiento de los disipadores viscoelásticos.

Villaverde (2009) resume que a frecuencias altas o temperaturas bajas, el módulo de almacenamiento es grande comparado al módulo de pérdida y el material se comporta como si fuera totalmente elástico, se puede comparar su comportamiento como un material de vidrio. Asimismo, a frecuencias bajas o temperaturas elevadas, tanto el módulo de almacenamiento como el de pérdida tienen valores bajos y, por tanto el material tiene poca capacidad de disipación, se puede comparar su comportamiento como una goma. Además, el módulo de pérdida supera al módulo de almacenamiento a temperaturas y frecuencias

intermedias, logrando que la capacidad de disipación del material viscoelástico sea la más eficiente, tal como se puede apreciar en la Figura 3.7 y en la Figura 3.8.

Adicionalmente, Soong & Dargush (1997) y Villaverde (2009) indican que las propiedades del material se mantienen más o menos constantes para deformaciones unitarias por cortante menores al 20% y pueden ser considerados solo dependientes de la frecuencia de excitación y de la temperatura ambiente. Además, Villaverde (2009) menciona que los materiales viscoelásticos presentan un comportamiento lineal bajo deformaciones unitarias menores a 125%, teniendo en cuenta el aumento de temperatura. Esto significa que para deformaciones unitarias por cortante menores al 125%, el material viscoelástico regresa a su forma inicial y a sus propiedades iniciales luego de regresar a su temperatura inicial.

Por otro lado, Kelly (2001) indica que los límites de diseño están basados generalmente en una deformación unitaria del material VE de 150% para el caso de un sismo de diseño y que este límite condiciona el espesor del material viscoelástico del disipador. Por ejemplo, la deformación entre pisos dividida para 1.5 limitaría la deformación unitaria del material VE al 150%.

Chang (et al., 1996) indica que para el material viscoelástico del disipador, se exige normalmente que la deformación unitaria por cortante no sea mayor al 100%.

3.5. Análisis de Estructuras con Disipadores Viscoelásticos

Villaverde (2009) indica que se debe tomar en cuenta que si una estructura convencional que se comporta linealmente, la adición de disipadores puede causar incrementos en los factores de amortiguamiento de los diferentes modos de vibración de la estructura. Esto puede causar una redistribución de los factores de amortiguamiento entre los diferentes modos de vibración, ocasionando que algunos modos de vibración, que antes de agregar disipadores a la estructura, contribuían poco a la respuesta total del sistema; ahora, con los disipadores, contribuyan significativamente a la respuesta total.

Pero Villarreal & Dargush (2008) señalaron que en el caso de disipadores viscoelásticos, estos no cambian significativamente los periodos de vibración, con lo cual resulta posible linealizar el comportamiento estructural y realizar una modelación más sencilla. La teoría viscoelástica lineal se puede aplicar para describir el comportamiento de los disipadores.

3.6. Respuesta Sísmica de un Sistema de 1GDL Amortiguado Con Disipadores Viscoelásticos

Villaverde (2009) asume que el sistema de 1GDL está sujeto a una aceleración del terreno $\ddot{u}_g(t)$, y que el desplazamiento y velocidad inicial son iguales a cero. Tal como se ve en la Figura 3.10 se agrega un disipador en un arriostamiento diagonal al marco estructural, y por diseño se asume que la estructura se mantendrá lineal todo el tiempo.

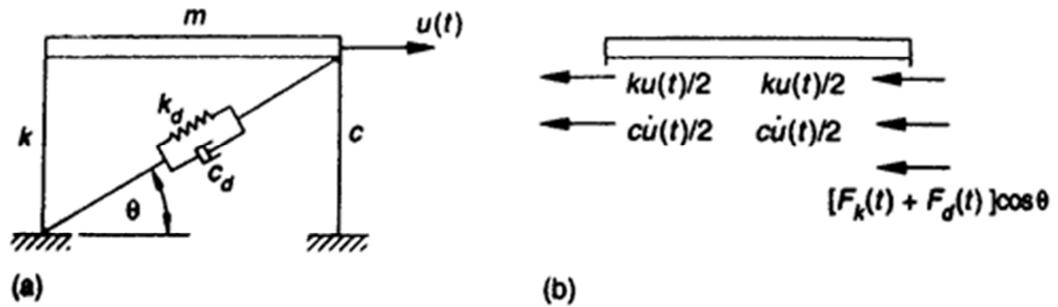


Figura 3.10 (a) Sistema de 1GDL con disipadores viscoelásticos; (b) Diagrama de cuerpo libre (Villaverde, 2009)

La ecuación de movimiento con los disipadores agregados es:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) + [F_k(t) + F_d(t)] \cos \theta = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3.11)$$

Donde $F_k(t)$ y $F_d(t)$ representan la componente de rigidez elástica y de amortiguamiento de la fuerza del disipador, respectivamente; y θ es el ángulo de inclinación del arriostamiento donde el disipador es instalado con respecto a la horizontal.

En el caso de disipadores viscoelásticos:

$$F_k(t) = k'u(t) \cos \theta \quad (3.12)$$

$$F_d(t) = c'\dot{u}(t) \cos \theta \quad (3.13)$$

Reemplazando (3.12) y (3.13) en (3.11):

$$m\ddot{u}(t) + \bar{c}\dot{u}(t) + \bar{k}u(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (3.14)$$

Donde \bar{c} y \bar{k} representan las constantes de amortiguamiento y rigidez del sistema con los disipadores viscoelásticos incluidos, respectivamente; siendo:

$$\bar{c} = c + c' \cos^2 \theta \quad (3.15)$$

$$\bar{k} = k + k' \cos^2 \theta \quad (3.16)$$

3.7. Consideraciones de Diseño Estructural con Disipadores Viscoelásticos

Soong & Dargush (1997) indica que el diseño consiste en un proceso interactivo cuyos pasos son:

1. El análisis y diseño de la estructura sin considerar disipadores VE.
2. Determinar el factor de amortiguamiento que se necesite.
3. Seleccionar la ubicación disponible para los disipadores VE.
4. Diseño de disipadores VE.
5. Calcular el factor de amortiguamiento crítico equivalente del sistema estructural con disipadores viscoelásticos.
6. Efectuar un análisis dinámico de la estructura usando el factor de amortiguamiento crítico de diseño.

Si al realizar el quinto y sexto paso, se llega a los objetivos de análisis y diseño propuestos, entonces el diseño se considera completo. De lo contrario, un nuevo ciclo de diseño se debe ejecutar lo que puede originar nuevas propiedades estructurales, ubicación de disipadores, etc. Hay que tener en cuenta que luego de cada proceso interactivo de diseño, las propiedades estructurales deben ser actualizadas. En la Figura 3.11 se muestra un diagrama de flujo que refleja un resumen de los pasos del proceso de diseño.

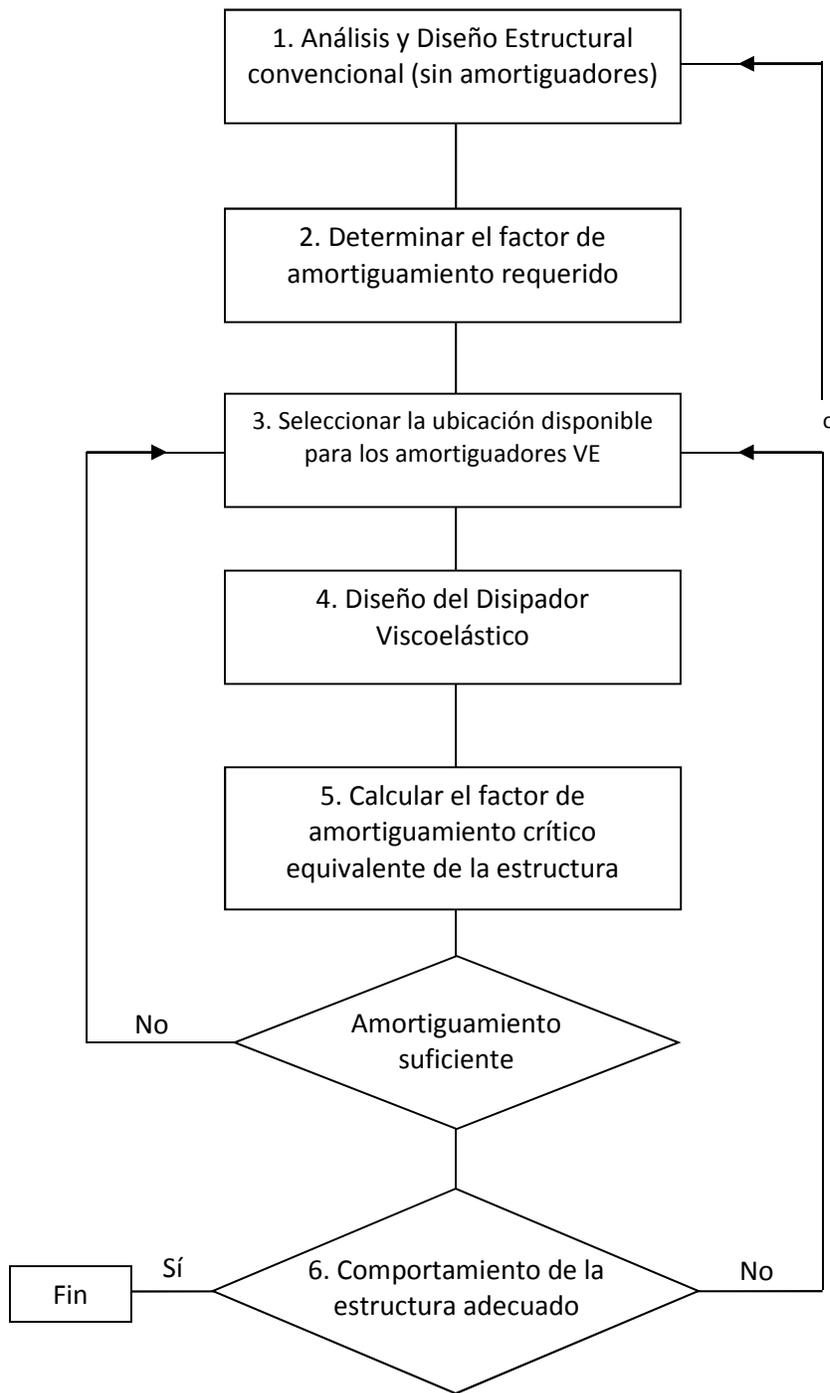


Figura 3.11 Diagrama de Flujo del proceso de diseño estructural con disipadores VE (Soong & Dargush, 1997)

A partir de Villarreal & Oviedo (2008) y Villaverde (2009) se desarrolla cada paso del proceso de diseño basado en el comportamiento de un sistema de 1GDL con disipadores viscoelásticos sujetos a un evento sísmico:

1. *El análisis y diseño de la estructura sin considerar disipadores VE.* De esta manera, se determinan las propiedades estructurales y comportamiento dinámico de la misma. Se calcula las derivas entre pisos.
2. *Determinar el factor de amortiguamiento equivalente necesario.* Se lo puede conseguir del espectro de respuesta que haya sido usado en el primer paso descrito.
3. *Seleccionar la ubicación disponible para los disipadores VE.* Los disipadores pueden ser ubicados en cualquier lugar disponible donde sea posible que deformaciones por cortante ocurran en los disipadores VE. Generalmente son ubicados como arriostramientos diagonales.
4. *Diseño de disipadores VE.* La constante de rigidez del disipador puede ser calculada a partir de la ecuación (Soong & Dargush, 1997, pag. 156):

$$k' = \frac{2\zeta}{\eta - 2\zeta} k \quad (3.17)$$

Donde ζ es el factor de amortiguamiento adicional necesario, k' es la rigidez del disipador VE; k es la rigidez de la estructura sin disipadores VE, y η es el factor de pérdida del disipador VE.

El coeficiente de amortiguamiento viscoso del disipador se lo calcula a partir de la ecuación (3.8):

$$c' = \frac{G''A}{(2\pi/T)h} \quad (3.18)$$

Las propiedades mecánicas (G' y G'') pueden ser obtenidas a partir de la Figura 3.7 y la Figura 3.8.

El espesor h del material VE en el disipador (suma de todas las capas) puede ser determinado a partir de la máxima deriva entre pisos permitida en la estructura y la máxima deformación unitaria del material VE.

El área necesaria A de material VE es:

$$A = \frac{k'h}{G'} \quad (3.19)$$

5. *Calcular el factor de amortiguamiento crítico equivalente del sistema estructural con disipadores viscoelásticos.* Se calcula primero los coeficientes de rigidez \bar{k} y amortiguamiento \bar{c} del sistema estructural modificado a partir de la ecuación (3.15) y (3.16). Luego se calcula el factor de amortiguamiento crítico equivalente del sistema modificado:

$$\bar{\zeta} = \frac{\bar{c}}{2\sqrt{\bar{k}m}} \quad (3.20)$$

6. *Efectuar un análisis dinámico de la estructura usando el factor de amortiguamiento crítico de diseño.*

3.8. Ejercicio de Aplicación

El ejemplo está basado en un ejercicio resuelto por Villarreal (2009). Considere que el sistema de 1GDL de la Figura 3.12, será reforzado con un disipador viscoelástico para mejorar su respuesta sísmica. El sistema original tiene una masa de $1 \text{ k s}^2/\text{in}$, un periodo natural no amortiguado de 0.333 s , y un factor de amortiguamiento crítico de 2% . Se requiere aumentar el amortiguamiento total del sistema al 20% . El disipador empleado será fabricado con dos capas de material VE. Para propósitos de diseño asumir que el sistema estará a una temperatura ambiente de 21°C y que la fuerza sísmica tendrá una frecuencia dominante de 3 Hz . Asumir también que las capas de material VE se comportarán linealmente todo el tiempo. Determinar la respuesta del sistema con y sin disipadores viscoelásticos.

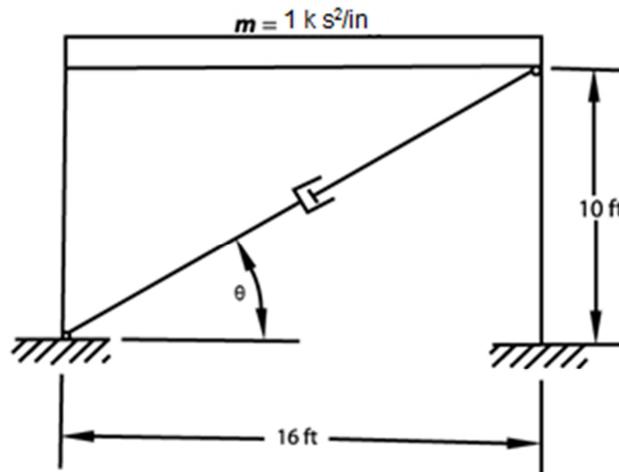


Figura 3.12. Sistema estructural considerado en Ejercicio de Aplicación

Solución:

Se calcula primero la rigidez y el coeficiente de amortiguamiento del sistema original:

$$k = \omega^2 m = \left(\frac{2\pi}{0.333} \right)^2 (1) = 356 \text{ kip/in}$$
$$c = 2\zeta\omega m = 2(0.02)(18.868)(1) = 0.755 \text{ kip s/in}$$

A partir de la geometría del sistema:

$$\theta = \tan^{-1}(10/16) = 32^\circ$$

PROPIEDADES DEL DISIPADOR VISCOELÁSTICO

A partir de la

Figura 3.7 y la Figura 3.8 se obtiene los módulos:

$$G' = 0.35 \text{ kip/in}^2 \quad G'' = 0.50 \text{ kip/in}^2$$

El factor de pérdida:

$$\eta = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)} = \frac{0.5}{0.35} = 1.43$$

La rigidez del disipador se calcula a partir de la ecuación (3.17). Se considera un amortiguamiento adicional igual al total requerido de 20%, puesto que el amortiguamiento inicial del sistema es pequeño (2%) y se conoce que los factores de amortiguamiento no se adicionan directamente, sino que dependen del comportamiento total del sistema.

$$k' = \frac{2\zeta}{\eta - 2\zeta} k = \frac{2(0.2)}{1.43 - 2(0.2)} (356) = 138.25 \text{ kip/in}$$

Se considera que las dos capas de material VE tienen 0.4 in de espesor cada una. Resultando: $h = 2 \times 0.4 = 0.8 \text{ in}$

El área de necesaria de las capas de material VE se calcula:

$$A = \frac{k'h}{G'} = \frac{138.25 \times 0.8}{0.35} = 316 \text{ in}^2$$

Con el valor del área conocida, se calcula el coeficiente de amortiguamiento del disipador:

$$c' = \frac{G''A}{\left(\frac{2\pi}{T}\right)h} = \frac{0.50 \times 316}{\left(\frac{2\pi}{0.333}\right)(0.8)} = 10.47 \text{ kip s/in}$$

Se procede a calcular el coeficiente de rigidez y constante de amortiguamiento del sistema con disipadores viscoelásticos incluidos:

$$\bar{k} = k + k' c \text{ s}^2 \theta = 356 + 138.25 c \text{ s}^2 \theta = 455.43 \text{ kip/in}$$

$$\bar{c} = c + c' c \text{ s}^2 \theta = 0.755 + 10.47 c \text{ s}^2 \theta = 8.28 \text{ kip s/in}$$

El nuevo periodo y factor de amortiguamiento crítico equivalente del sistema estructural con disipadores VE:

$$\bar{T} = 2\pi \sqrt{m/\bar{k}} = 2\pi \sqrt{1/455.43} = 0.294 \text{ s}$$

$$\bar{\zeta} = \frac{\bar{c}}{2\sqrt{\bar{k}m}} = \frac{8.28}{2\sqrt{455.43(1)}} = 0.194 = 19.4\% \approx 20\%$$

Las respuestas del sistema convencional y con disipadores viscoelásticos obtenidos a partir de los espectros de diseño inelástico de la Figura 3.13, se observan en la Tabla 3.1.

Respuesta	Con Disipadores	Sin Disipadores	Factor de Reducción
Aceleración (g)	0.26	0.65	0.40
Velocidad (in/s)	4.6	13.5	0.34
Desplazamiento (in)	0.22	0.68	0.32

Tabla 3.1 Resultados de sistema de 1GDL con disipadores y sin disipadores

La aceleración, velocidad y desplazamiento pico del sistema usando disipadores viscoelástico disminuyeron significativamente, alrededor de un 65%. Además hay que tener en cuenta que el aumento de rigidez debido al disipador disminuyó el periodo de vibración del sistema y de esta manera contribuyó también a disminuir las respuestas del sistema.

La Figura 3.13 muestra dos espectros de diseño elásticos y dos espectros de diseño inelástico, tanto de aceleración, velocidad y desplazamiento, realizados por el Método de Newmark (Soong & Dargush, 1997; Villaverde, 2009)

Los espectros elásticos fueron realizados con las siguientes condiciones de excitación del suelo:

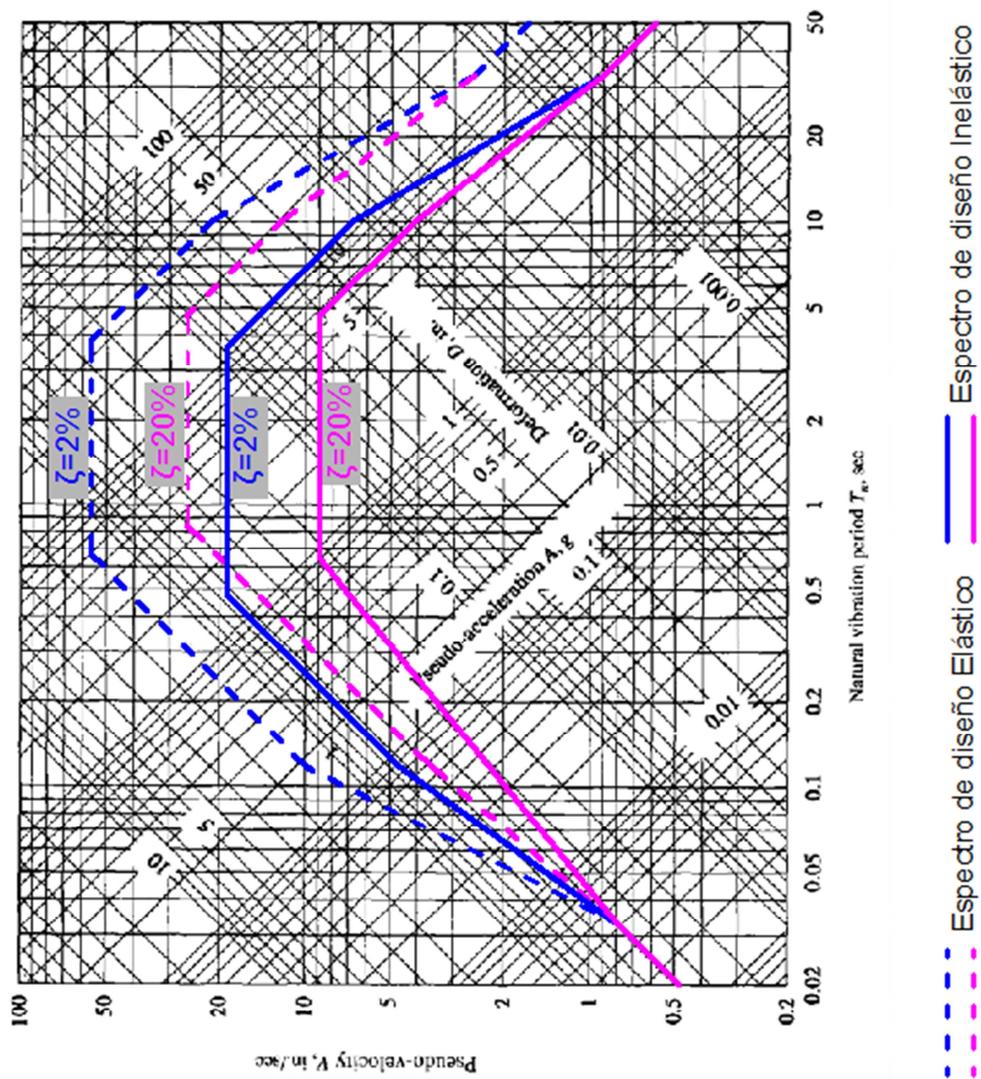
Aceleración: $a_{max} = 0.4g$

Velocidad: $v_{max} = 19.2 \text{ in/s}$

Desplazamiento: $d_{max} = 14.31 \text{ in}$

Factor de amortiguamiento: 2% y 20%

En este caso, el diseño de los espectros inelásticos usaron un factor de reducción $R=3$.



*PLANO DE CUATRO DIRECCIONES A ESCALA LOGARÍTMICA (Chopra, 2001)

Figura 3.13 Espectros de diseño elásticos e inelásticos usando el Método de Newmark

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y DISEÑO DEL PÓRTICO DE ACERO

4.1. Introducción

La estructura será estudiada a partir de un análisis lineal usando Espectro de Diseño en el programa de elementos finitos SAP2000 15.1.0, para poder determinar las fuerzas internas en los elementos, las deformaciones y derivas entre pisos y luego proceder al diseño del pórtico estructural.

4.2. Normas y Códigos utilizados

Para el diseño estructural de los elementos de acero se utilizó:

- AISC 360-05 / LRFD: Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction. Load and Resistance Factor Design.
- AISC 341-05: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction.

Para la aplicación de las cargas incluyendo la carga sísmica se utilizó:

- NEC-11: Capítulo 1. Cargas y Materiales – Norma Ecuatoriana de la Construcción
- NEC-11: Capítulo 2. Peligro Sísmico y Requisitos de Diseño Sismo Resistente – Norma Ecuatoriana de la Construcción

- ASCE 7-05: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures – American Society of Civil Engineers.

4.3. Características del pórtico

4.3.1. Dimensiones

El pórtico de acero que se va a estudiar consiste en una estructura, en dos dimensiones de ocho pisos con cinco luces o vanos para cada piso.

El desnivel entre la planta baja y el primer piso alto es de 4 metros. Los demás pisos tienen un desnivel igual a 3 metros. De esta manera la altura total del pórtico es 25 metros. La distancia entre columnas es de 6 metros para todas las luces, haciendo que la longitud total de la estructura sea de 30 metros.

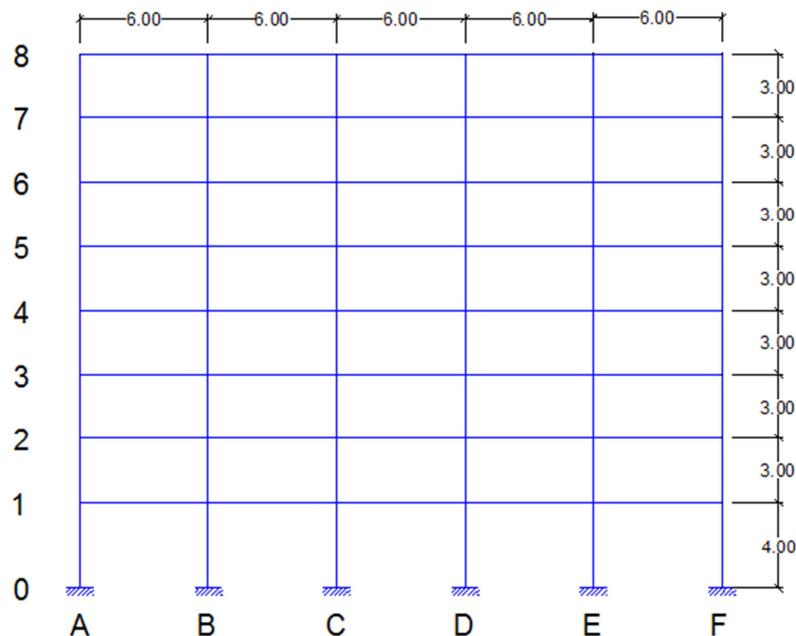


Figura 4.1 Dimensiones del pórtico a diseñar (metros)

4.3.2. Materiales

La estructura fue analizada y diseñada considerando un acero tipo A572Gr50 para todos los elementos estructurales, cuyas características principales son:

Módulo de Elasticidad: $E = 29000 \text{ ksi}$

Módulo de Cortante: $G = 11153.85 \text{ ksi}$

Esfuerzo de Fluencia: $F_y = 50 \text{ ksi}$

Esfuerzo Último (Resistencia a la tensión): $F_u = 65 \text{ ksi}$

4.4. Estados de Carga

4.4.1. Carga Muerta (DL)

- Peso propio de los elementos estructurales principales (vigas y columnas).
- Carga muerta adicional de 746 Kg/m^2 :

Para el cálculo de la carga muerta adicional se va a asumir que las vigas del pórtico reciben una losa nervada y que el ancho de influencia de cada viga es de 6 metros. La carga muerta adicional se describe en la Tabla 4.1.

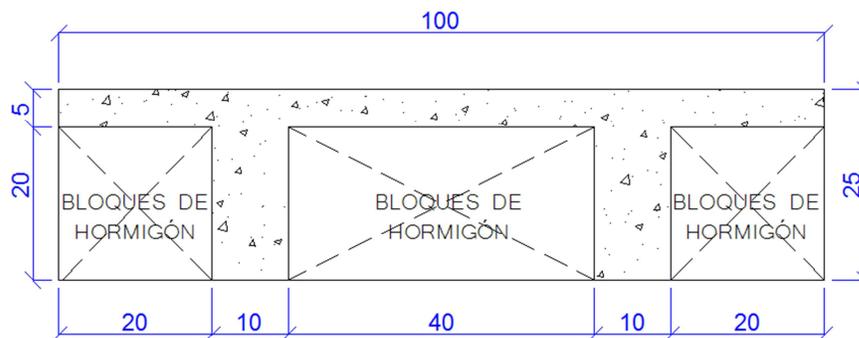


Figura 4.2 Dimensiones de losa nervada

ELEMENTO	CARGA (Kg/m ²)
Losa Nervada	216
Cajoneta con bloques de hormigón	200
Instalaciones eléctricas y sanitarias	50
Tumbado	20
Baldosa cerámica + mortero	110
Paredes de mampostería	150
TOTAL	746

Tabla 4.1 Cálculo de carga muerta adicional

La carga muerta adicional que se coloca en las vigas será distribuida por metro lineal en el modelo de SAP2000:

$$DL = 6m \times 746Kg/m^2 = 4476Kg/m = 4.48Ton/m$$

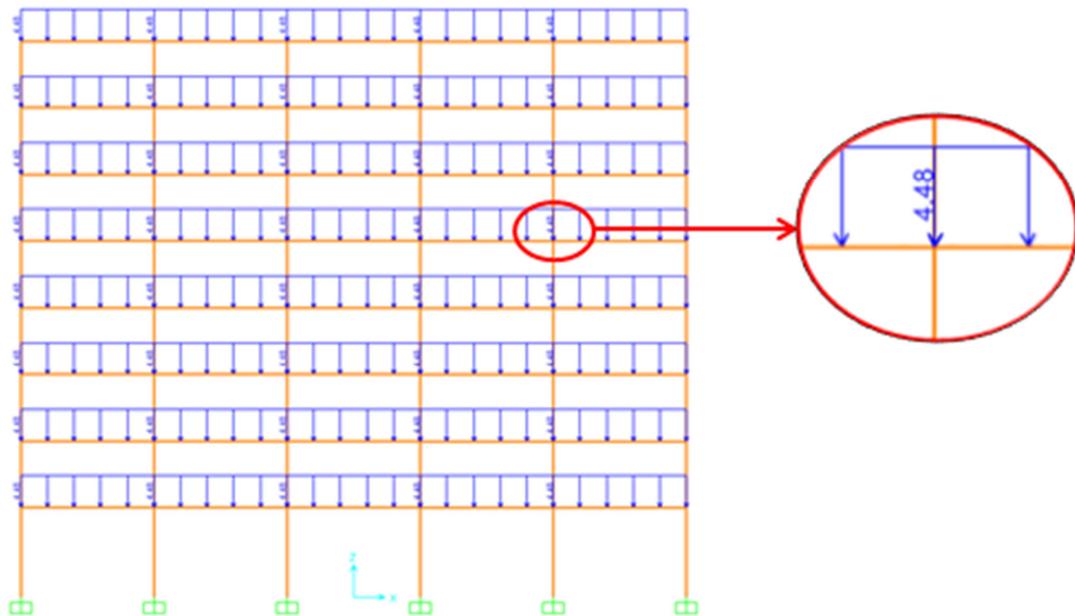


Figura 4.3 Carga muerta DL asignada al modelo en SAP2000 (4.48 Ton/m)

4.4.2. Carga Viva (LL)

El pórtico es considerado para uso de oficinas. De acuerdo al NEC-11, Capítulo 1 Cargas y Materiales, la sobrecarga debida a dicha ocupación es igual a 240 Kg/m^2 . La carga viva que se coloca en las vigas es distribuida por metro lineal en el modelo de SAP2000:

$$LL = 6m \times 240\text{Kg/m}^2 = 1440\text{Kg/m} = 1.44\text{Ton/m}$$

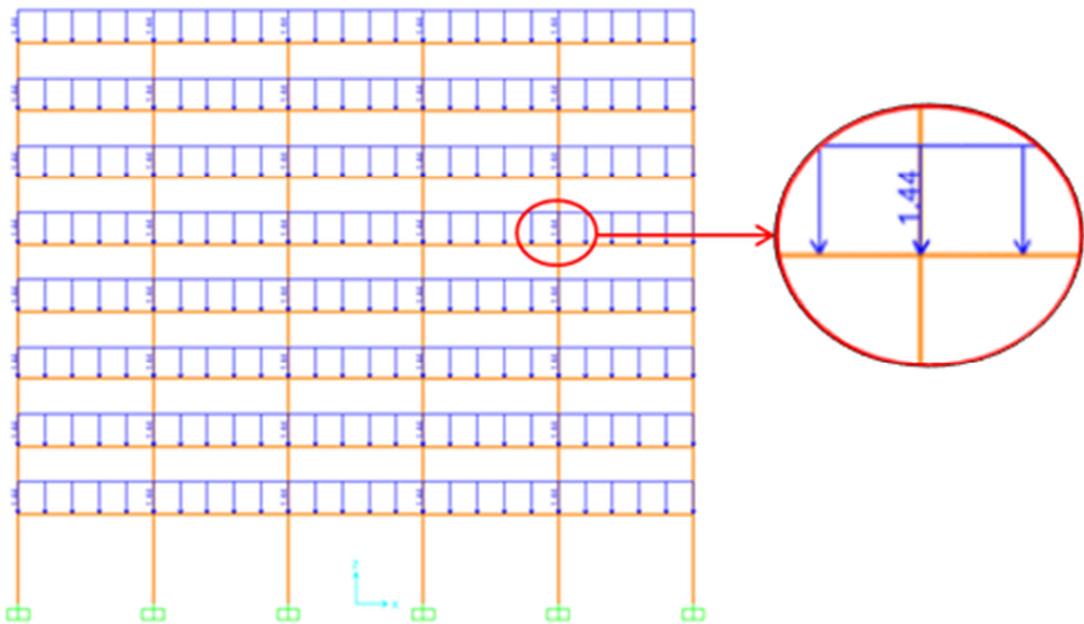


Figura 4.4 Carga viva LL asignada al modelo en SAP2000 (1.44 Ton/m)

4.4.3. Carga Sísmica (EX)

A partir del NEC-11, se ha diseñado un espectro de diseño de aceleraciones para analizar el comportamiento dinámico del pórtico frente a un evento sísmico. El espectro de diseño usado es inelástico y fue elaborado a partir de las siguientes condiciones:

a. El NEC-11 ubica a la ciudad de Guayaquil en la Zona Sísmica V, que tiene un factor $Z=0.4$ e indica una caracterización de amenaza sísmica alta.

b. El tipo de perfil de suelo considerado es E, que representa un suelo blando que es el que se encuentra en gran parte de la ciudad de Guayaquil, y resulta crítico frente a un evento sísmico. El perfil tipo E presenta las siguientes características:

- Factor de sitio, $F_a = 1.15$
- Factor de sitio, $F_d = 1.60$
- Factor de comportamiento no lineal del suelo, $F_s = 1.9$
- $r = 1.5$
- $\eta = 1.8$ (para toda la Costa, excepto Esmeraldas)

c. Parámetros de diseño:

- Factor de Importancia, $I = 1$
- Coeficiente de Reducción de Resistencia Sísmica, $R = 3$
- Factor de irregularidad en elevación, $\phi_e = 1.00$
- Factor de irregularidad en planta, $\phi_p = 1.00$

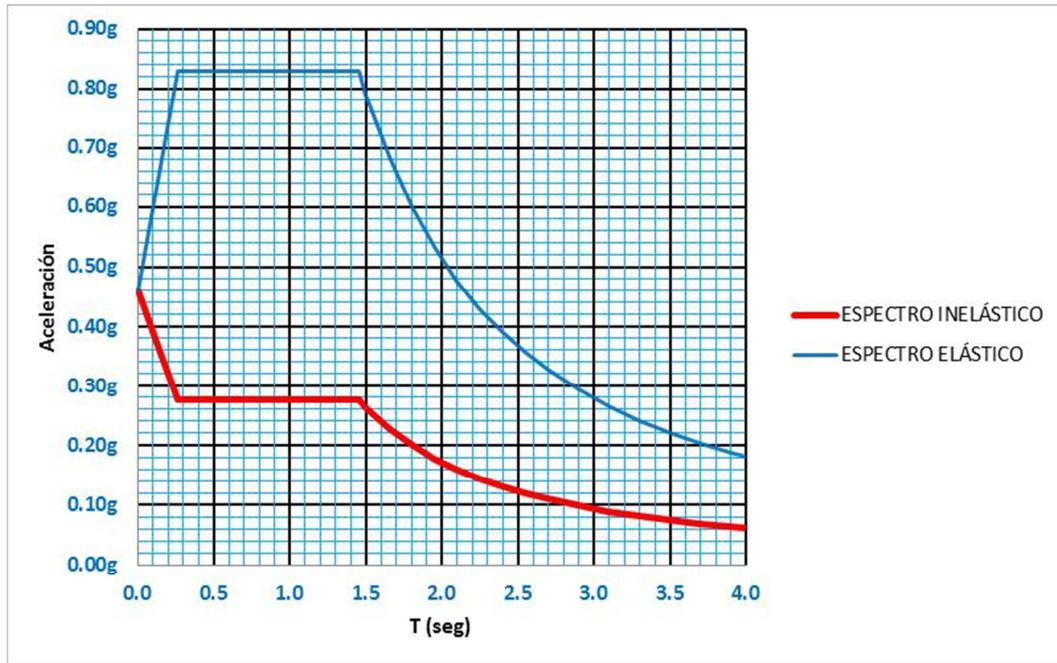


Figura 4.5 Espectro Elástico e Inelástico ($I=1$, $R=3$) de aceleraciones $Z=0.4$, Suelo Tipo E

4.5. Combinaciones de carga

Las combinaciones de carga para el diseño del pórtico estructural se tomaron de acuerdo a las recomendaciones del NEC-11, ASCE 7-05 y AISC. Para el cálculo de deformaciones se usó una combinación de servicio de acuerdo al ASCE 7-05, y para el cálculo de derivas entre piso se usó la deformación producida por la carga sísmica Ex. En la Tabla 4.2 se detalla las combinaciones de carga usadas.

		DL	LL	Ex
DISEÑO	COMBO 1	1.40		
	COMBO 2	1.20	1.60	
	COMBO 3	1.20	0.50	1.00
	COMBO 4	0.90		1.00
	ENV	COMB 1, COMB 2, COMB 3, COMB 4		
SERVICIO	COMBO 5	1.00	1.00	

Tabla 4.2 Combinaciones de Carga

4.6. Análisis y Diseño estructural en el programa SAP2000

4.6.1. Consideraciones en el modelo en SAP2000

Se realizó el marco estructural con las dimensiones detalladas anteriormente. Las vigas y columnas fueron modeladas como elementos tipo *Frame*, ya que son elementos cuya longitud es mucho mayor a su respectiva sección transversal.

Las conexiones entre vigas y columnas se consideran rígidas, y las columnas en la base se consideran empotradas al suelo para simular la cimentación.

En cada nivel del pórtico se colocaron diafragmas rígidos en el plano horizontal para que se cumpla la homogeneidad de desplazamientos de los nudos por piso.

Se considera un factor de amortiguamiento crítico equivalente de la estructura de acero de 2%.

4.6.2. Perfiles de acero de los elementos estructurales

A partir de la norma NEC-11 y la norma LRFD del AISC 360-05, se realizó el prediseño y diseño de las vigas y columnas de acero tipo A572Gr50. Los tipos de perfiles usados son tipo W y fueron asignados en el programa SAP2000 a cada elemento de la estructura. Se describe a continuación la asignación de perfil para cada viga y columna del pórtico estructural:

PERFILES W			
PISO	ELEMENTOS		
	VIGAS	COLUMNAS INTERIORES	COLUMNAS DE BORDE
8	W18X46	W27X102	W24X94
7	W18X46	W27X102	W24X94
6	W18X71	W27X146	W24X131
5	W18X71	W27X146	W24X131
4	W18X71	W27X146	W24X131
3	W21X83	W27X217	W24X146
2	W21X83	W27X217	W24X146
1	W21X83	W27X217	W24X146

Tabla 4.3 Perfiles de acero de vigas y columnas

Las propiedades de cada perfil se pueden observar en Anexo 2.

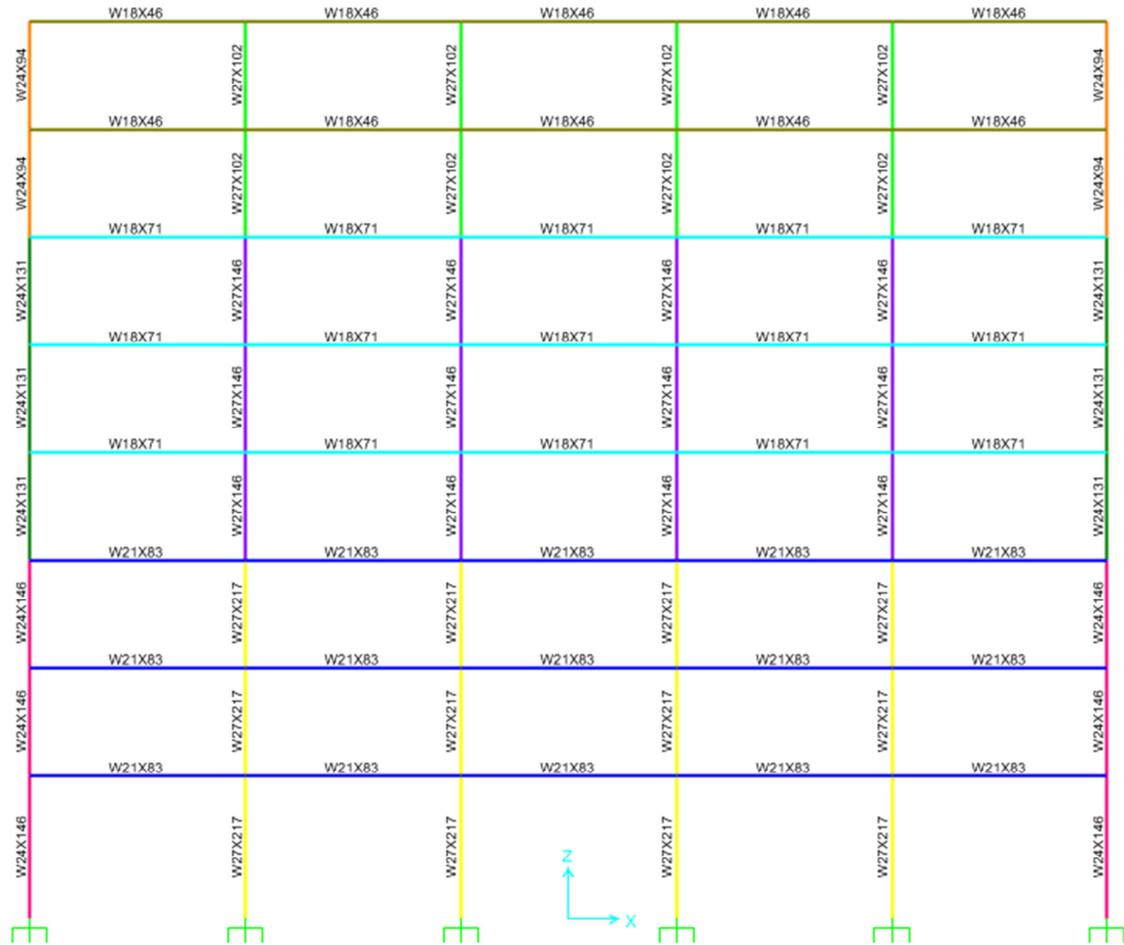


Figura 4.6 Estructura en SAP2000 con sus respectivos perfiles

4.6.3. Análisis Modal

De acuerdo al NEC-11, al definir la masa participativa se considera la suma de:

- 100% de la carga muerta
- 25% de la carga viva

El NEC-11 indica que se deben considerar en el análisis todos los modos de vibración que contribuyan significativamente a la respuesta total de la

estructura, de tal manera que la masa modal acumulada sea por lo menos el 90% de la masa participativa total en las direcciones horizontales principales. En este proyecto, se considera la masa participativa en la dirección horizontal X.

Considerando el parámetro descrito, se calcula los primeros modos de vibración con sus respectivos periodos de vibración con el análisis modal que se realiza en SAP2000. Se escogió 12 modos de vibración libre de la estructura.

Modo de vibración	Período seg.	Masa X	Masa X acumulada
1	1.3107	0.7768	0.7768
2	0.4480	0.1316	0.9084
3	0.2410	0.0476	0.9560
4	0.1470	0.0233	0.9792
5	0.1415	0.0000	0.9792
6	0.1382	0.0000	0.9793
7	0.1338	0.0000	0.9793
8	0.1299	0.0000	0.9793
9	0.1121	0.0000	0.9793
10	0.1120	0.0000	0.9793
11	0.1013	0.0116	0.9909
12	0.0763	0.0053	0.9962

Tabla 4.4 Masa modal acumulada en dirección X

4.6.4. Deformaciones laterales y Revisión de derivas inelásticas

Se obtienen las deformaciones laterales originadas por la carga sísmica E_x , y la revisión de derivas inelásticas entre piso se las realiza según los límites del NEC-11 (Cap. 2, pag. 47) que indica que en estructuras metálicas la deriva inelástica Δ_M debe ser menor a 0.02 (2%) y tiene que ser calculada a partir de la ecuación 2-29 del NEC-11 (NEC-11, Cap. 2, p. 64):

$$\Delta_M = 0.75 \times R \times \Delta_E$$

Donde $R=3$ es el factor de reducción de resistencia sísmica, y Δ_E es la deriva elástica que se la define como la razón entre el desplazamiento relativo en el entrepiso considerado, obtenido por medio de un análisis elástico de la estructura y la altura del mismo entrepiso de estudio.

NIVEL	Deformación X (cm)	h (cm)	0.75R	Δ_M	< 2%
8	16.11	300.00	2.25	1.06%	OK
7	14.69	300.00	2.25	1.41%	OK
6	12.82	300.00	2.25	1.60%	OK
5	10.69	300.00	2.25	1.80%	OK
4	8.28	300.00	2.25	1.81%	OK
3	5.87	300.00	2.25	1.62%	OK
2	3.71	300.00	2.25	1.51%	OK
1	1.69	400.00	2.25	0.95%	OK
PB	0.00				

Tabla 4.5 Deformaciones laterales y Revisión de derivas inelásticas

4.6.5. Revisión del Diseño estructural

El diseño de los elementos fue comprobado con la opción de SAP2000, *Start Design/Check of Structure* con el código de diseño AISC 360-05/IBC2006 método LRFD. Para la revisión del diseño de la estructura se consideran los resultados obtenidos del análisis de todos los estados y combinaciones de cargas, basándose en los valores críticos para flexión, cortante y fuerza axial. Estas fuerzas internas se comparan con las fuerzas resistentes de los elementos que componen el pórtico para poder determinar si son adecuados.

Dos factores importantes que se pueden obtener de la revisión de diseño para el caso de un pórtico diseñado como sismo resistente en SAP2000 son:

- a. En vigas y columnas se realiza la revisión de la relación Demanda/Resistencia basada en un análisis PMM (P-M2-M3, comportamiento fuerza axial / momento biaxial) es considerado uno de los más críticos, y deber ser menor a 1, para considerar correcto su diseño.
- b. Un parámetro importante que el programa SAP2000 revisa en las columnas, es la relación capacidad viga/columna (CBC Ratio) que debe ser menor a 1.

El diseño resulta satisfactorio. Ningún elemento superó la unidad en ningún parámetro de diseño, como se muestra en la Figura 4.7. En la Tabla A4.1 del Anexo 4, se pueden observar los factores críticos para cada elemento estructural, ya que algunas veces la revisión del factor de CBC en las columnas resulta más crítico que la revisión de PMM.

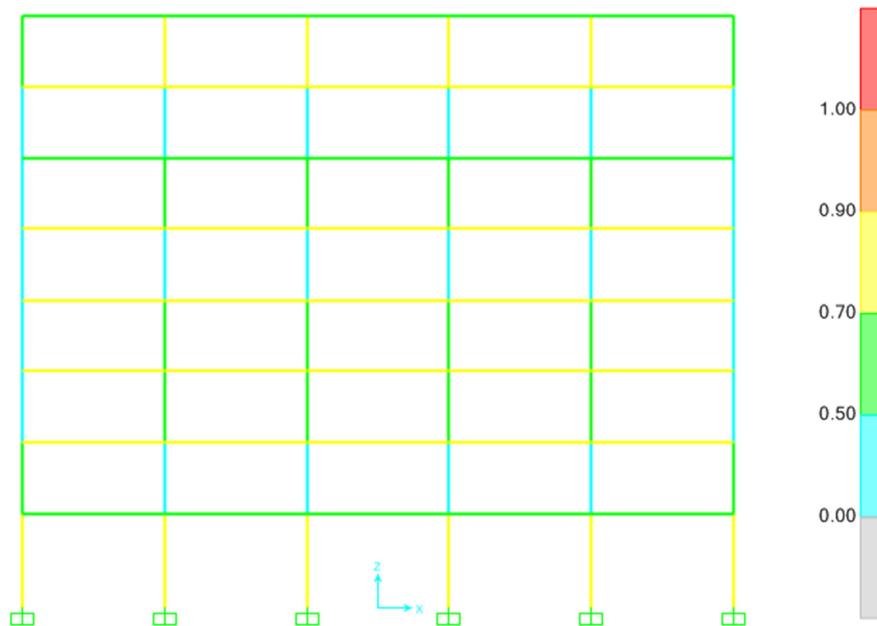


Figura 4.7 Resultados de la Revisión de Diseño estructural del pórtico en SAP2000

A continuación se detalla únicamente la revisión PMM Demanda/Resistencia de los elementos más representativos en la Tabla 4.6 y en la Tabla 4.7. Esto será de importancia para una posterior comparación con la estructura con disipadores viscoelásticos. El factor Demanda/Resistencia por revisión PMM de todos los elementos se encuentra en el Anexo 4.

EJE	*NIVEL	Elemento	Perfil	Factor	Tipo de Revisión
A	1	COL	W24X146	0.80	PMM
A	4	COL	W24X131	0.47	PMM
A	7	COL	W24X94	0.30	PMM
B	1	COL	W27X217	0.73	PMM
B	4	COL	W27X146	0.52	PMM
B	7	COL	W27X102	0.33	PMM

*NIVEL: se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado

Tabla 4.6 Resultados de revisión de diseño PMM de las columnas del pórtico

*EJE	NIVEL	Elemento	Perfil	Factor	Tipo de Revisión
A	1	VIGA	W21X83	0.65	PMM
C	2	VIGA	W21X83	0.73	PMM
E	3	VIGA	W21X83	0.76	PMM
A	4	VIGA	W18X71	0.81	PMM
E	5	VIGA	W18X71	0.77	PMM
E	6	VIGA	W18X71	0.69	PMM
A	7	VIGA	W18X46	0.72	PMM
A	8	VIGA	W18X46	0.57	PMM
*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado					

Tabla 4.7 Resultados de revisión de diseño PMM de las vigas del pórtico

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS Y DISEÑO DEL PÓRTICO DE ACERO CON DISIPADORES VISCOELÁSTICOS

5.1. Introducción

Con el uso de disipadores viscoelásticos (DVE) se busca aumentar el factor de amortiguamiento crítico equivalente del pórtico diseñado en el Capítulo 4 alrededor del 20%. Primero se diseña los disipadores que serán colocados en el pórtico. Luego se va a efectuar un análisis estructural del pórtico anterior con los disipadores VE en el programa de elementos finitos SAP2000 15.1.0, para poder observar y comparar los efectos que provoca el disipador viscoelástico en las fuerzas internas de los elementos estructurales, en las deformaciones y en las derivas entre pisos.

5.2. Diseño de los Disipadores Viscoelásticos

Para el diseño de los disipadores viscoelásticos seguimos los pasos que se explican en el subcapítulo 3.7. y en el ejercicio de aplicación del subcapítulo 3.8.

El programa SAP2000 permite modelar los disipadores viscoelásticos como elementos tipo *Link*. Esta opción nos permite ingresar características lineales y no lineales de los disipadores. Tal como se mencionó en el subcapítulo 3.5, Villarreal & Dargush (2008) nos permite considerar la teoría viscoelástica lineal para describir el comportamiento de los disipadores.

Las características lineales que son necesarias para modelar el disipador viscoelástico son el coeficiente de rigidez efectivo k' y el coeficiente de amortiguamiento viscoso del disipador c' , que el programa SAP2000 lo reconoce como coeficiente de amortiguamiento efectivo.

El programa permite ingresar valores de k' y c' , para los seis posibles grados de libertad que posee un nudo. En este estudio, se considera que el objetivo del disipador viscoelástico es trabajar con las fuerzas laterales que se producen por la acción de un sismo, por tanto, las propiedades de rigidez y amortiguamiento serán asignados en dirección x.

Propiedades del Pórtico convencional

El periodo T del primer modo de vibración del pórtico convencional es igual a 1.3107 seg. Por tanto la frecuencia es:

$$\omega = \frac{2\pi}{1.3107} = 4.794 \text{ rad/seg}$$

El peso de toda la estructura es 1133.79 Ton. La masa es de:

$$m = 115.575 \text{ Ton s}^2/m$$

El factor de amortiguamiento crítico del pórtico convencional es:

$$\zeta = 0.02$$

Se calcula primero la rigidez y el coeficiente de amortiguamiento del pórtico convencional:

$$k = \omega^2 m = (4.794)^2 (115.575) = 2655.94 \text{ Ton/m}$$
$$c = 2\zeta \omega m = 2(0.02)(4.794)(115.575) = 22.16 \text{ Ton s/m}$$

A partir de la geometría del pórtico, una diagonal entre los vanos tendría un ángulo igual a:

$$\theta = \tan^{-1}(3/6) = 26.565^\circ$$

Propiedades del Disipador Viscoelástico

A partir de la Figura 3.7 y la Figura 3.8 se obtiene los módulos almacenamiento y pérdida por cortante. Se los determina para una temperatura promedio de Guayaquil de 26°C y una frecuencia dominante de $1/1.3107 = 0.76 \text{ Hz}$. Los valores hallados son:

$$G' = 0.15 \text{ ksi} = 105.68 \text{ Ton/m}^2 \quad G'' = 0.18 \text{ ksi} = 126.82 \text{ Ton/m}^2$$

El factor de pérdida:

$$\eta = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)} = \frac{0.18}{0.15} = 1.20$$

La rigidez del disipador se calcula a partir de la ecuación (3.17). Se considera un amortiguamiento adicional igual al total requerido de 20%.

$$k' = \frac{2\zeta}{\eta - 2\zeta} k = \frac{2(0.2)}{1.2 - 2(0.2)} (2655.94) = 1327.97 \text{ Ton/m}$$

Se considera que las dos capas de material VE tienen 2 cm de espesor cada una. Resultando: $h = 2 \times 0.02 \text{ m} = 0.04 \text{ m}$

El área de necesaria de las capas de material VE se calcula:

$$A = \frac{k'h}{G'} = \frac{1327.97 \times 0.04}{105.68} = 0.5026 \text{ m}^2 = 5026 \text{ cm}^2$$

Con el valor del área conocida, se calcula el coeficiente de amortiguamiento del disipador:

$$c' = \frac{G'' A}{\omega h} = \frac{126.82 \times 0.5026}{4.794(0.04)} = 332.42 \text{ Ton s/m}$$

Los disipadores que se van a modelar serán ubicados de forma diagonal entre los vanos del pórtico. De esta manera, los valores que definen a los dos coeficientes lineales del disipador en dirección x se los calcula a partir del segundo término de las ecuaciones 3.15 y 3.16:

$$k'_x = k' c^2 \theta = 1327.97 c^2 \theta = 1062.38 \text{ Ton/m}$$

$$c'_x = c' c^2 \theta = 332.42 c^2 \theta = 265.94 \text{ Ton s/m}$$

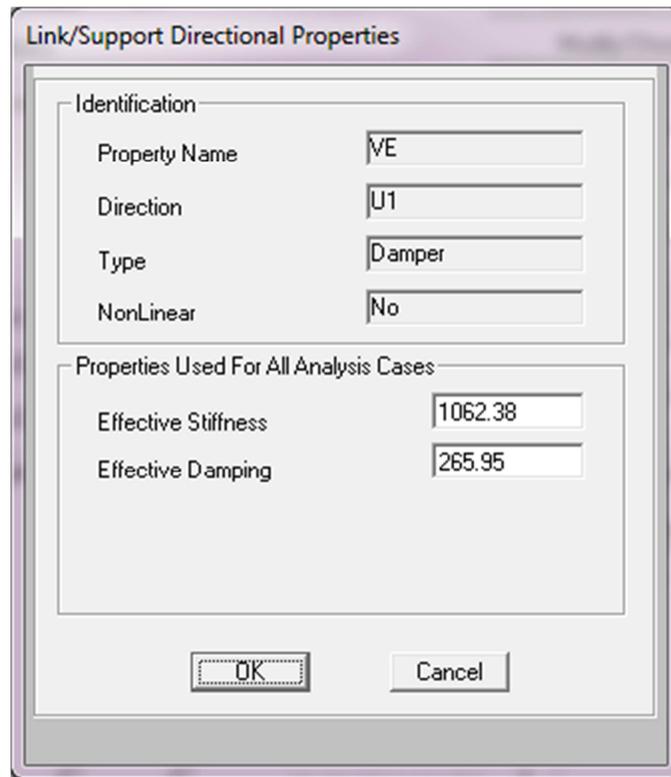


Figura 5.1 Propiedades del disipador VE asignadas en SAP2000

Para estimar el comportamiento que va a tener la estructura con los disipadores, se puede calcular el coeficiente de rigidez y el coeficiente de amortiguamiento:

$$\bar{k} = k + k' c \theta = 2665.94 + 1062.38 = 3718.31 \text{ Ton/m}$$

$$\bar{c} = c + c' c \theta = 22.16 + 265.94 = 288.10 \text{ Ton s/m}$$

Con los dos coeficientes calculados, podemos hallar el factor de amortiguamiento crítico equivalente del sistema estructural con disipadores VE:

$$\bar{\zeta} = \frac{\bar{c}}{2\sqrt{\bar{k}m}} = \frac{288.10}{2\sqrt{3718.31(115.575)}} = 0.22$$

El factor de amortiguamiento crítico equivalente de 0.22 (22%) se acerca al objetivo que era 0.20 (20%).

5.3. Análisis y Diseño estructural en el programa SAP2000 con DVE

Todos los parámetros y condiciones de análisis y diseño que se usaron en el Capítulo 4 serán considerados en el modelo estructural de este capítulo. De esta forma, el único cambio al modelo estructural del pórtico convencional anterior es la adición de los disipadores viscoelásticos con sus respectivas propiedades.

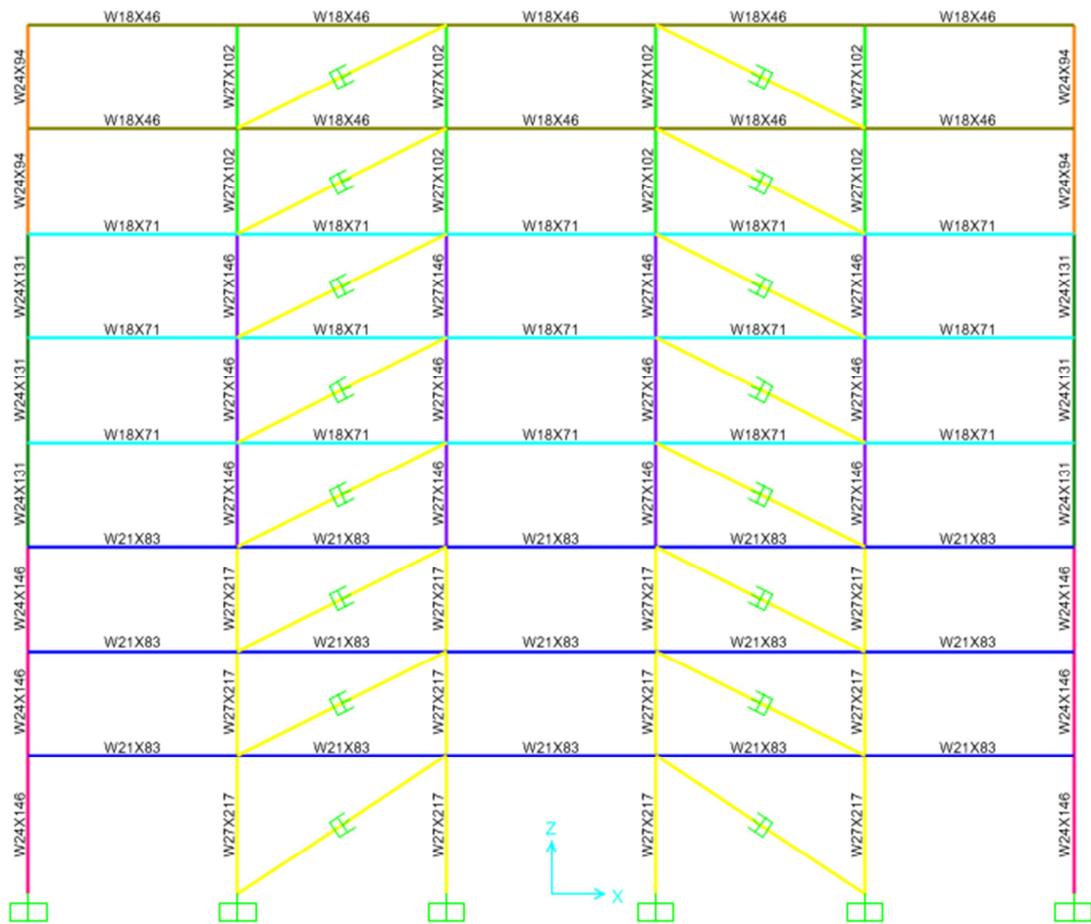


Figura 5.2 Modelo en SAP2000 del pórtico con disipadores VE

5.3.1. Análisis Modal con DVE

En la Tabla 5.1 se detalla el cálculo de los 12 modos de vibración libre escogidos para la estructura con sus respectivos periodos de vibración obtenidos del análisis modal que se realiza en SAP2000.

Modo de vibración	Período seg.	Masa X	Masa X acumulada
1	1.2111	0.7879	0.7879
2	0.4131	0.1253	0.9132
3	0.2263	0.0445	0.9577
4	0.1413	0.0000	0.9577
5	0.1411	0.0219	0.9796
6	0.1380	0.0003	0.9799
7	0.1305	0.0000	0.9799
8	0.1267	0.0000	0.9800
9	0.1120	0.0000	0.9800
10	0.1120	0.0000	0.9800
11	0.0983	0.0112	0.9911
12	0.0746	0.0051	0.9963

Tabla 5.1 Masa modal acumulada en dirección X del pórtico con DVE

Se observa en la Tabla 5.1 que el periodo del primer modo de vibración de la estructura usando disipadores VE se redujo a 1.2111 seg. La estructura convencional tiene un periodo fundamental de 1.3107 seg. El cambio en este aspecto es pequeño.

5.3.2. Deformaciones laterales y Revisión de derivas inelásticas con DVE

Se obtienen las deformaciones laterales originadas por la carga sísmica E_x , y la revisión de derivas inelásticas Δ_M entre piso se las realiza según los límites del NEC-11 (NEC-11, Cap. 2, pag. 47).

NIVEL	Deformación X (cm)	h (cm)	0.75R	Δ_M	< 2%
8	8.88	300.00	2.25	0.52%	OK
7	8.19	300.00	2.25	0.71%	OK
6	7.24	300.00	2.25	0.85%	OK
5	6.11	300.00	2.25	0.98%	OK
4	4.80	300.00	2.25	1.01%	OK
3	3.45	300.00	2.25	0.93%	OK
2	2.21	300.00	2.25	0.89%	OK
1	1.02	400.00	2.25	0.57%	OK
PB	0.00				

Tabla 5.2 Deformaciones Laterales y Revisión de derivas inelásticas con DVE

Si comparamos las derivas inelásticas del pórtico con disipadores VE de la Tabla 5.2 con las derivas inelásticas del pórtico convencional (Tabla 4.5) notamos que hay una gran reducción de derivas inelásticas, siendo la máxima de 1.01%. La tabla, resume las reducciones en deformaciones y derivas inelásticas.

NIVEL	Deformación X (cm)		Δ_M	
	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE
8	16.11	8.88	1.06%	0.52%
7	14.69	8.19	1.41%	0.71%
6	12.82	7.24	1.60%	0.85%
5	10.69	6.11	1.80%	0.98%
4	8.28	4.80	1.81%	1.01%
3	5.87	3.45	1.62%	0.93%
2	3.71	2.21	1.51%	0.89%
1	1.69	1.02	0.95%	0.57%

Tabla 5.3 Comparación de deformaciones laterales y derivas inelásticas del pórtico sin DVE y con DVE

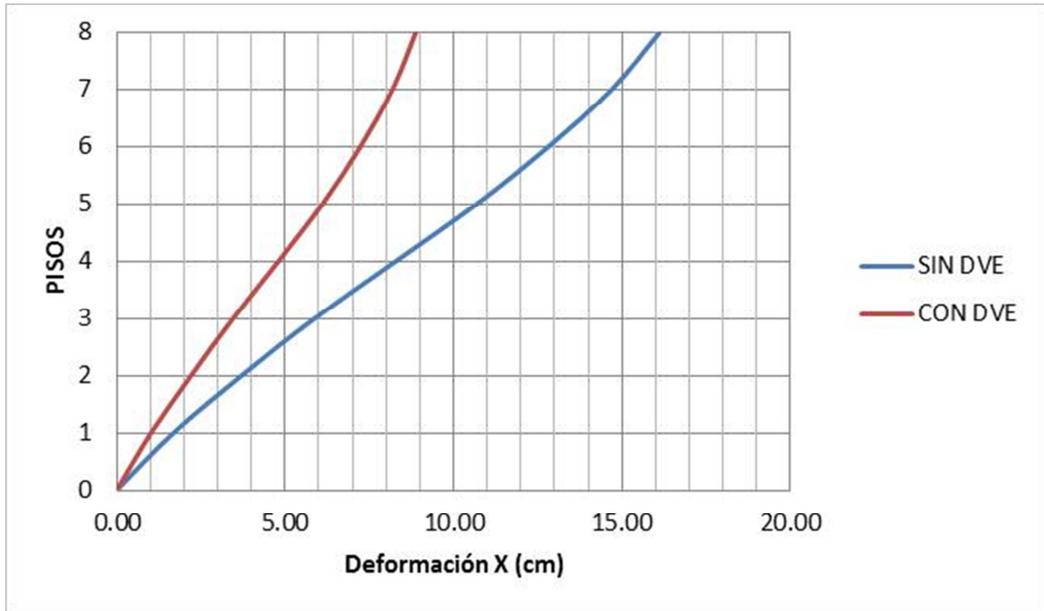


Figura 5.3 Comparación de Deformaciones X del pórtico sin DVE y con DVE

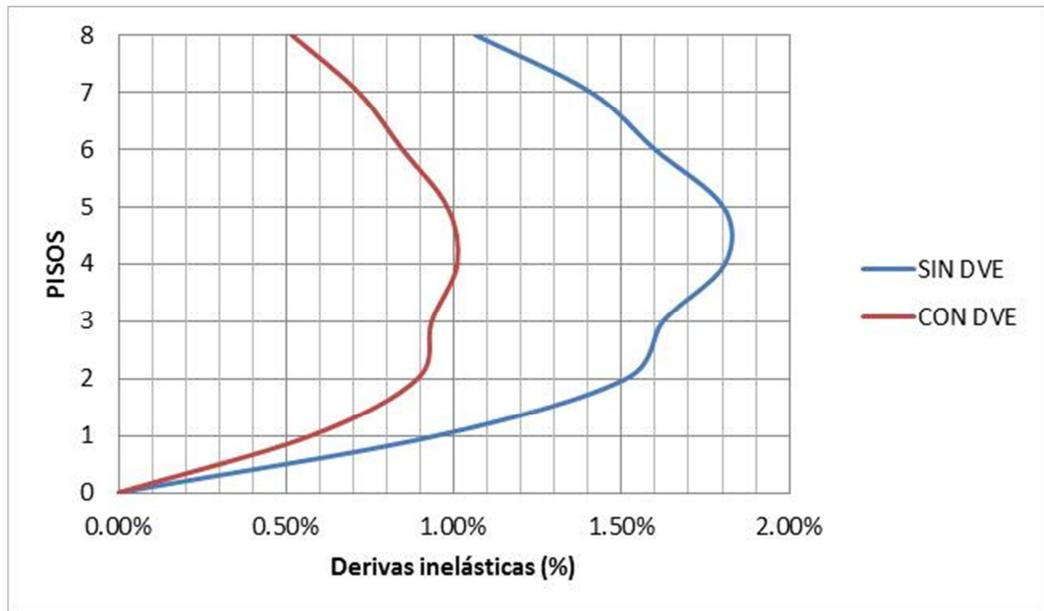


Figura 5.4 Comparación de Derivas Inelásticas del pórtico sin DVE y con DVE

5.3.3. Revisión del Diseño estructural con DVE

El diseño de los elementos fue comprobado con la opción de SAP2000, *Start Design/Check of Structure* con el código de diseño AISC 360-05/IBC2006, tal como en el subcapítulo 4.6.5.

El diseño resulta satisfactorio. Ningún elemento superó la unidad en ningún parámetro de diseño, como se muestra en la Figura 5.5. En la Tabla A5.1 del Anexo 5, se pueden observar los factores críticos para cada elemento estructural, ya que algunas veces la revisión del factor de CBC en las columnas resulta más crítico que la revisión de PMM.

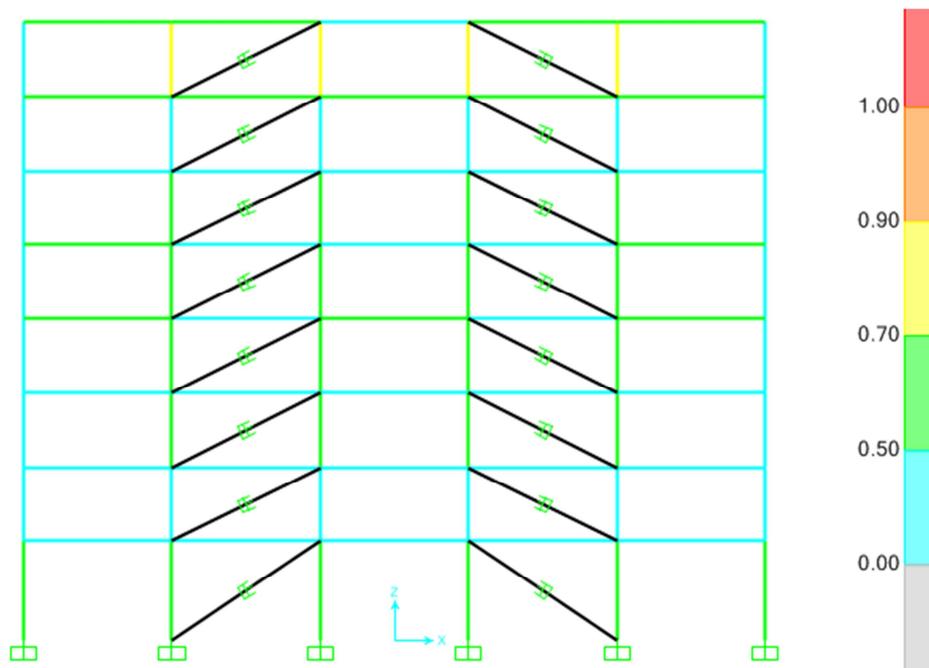


Figura 5.5 Resultados de la Revisión de Diseño estructural del pórtico con DVE en SAP2000

A continuación, en la Tabla 5.4 y en la Tabla 5.5 se detalla únicamente la revisión PMM Demanda/Resistencia para elementos característicos del pórtico de acero. En el Anexo 5 se puede ver los factores para todos los elementos y un mayor detalle del cálculo del factor Demanda/Resistencia por revisión PMM.

EJE	*NIVEL	Elemento	Perfil	Factor	Tipo de Revisión
A	1	COL	W24X146	0.57	PMM
A	4	COL	W24X131	0.26	PMM
A	7	COL	W24X94	0.21	PMM
B	1	COL	W27X217	0.58	PMM
B	4	COL	W27X146	0.41	PMM
B	7	COL	W27X102	0.21	PMM
*NIVEL: se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado					

Tabla 5.4 Resultados de revisión de diseño PMM de las columnas del pórtico con DVE

*EJE	NIVEL	Elemento	Perfil	Factor	Tipo de Revisión
A	1	VIGA	W21X83	0.44	PMM
C	2	VIGA	W21X83	0.49	PMM
E	3	VIGA	W21X83	0.50	PMM
A	4	VIGA	W18X71	0.53	PMM
E	5	VIGA	W18X71	0.51	PMM
E	6	VIGA	W18X71	0.45	PMM
A	7	VIGA	W18X46	0.51	PMM
A	8	VIGA	W18X46	0.42	PMM
*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado					

Tabla 5.5 Resultados de revisión de diseño PMM de las columnas del pórtico con DVE

La relación Demanda/ Resistencia basada en un análisis PMM (P-M2-M3, comportamiento fuerza axial / momento biaxial) de todos los elementos estructurales ha disminuido, lo que permite hacer un rediseño de la estructura, ya que las derivas inelásticas también resultaron más controladas.

A continuación, en la Tabla 5.6 y en la Tabla 5.7 se detallan las reducciones de las fuerzas internas en los elementos estructurales y factores por revisión PMM, que resultaron al agregar disipadores viscoelásticos al pórtico convencional, para uno de los elementos estructurales más críticos de algunos ejes y niveles. En el Anexo 6 se puede observar la comparación de todos los elementos estructurales.

EJE	*NIVEL	Elemento	Perfil	Tipo de Revisión	Pr (Ton)		Mr (Ton-m)		Factor	
					SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE
A	1	COL	W24X146	PMM	-281.07	-227.22	-99.87	-61.91	0.80	0.57
A	4	COL	W24X131	PMM	-157.18	-129.79	-53.25	-32.75	0.47	0.26
A	7	COL	W24X94	PMM	-50.50	-44.19	31.39	20.42	0.30	0.21
B	1	COL	W27X217	PMM	-309.38	-336.07	-183.85	-111.87	0.73	0.58
B	4	COL	W27X146	PMM	-191.11	-203.99	-75.27	-40.28	0.52	0.41
B	7	COL	W27X102	PMM	-75.37	-76.82	39.45	20.64	0.33	0.21

*NIVEL: se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado

Tabla 5.6 Comparación de resultados de Revisión de Diseño de columnas del pórtico sin DVE y con DVE

*EJE	NIVEL	Elemento	Perfil	Tipo de Revisión	Mr (Ton-m)		Factor	
					SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE
A	1	VIGA	W21X83	PMM	-65.58	-44.3	0.65	0.44
C	2	VIGA	W21X83	PMM	-74.16	-49.4	0.73	0.49
E	3	VIGA	W21X83	PMM	-77.07	-50.0	0.76	0.50
A	4	VIGA	W18X71	PMM	-60.48	-39.8	0.81	0.53
E	5	VIGA	W18X71	PMM	-57.37	-37.7	0.77	0.51
E	6	VIGA	W18X71	PMM	-51.52	-33.9	0.69	0.45
A	7	VIGA	W18X46	PMM	-33.49	-23.7	0.72	0.51
A	8	VIGA	W18X46	PMM	-26.35	-19.3	0.57	0.42

*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado

Tabla 5.7 Comparación de resultados de Revisión de Diseño de vigas del pórtico sin DVE y con DVE

Los disipadores viscoelásticos actúan contra las fuerzas laterales que se ejercen sobre la estructura. Según los análisis estudiados esto se cumple, ya que las fuerzas internas en vigas y columnas generados por las cargas gravitacionales no varían significativamente con la adición de disipadores, pero las fuerzas provocadas en los elementos por las cargas sísmica se ven reducidos debido a la acción de los disipadores VE.

Para demostrar lo escrito, la Tabla 5.8 y la Tabla 5.10 muestran las fuerzas internas, en algunas columnas y vigas respectivamente, debido al combo de servicio (COMBO5: 1.0DL +1.0LL); mientras que la Tabla 5.9 y la Tabla 5.11 muestran las fuerzas internas debido a la carga sísmica Ex. En el Anexo 6 se puede revisar la comparación de las fuerzas internas de todos los componentes del pórtico estructural para el COMBO5 y EX.

COLUMNAS: COMBO 5			P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton-m)	
EJE	*NIVEL	Perfil	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE
A	1	W24X146	-150.86	-150.91	-2.25	-2.25	-2.57	-2.58
A	4	W24X131	-94.34	-94.37	-5.80	-5.80	-8.45	-8.46
A	7	W24X94	-37.20	-37.21	-5.20	-5.21	-7.92	-7.93
B	1	W27X217	-293.59	-294.70	-0.07	-0.07	-0.08	-0.08
B	4	W27X146	-181.54	-182.01	-0.44	-0.43	-0.62	-0.60
B	7	W27X102	-72.32	-72.36	-0.55	-0.54	-0.90	-0.89
*NIVEL: se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado								

Tabla 5.8 Comparación de fuerzas en columnas por COMBO 5 entre el pórtico sin DVE y con DVE

COLUMNAS: EX			P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton-m)	
EJE	*NIVEL	Perfil	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE
A	1	W24X146	124.50	70.60	27.67	17.16	97.22	59.25
A	4	W24X131	59.36	31.94	24.21	13.67	44.52	24.01
A	7	W24X94	12.48	6.16	12.09	5.90	13.85	5.36
B	1	W27X217	5.18	30.72	52.45	32.37	183.77	111.79
B	4	W27X146	3.22	15.61	42.74	23.56	74.64	39.66
B	7	W27X102	1.16	2.56	21.89	10.43	27.79	11.51

*NIVEL: se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado

Tabla 5.9 Comparación de fuerzas en columnas por fuerza sísmica EX entre el pórtico sin DVE y con DVE

VIGAS: COMBO 5			P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton-m)	
*EJE	NIVEL	Perfil	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE
A	1	W21X83	2.83	2.84	16.17	16.16	-12.05	-12.04
C	2	W21X83	0.00	0.00	15.95	15.95	-11.98	-11.98
E	3	W21X83	2.45	2.46	16.36	16.37	-12.64	-12.66
A	4	W18X71	2.00	2.01	15.72	15.72	-11.16	-11.14
E	5	W18X71	1.93	1.93	16.63	16.64	-13.60	-13.62
E	6	W18X71	2.36	2.36	16.67	16.68	-13.65	-13.67
A	7	W18X46	1.44	1.44	15.52	15.51	-10.89	-10.88
A	8	W18X46	3.84	3.84	15.86	15.86	-11.45	-11.44

*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado

Tabla 5.10 Comparación de fuerzas en vigas por COMBO 5 entre el pórtico sin DVE y con DVE

VIGAS: EX			P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton-m)	
*EJE	NIVEL	Perfil	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE
A	1	W21X83	1.72	0.96	19.83	11.95	52.02	31.35
C	2	W21X83	0.00	0.00	23.41	14.01	61.78	36.98
E	3	W21X83	3.73	1.88	23.59	13.62	64.01	36.91
A	4	W18X71	3.43	1.79	17.25	9.67	45.22	25.36
E	5	W18X71	2.96	1.46	15.94	8.70	43.32	23.62
E	6	W18X71	3.19	1.46	13.74	7.26	37.43	19.74
A	7	W18X46	1.17	0.50	7.19	3.58	18.92	9.44
A	8	W18X46	1.85	0.70	4.99	2.42	12.98	6.31

*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado

Tabla 5.11 Comparación de fuerzas en vigas por fuerza sísmica EX entre el pórtico sin DVE y con DVE

La Tabla 5.9 muestra que las cargas axiales en las columnas laterales (Eje A) del pórtico con DVE han disminuido (1er piso: 43%, 4to piso: 46%, 7mo piso: 51%), y se ha distribuido los esfuerzos haciendo que las columnas interiores (Eje B), que antes soportaban una carga axial muy pequeña, adquieran una carga axial mayor al agregar disipadores. Se tiene que tener en cuenta que este aumento no es significativo comparado a la capacidad de las columnas.

También se observa que las fuerzas cortantes y momentos flectores en las columnas, tanto laterales como interiores y en las vigas del pórtico con DVE disminuyen considerablemente:

COLUMNAS: EX			% Reducción		
EJE	*NIVEL	Perfil	P (Ton)	V2 (Ton)	M3 (Ton-m)
A	1	W24X146	43%	38%	39%
A	4	W24X131	46%	44%	46%
A	7	W24X94	51%	51%	61%
B	1	W27X217	-	38%	39%
B	4	W27X146	-	45%	47%
B	7	W27X102	-	52%	59%
*Se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado					

Tabla 5.12 Porcentaje de reducción de V2 y M3 en columnas del pórtico con DVE

VIGAS: EX			V2 (Ton)	M3 (Ton-m)
*EJE	NIVEL	Perfil	% Reducción	% Reducción
A	1	W21X83	40%	40%
C	2	W21X83	40%	40%
E	3	W21X83	42%	42%
A	4	W18X71	44%	44%
E	5	W18X71	45%	45%
E	6	W18X71	47%	47%
A	7	W18X46	50%	50%
A	8	W18X46	52%	51%

*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado

Tabla 5.13 Porcentaje de reducción de V2 y M3 en vigas del pórtico con DVE

No se detalla el porcentaje de reducción de carga axial en vigas porque las fuerzas son insignificantes.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS MODAL NO LINEAL TIEMPO-HISTORIA

6.1. Introducción

Un registro sísmico característico de la ciudad de Guayaquil ha sido considerado para analizar el comportamiento dinámico del pórtico estructural en el programa SAP2000 por medio de un análisis no lineal Tiempo-Historia. Se compara el comportamiento de la estructura convencional (sin disipadores viscoelásticos) frente a un evento sísmico, con el comportamiento de la misma estructura usando disipadores viscoelásticos.

Según el CSI Analysis Reference Manual (p. 407) y usado anteriormente por Villarreal & Oviedo (2008), el análisis no lineal que se utiliza para modelar los disipadores viscoelásticos es el Analisis No Lineal Modal Tiempo-Historia (FNA), que es una extensión del Fast NonLinear Analysis (FNA) que fue desarrollado por Wilson (Ibrahimbegovic and Wilson, 1989; Wilson, 1993). El método es extremadamente eficiente y es diseñado para ser usado principalmente para sistemas estructurales que son linealmente elásticos, pero que tienen un número limitado de elementos no lineales predefinidos. Para el método FNA, toda la no linealidad es impuesta por los disipadores.

6.2. Registros Sísmicos

El registro sísmico en que se va a basar el análisis Tiempo-Historia, fue compartido por el Dr. Walter Mera Ortiz de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. El registro sísmico corresponde a las lecturas realizadas por la

Estación Centenario – Guayaquil, el 26 de abril de 1993 a las 22:22:21. El documento entregado contiene tablas aceleración vs. tiempo. Existen tres aceleraciones disponibles: Aceleración Vertical, Aceleración Este – Oeste y Aceleración Norte – Sur.

El registro sísmico posee 3024 pasos con intervalos de 0.01 seg, resultando una duración total de 30.24 seg.

Como los pórticos analizados han sido realizados en dos dimensiones, solo se escoge la tabla de aceleraciones que mayor demanda presente. En este trabajo se va a utilizar la Aceleración Norte – Sur que presentó una aceleración máxima igual a 0.10994.

Aunque el registro es representativo de la ciudad de Guayaquil por haber sido tomado en una zona de suelo blando, para considerar la situación más crítica, el registro sísmico ha sido escalado a la aceleración máxima del suelo de Guayaquil según el NEC-11, que es igual a:

$$S_a = z \times F_a = 0.4 \times 1.15 = 0.46g$$

En la Figura 6.1 se aprecia el registro sísmico con la aceleración escalada a 0.46g. El registro sísmico es ingresado en SAP2000 para un análisis modal no lineal Tiempo-Historia, y se crea un Load Case que represente a la fuerza sísmica llamada EX TH. Se va a estudiar 4000 pasos en vez de los 3024 pasos del registro original porque se quiere revisar el comportamiento de la estructura cuando cesa el sismo.

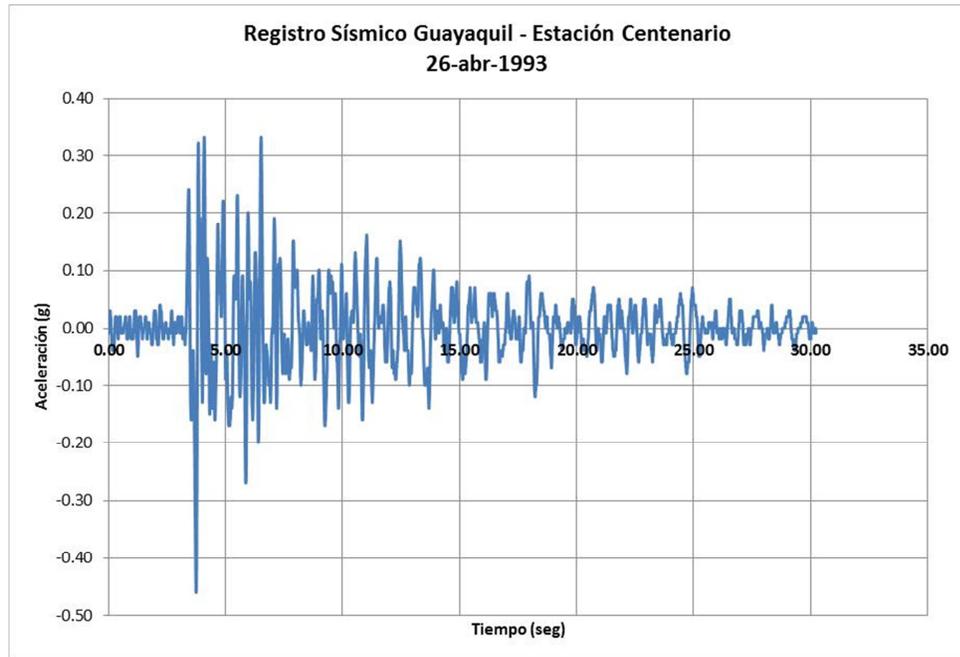


Figura 6.1 Registro Sísmico Guayaquil – Estación Centenario, 26 de abril de 1993, Escalado a Aceleración máxima =0.46g

Para realizar el análisis no lineal, las propiedades de los disipadores viscoelásticos se asignaron como no lineales con las mismas magnitudes tanto para la rigidez como para el amortiguamiento, y se asignó un exponente de amortiguamiento igual a 1 porque esto permite seguir modelando en paralelo la rigidez elástica con el amortiguador viscoso idealizado por el modelo de Kelvin-Voigt. (CSI Knowledge Base)

Link/Support Directional Properties	
Identification	
Property Name	VE
Direction	U1
Type	Damper
NonLinear	Yes
Properties Used For Linear Analysis Cases	
Effective Stiffness	1062.38
Effective Damping	265.95
Properties Used For Nonlinear Analysis Cases	
Stiffness	1062.38
Damping Coefficient	265.95
Damping Exponent	1.
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>	

Figura 6.2 Propiedades no lineales del DVE ingresadas en SAP2000

6.3. Comparación de la Distribución de Energía

Se realiza una comparación entre la distribución de energía en el pórtico convencional sin disipadores viscoelásticos con el pórtico con disipadores viscoelásticos que se obtiene del programa SAP2000.

En la Figura 6.3 y en la Figura 6.4 se muestra la Energía de Entrada, Energía Cinética, Energía Potencial, Energía Modal de Amortiguamiento propio

de la estructura y Energía absorbida por los disipadores viscoelásticos para el pórtico convencional sin DVE y con DVE respectivamente. En la Tabla 6.1 y Tabla 6.2, se indica los valores de cada energía y su porcentaje de energía absorbida con respecto a la energía de entrada.

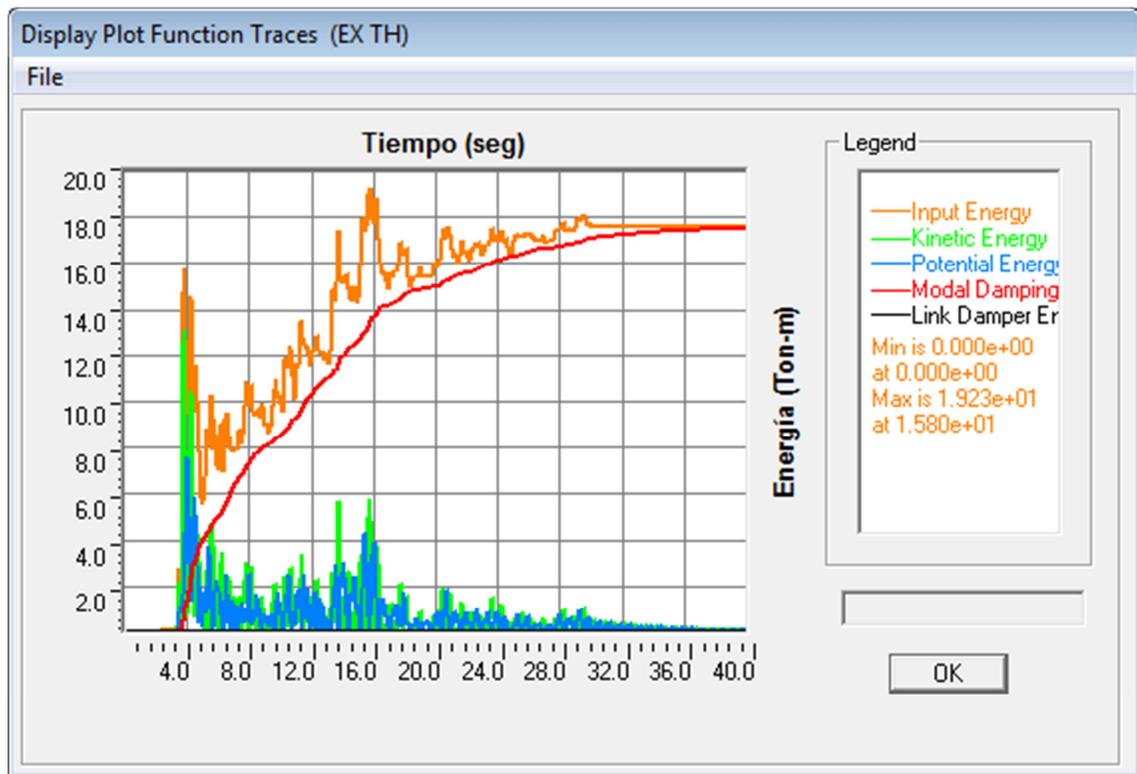


Figura 6.3 Distribución de Energía en el pórtico sin DVE

PÓRTICO SIN DVE	ENERGÍA (Ton - m)			
	Entrada	Cinética	Potencial	Amortig. Modal
GYE 93 - CENTENARIO	19.23	13.11	7.62	17.52
% E. Entrada	100%	68%	40%	91%

Tabla 6.1 Distribución de Energía en el pórtico sin DVE

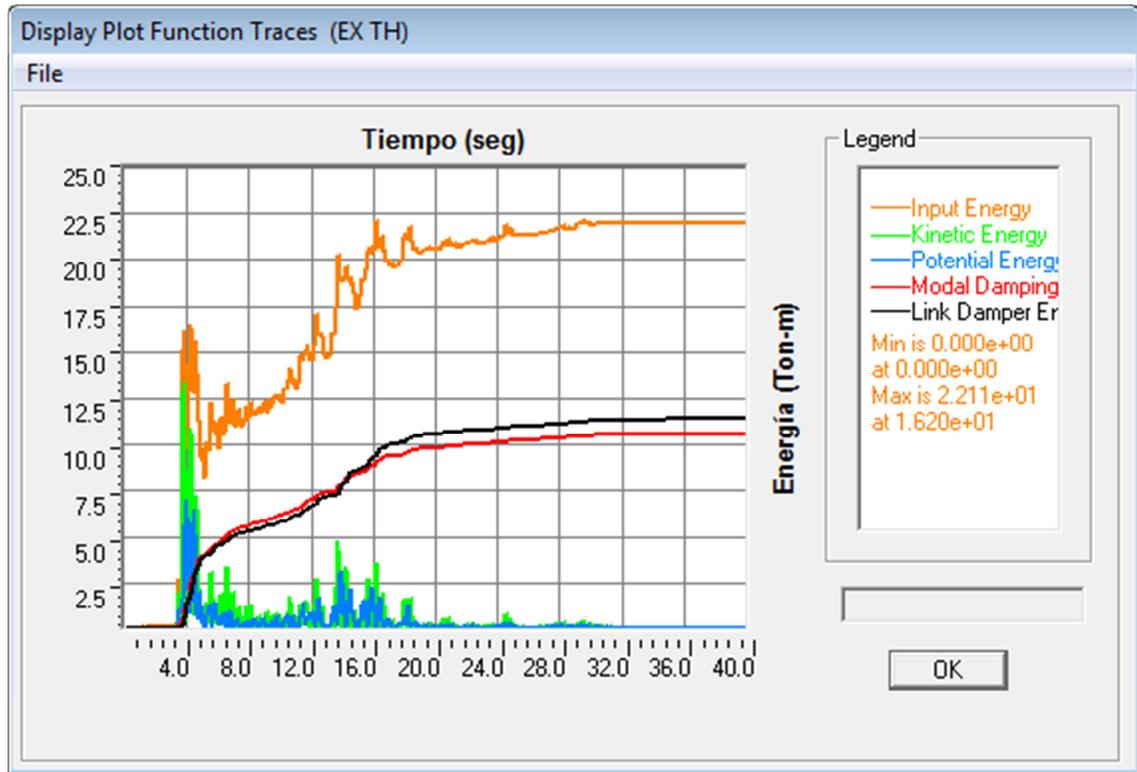


Figura 6.4 Distribución de Energía en el pórtico con DVE

PÓRTICO CON DVE	ENERGÍA (Ton - m)				
	Entrada	Cinética	Potencial	Amortig. Modal	DVE
GYE 93 - CENTENARIO	22.11	13.33	6.98	10.55	11.37
% E. Entrada	100%	60%	32%	48%	51%

Tabla 6.2 Distribución de Energía en el pórtico con DVE

A partir de las figuras y tablas anteriores, se puede indicar que:

La Energía de Entrada aumentó ligeramente de 19.23 Ton-m a 22.11 Ton-m, ya que los disipadores cambian de cierta manera el comportamiento dinámico de la estructura. Este efecto también se puede ver en la reducción del periodo fundamental de vibración de la estructura.

La energía cinética y la energía potencial absorben gran cantidad de energía al principio del sismo, aproximadamente entre el tercer y sexto segundo de haber ocurrido el sismo.

Se cumple el objetivo principal de usar disipadores viscoelásticos: La energía modal de amortiguamiento que idealiza las deformaciones inelásticas de los elementos estructuras y otros procesos de amortiguamiento, disminuye notablemente, ya que pasa de disipar el 91% de la energía de entrada que recibe el pórtico de acero a tener la función de disipar el 48% de la energía de entrada cuando son incluidos los disipadores viscoelásticos a la estructura. La energía que absorben los disipadores viscoelástico es de 51% de la energía de entrada.

6.4. Histéresis de los Disipadores Viscoelásticos

En el subcapítulo 3.2 se indica que los materiales viscoelásticos, y por tanto los disipadores viscoelásticos, tienen un comportamiento histerético de forma elíptica si se realiza una gráfica esfuerzo-deformación. En la Figura 6.5 se muestra la histéresis de uno de los disipadores VE adicionados al pórtico en SAP2000.

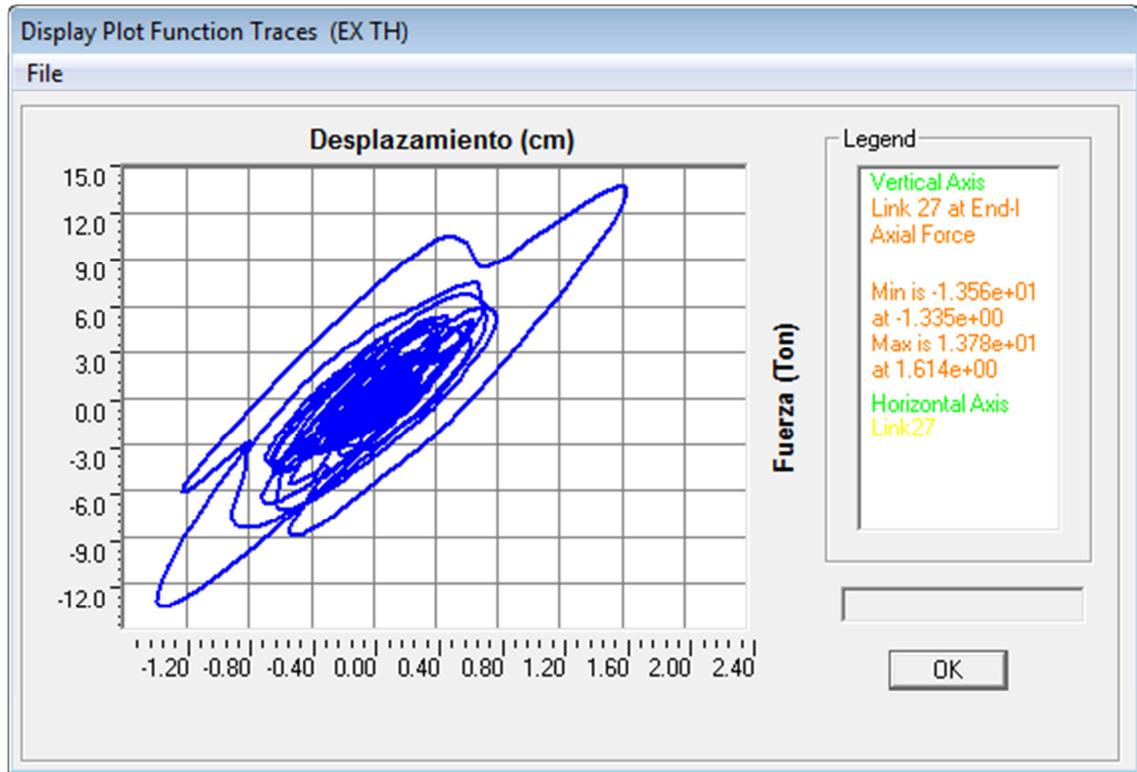


Figura 6.5 Histéresis elíptica del disipador viscoelástico D12

El gráfico esfuerzo- deformación indica una Fuerza Axial máxima de 13.78 Ton con una deformación máxima de 1.63 cm. Si calculamos la deformación unitaria del material viscoelástico de 2cm de espesor, resulta: $1.63/2 = 81\% < 100\%$, lo cual cumple con lo expuesto por Chang (et al., 2012) en el subcapítulo 3.4. En el Anexo 8 se puede revisar las fuerzas y deformaciones en cada disipador viscoelástico modelado en el pórtico en SAP2000 y la revisión de las deformaciones unitarias del material viscoelástico.

6.5. Comparación de Deformaciones Laterales

Se observan en la Tabla 6.3 la envolvente de las deformaciones laterales de cada nivel para cada registro sísmico. Todas las deformaciones máximas no ocurren al mismo tiempo, por tanto para demostrar el efecto de los DVE en la reducción de deformaciones y derivas entre pisos se ha estudiado los resultados para un tiempo determinado. En la Tabla 6.4, Figura 6.6 y Figura 6.7 se detalla la comparación del comportamiento de las estructura a los 15.45 seg que es cuando ocurre la máxima deformación del 4to piso. Efectivamente las reducciones ocurren aunque en la deriva del último entre piso resultó mayor usando DVE (0.09% a 0.12%).

	SIN DVE	CON DVE	% REDUCCIÓN
Nivel	Def. x (cm)	Def. x (cm)	Def. x
8	11.47	10.70	7%
7	8.96	8.75	2%
6	6.99	7.11	-2%
5	5.92	5.43	8%
4	4.72	3.91	17%
3	3.40	2.86	16%
2	2.21	2.03	8%
1	1.12	1.03	7%

Tabla 6.3 Envolvente de Deformaciones máximas – Análisis Tiempo-Historia

TIEMPO: 15.45 seg		SIN DVE		CON DVE		% REDUCCIÓN	
Nivel	h (cm)	Def. x (cm)	Δ_M	Def. x (cm)	Δ_M	Def. x	Δ_M
8	300.00	7.63	0.09%	4.65	0.12%	39%	-31%
7	300.00	7.35	0.18%	4.28	0.17%	42%	6%
6	300.00	6.80	0.30%	3.77	0.22%	45%	27%
5	300.00	5.92	0.40%	3.12	0.26%	47%	36%
4	300.00	4.72	0.44%	2.35	0.25%	50%	43%
3	300.00	3.40	0.41%	1.59	0.21%	53%	49%
2	300.00	2.16	0.39%	0.96	0.18%	56%	54%
1	400.00	0.98	0.25%	0.42	0.10%	57%	57%

Tabla 6.4 Comparación de Deformaciones laterales y Derivas entre pisos – Análisis Tiempo-Historia

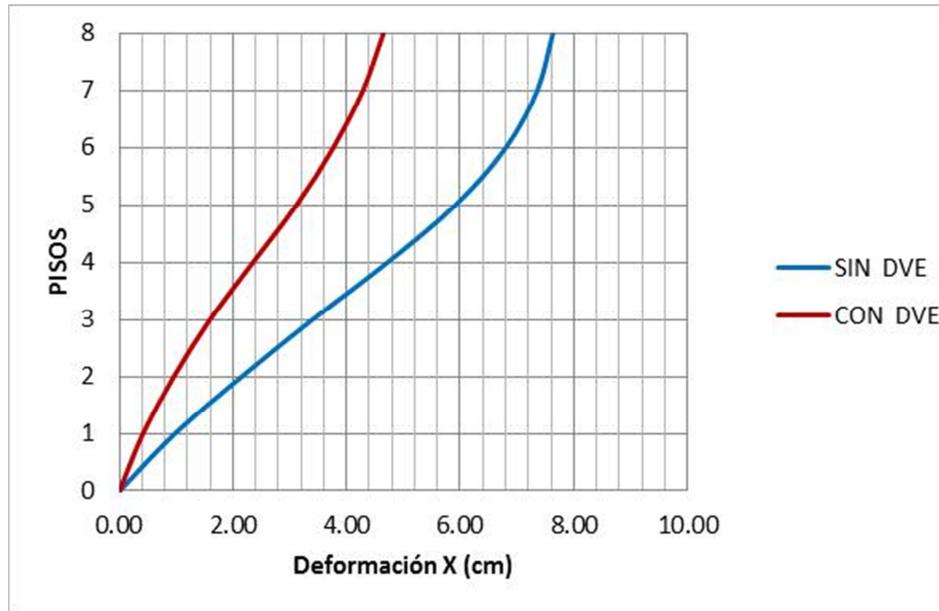


Figura 6.6 Comparación de Deformaciones X del pórtico sin DVE y con DVE – Análisis Tiempo-Historia

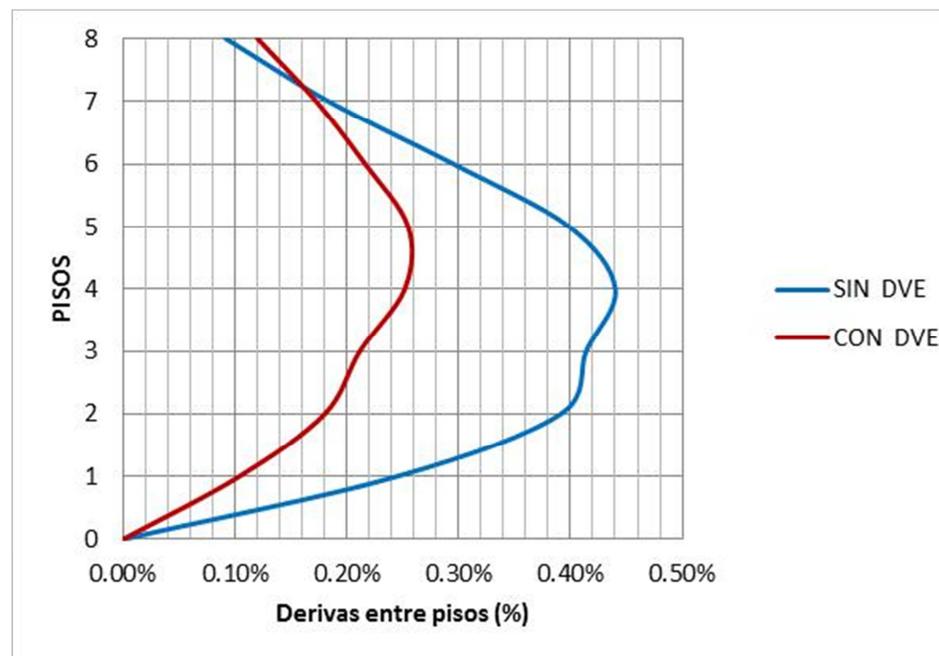


Figura 6.7 Comparación de Derivas entre pisos del pórtico sin DVE y con DVE – Análisis Tiempo-Historia

6.6. Comparación de Fuerzas en Columnas

La siguiente tabla indica que hay una reducción de esfuerzos en todos los niveles, especialmente en el séptimo piso.

COLUMNAS: EX TH		P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton-m)		% REDUCCIÓN		
EJE	*NIVEL	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE	P	V2	M3
A	1	79.87	78.74	28.73	26.10	91.79	84.32	1%	9%	8%
A	4	61.52	55.18	22.71	22.65	44.50	41.70	10%	0%	6%
A	7	22.63	19.52	22.03	17.58	41.94	32.94	14%	20%	21%
B	1	4.29	33.61	54.07	49.07	172.71	158.60	-	9%	8%
B	4	2.59	24.24	38.45	38.27	72.66	67.44	-	0%	7%
B	7	1.10	8.41	36.87	29.28	67.96	53.32	-	21%	22%

*Se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado

Tabla 6.5 Fuerzas en Columnas – Análisis Tiempo-Historia

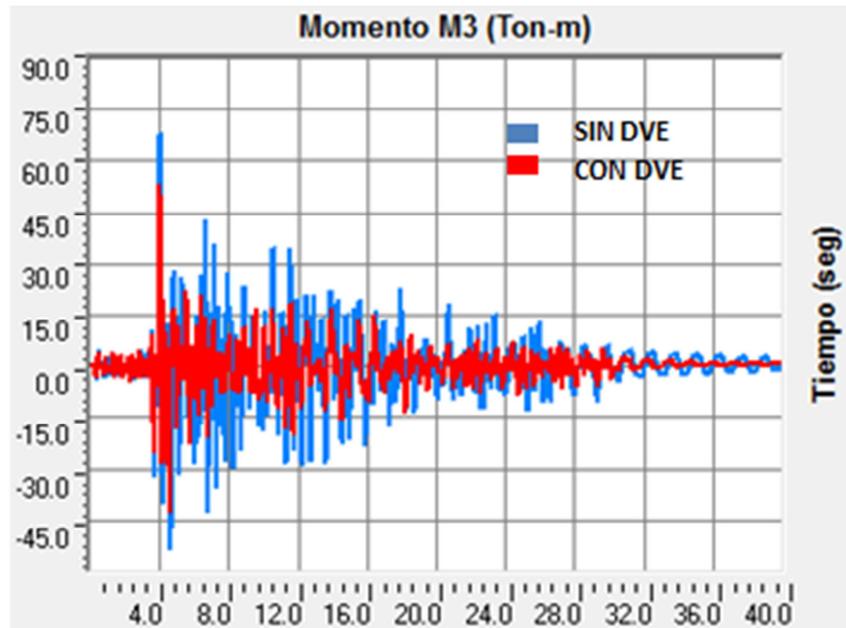


Figura 6.8 Diagrama Momento vs. Tiempo para la columna EJE B NIVEL 7

6.7. Comparación de Fuerzas en Vigas

Se aprecia en las siguiente tabla que el mayor porcentaje de reducción de cortante y momento ocurre en los tres últimos pisos, mientras que en el tercer y cuarto piso las diferencias de esfuerzos son casi nulas.

VIGAS: EX TH		P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton-m)		% REDUCCIÓN		
*EJE	NIVEL	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE	P	V2	M3
A	1	1.52	1.33	16.59	15.46	43.51	40.57	12%	7%	7%
C	2	0.00	0.00	16.16	14.91	42.65	39.36	0%	8%	8%
E	3	3.19	3.11	17.84	17.67	48.46	47.99	3%	1%	1%
A	4	2.63	2.55	13.27	13.35	34.79	35.01	3%	-1%	-1%
E	5	2.84	2.45	14.91	13.75	40.54	37.36	14%	8%	8%
E	6	3.82	2.99	15.73	13.68	42.87	37.24	22%	13%	13%
A	7	1.94	1.53	11.89	10.01	31.28	26.37	21%	16%	16%
A	8	3.30	2.55	9.54	8.10	24.85	21.15	23%	15%	15%

*Se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado

Tabla 6.6. Fuerzas en Vigas – Análisis Tiempo-Historia

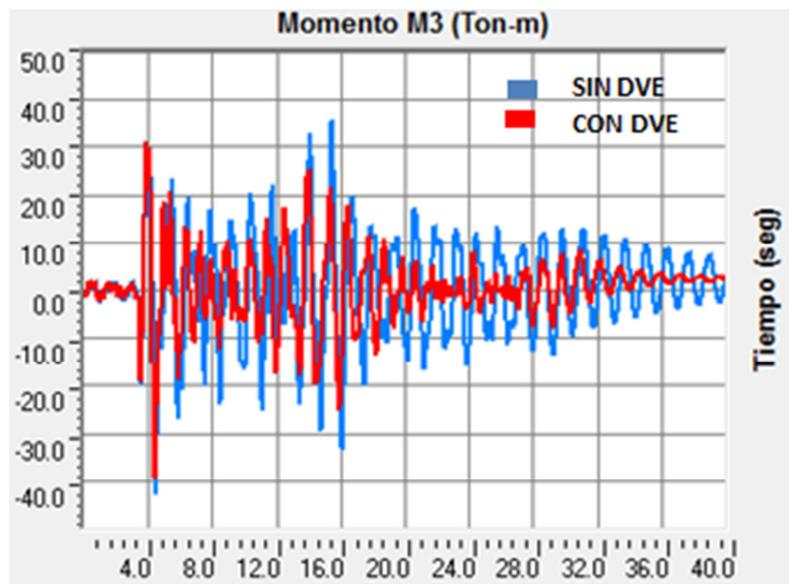


Figura 6.9. Diagrama Momento vs. Tiempo para la viga EJE C NIVEL 2

CAPÍTULO 7

ALTERNATIVAS DE ANÁLISIS Y DISEÑO DEL PÓRTICO DE ACERO SIN Y CON DISIPADORES VISCOELÁSTICOS

7.1. Introducción

En el Capítulo 5 se observó que los efectos de usar disipadores viscoelásticos en el pórtico convencional son favorables porque se reducen las deformaciones laterales, las derivas inelásticas y las fuerzas internas tanto de vigas como de columnas. Estas reducciones permiten tener varias alternativas en el momento de analizar y diseñar la estructura. En este capítulo se detallan tres alternativas de análisis y diseño para el pórtico convencional y para el pórtico con disipadores viscoelásticos.

7.2. Alternativa 1: Aumento del Factor de Importancia

El pórtico de acero ha sido analizado y diseñado para que funcione como un edificio oficinas. Se calculó un espectro de diseño, a partir del NEC-11, que por el uso del edificio considera un factor de importancia de $I=1$. La reducción de fuerzas internas en elementos y derivas entre pisos alrededor del 50% usando disipadores viscoelásticos (DVE) en el pórtico, tal como se vio en el capítulo 5, permite que la estructura con disipadores pueda ser analizada y diseñada para un espectro de diseño más riguroso que tenga un factor de importancia de 1.5, cuyo valor corresponde a edificaciones esenciales y/o peligrosas como hospitales, instalaciones militares, torres de control aéreo, etc. De esta manera se obtienen esfuerzos parecidos a los obtenidos en el pórtico

convencional analizado en el capítulo 4 con un factor de importancia $I=1$ en el espectro de diseño.

Adicionalmente, para considerar correcto el diseño de la estructura con DVE condicionado por el espectro con nuevo factor de importancia, se debe revisar que las derivas inelásticas entre pisos no excedan los límites establecidos en el NEC-11.

El Espectro de Diseño con $I=1.5$ se puede observar en el Anexo 1.

7.2.1. Comparación de fuerzas internas en elementos estructurales

En capítulos anteriores se indicó que las fuerzas debido a cargas gravitacionales no son alteradas significativamente, por tanto se comparan únicamente las fuerzas internas provocadas por la carga sísmica lateral.

COLUMNAS: EX			P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton-m)	
EJE	*NIVEL	Perfil	SIN DVE	CON DVE $I=1.5$	SIN DVE	CON DVE $I=1.5$	SIN DVE	CON DVE $I=1.5$
A	1	W24X146	124.50	105.91	27.67	25.68	97.22	88.77
A	4	W24X131	59.36	47.91	24.21	20.50	44.52	36.01
A	7	W24X94	12.48	9.24	12.09	8.85	13.85	8.04
B	1	W27X217	5.18	46.07	52.45	48.46	183.77	167.49
B	4	W27X146	3.22	23.40	42.74	35.34	74.64	59.47
B	7	W27X102	1.16	3.82	21.89	15.64	27.79	17.27

*Se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado

Tabla 7.1 Comparación de fuerzas en columnas entre pórtico convencional ($I=1.0$) y pórtico con DVE usando un $I=1.5$

VIGAS: EX			P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton-m)	
*EJE	NIVEL	Perfil	SIN DVE	CON DVE l=1.5	SIN DVE	CON DVE l=1.5	SIN DVE	CON DVE l=1.5
A	1	W21X83	1.72	1.44	19.83	17.91	52.02	47.01
C	2	W21X83	0.00	0.00	23.41	21.02	61.78	55.48
E	3	W21X83	3.73	2.82	23.59	20.43	64.01	55.36
A	4	W18X71	3.43	2.68	17.25	14.50	45.22	38.04
E	5	W18X71	2.96	2.19	15.94	13.05	43.32	35.43
E	6	W18X71	3.19	2.19	13.74	10.89	37.43	29.61
A	7	W18X46	1.17	0.76	7.19	5.38	18.92	14.17
A	8	W18X46	1.85	1.04	4.99	3.62	12.98	9.47

*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado

Tabla 7.2 Comparación de fuerzas en vigas entre pórtico convencional (l=1.0) y pórtico con DVE usando un l=1.5

La Tabla 7.1 muestra que mientras las cargas axiales en las columnas laterales (Eje A) del pórtico con DVE se acercan bastante a los valores del pórtico sin DVE, con un porcentaje de reducción (1er piso: 15%, 4to piso: 19%, 7mo piso: 26%); en las columnas interiores (Eje B) se ha distribuido los esfuerzos haciendo que adquieran una carga axial mayor al agregar los disipadores, aunque esta no es significativa.

En la Tabla 7.3 se nota que aunque los valores de cortante V2 y momento M3 del pórtico con disipadores se acercan a los valores del pórtico convencional, estos siguen siendo menores. Además, se aprecia que la reducción es mínima en la base, y que el porcentaje aumenta conforme se analiza una columna en un nivel superior.

COLUMNAS: EX			% Reducción		
EJE	*NIVEL	Perfil	P (Ton)	V2 (Ton)	M3 (Ton-m)
A	1	W24X146	15%	7%	9%
A	4	W24X131	19%	15%	19%
A	7	W24X94	26%	27%	42%
B	1	W27X217	-	8%	9%
B	4	W27X146	-	17%	20%
B	7	W27X102	-	29%	38%
*Se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado					

Tabla 7.3 Porcentaje de reducción de V2 y M3 en columnas del pórtico con DVE (I=1.5)

En las vigas también se acercan las fuerzas internas de la estructura con DVE a los valores del pórtico convencional y el porcentaje de reducción se observa en la Tabla 7.4.

VIGAS: EX			V2 (Ton)	M3 (Ton-m)
*EJE	NIVEL	Perfil	% Reducción	% Reducción
A	1	W21X83	10%	10%
C	2	W21X83	10%	10%
E	3	W21X83	13%	14%
A	4	W18X71	16%	16%
E	5	W18X71	18%	18%
E	6	W18X71	21%	21%
A	7	W18X46	25%	25%
A	8	W18X46	27%	27%
*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado				

Tabla 7.4 Porcentaje de reducción de V2 y M3 en vigas del pórtico con DVE (I=1.5)

7.2.2. Deformaciones laterales y Revisión de Derivas Inelásticas

NIVEL	PÓRTICO CON DVE, I=1.5					SIN DVE, I=1	
	Defor. X (cm)	h (cm)	0.75R	Δ_M	< 2%	Defor. X (cm)	Δ_M
8	13.32	300.00	2.25	0.77%	OK	16.11	1.06%
7	12.28	300.00	2.25	1.07%	OK	14.69	1.41%
6	10.85	300.00	2.25	1.27%	OK	12.82	1.60%
5	9.16	300.00	2.25	1.47%	OK	10.69	1.80%
4	7.20	300.00	2.25	1.52%	OK	8.28	1.81%
3	5.18	300.00	2.25	1.40%	OK	5.87	1.62%
2	3.31	300.00	2.25	1.34%	OK	3.71	1.51%
1	1.53	400.00	2.25	0.86%	OK	1.69	0.95%
PB	0.00					0.00	

Tabla 7.5 Deformaciones Laterales y Revisión de derivas inelásticas con DVE (I=1.5)

Según la Tabla 7.5, las derivas inelásticas cumplen con el límite establecido por el NEC-11. Además, las deformaciones laterales y derivas inelásticas resultaron menores en el pórtico con DVE (I=1.5) que en el pórtico convencional (I=1.0).

7.3. Alternativa 2: Aumento del Coeficiente de reducción de resistencia inelástica R

Las fuerzas internas que resultaron reducidas en el pórtico con DVE pueden ser alcanzadas por el pórtico convencional, si este último es analizado a partir de un espectro de diseño con un coeficiente de reducción de resistencia sísmica aumentado de R=3 a R=5. Para considerar correcto el diseño de la estructura convencional con el nuevo coeficiente R, se debe revisar que las derivas inelásticas entre pisos no excedan los límites establecidos por el NEC-11.

La modificación de R indica que un pórtico convencional diseñado con $R=6$ presenta los mismos esfuerzos que un pórtico con DVE con $R=3$. Por ejemplo, si un pórtico de acero convencional es diseñado considerando mucha ductilidad ($R=5$), es decir, que va a disipar mucha energía de entrada a través de deformaciones inelásticas; al agregarle DVE se puede estimar que los daños serán menores (debido al trabajo de los disipadores de absorber gran parte de la energía de entrada) diseñando la estructura para un coeficiente menor $R=3$ que considera menos ductilidad.

El Espectro de Diseño con $R=5$ se puede observar en el Anexo 1.

7.3.1. Comparación de fuerzas internas en elementos estructurales

En la Tabla 7.6, se observa que igual a los casos anteriores existe una distribución diferente de fuerzas axiales en columnas entre el pórtico sin DVE y con DVE. Las fuerzas axiales en las columnas laterales son muy parecidos con un porcentaje de reducción muy pequeño usando disipadores (1er piso: 5%, 4to piso: 10%, 7mo piso: 18%).

Las fuerzas cortantes V_2 y momento M_3 en las columnas son similares en los primer piso y aumenta el porcentaje de reducción de esfuerzos conforme aumenta el nivel de la columna de estudio, tal como se aprecia en la Tabla 7.7

En la Tabla 7.8, se observa las fuerzas internas de las vigas en el pórtico convencional ($R=5$) y el pórtico con DVE ($R=3$). En la Tabla 7.9 se aprecia los porcentajes de reducción que no superan el 10% y que son prácticamente iguales en los dos primeros niveles.

COLUMNAS: EX			P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton-m)	
EJE	*NIVEL	Perfil	SIN DVE R=5	CON DVE R=3	SIN DVE R=5	CON DVE R=3	SIN DVE R=5	CON DVE R=3
A	1	W24X146	74.70	70.60	16.63	17.16	58.37	59.25
A	4	W24X131	35.61	31.94	14.54	13.67	26.75	24.01
A	7	W24X94	7.51	6.16	7.28	5.90	8.41	5.36
B	1	W27X217	3.12	30.72	31.51	32.37	110.34	111.79
B	4	W27X146	1.94	15.61	25.67	23.56	44.83	39.66
B	7	W27X102	0.70	2.56	13.16	10.43	16.77	11.51

*Se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado

Tabla 7.6 Comparación de fuerzas en columnas entre pórtico convencional (R=5) y pórtico con DVE (R=3)

COLUMNAS: EX			% Reducción		
EJE	*NIVEL	Perfil	P (Ton)	V2 (Ton)	M3 (Ton-m)
A	1	W24X146	5%	-3%	-2%
A	4	W24X131	10%	6%	10%
A	7	W24X94	18%	19%	36%
B	1	W27X217	-	-3%	-1%
B	4	W27X146	-	8%	12%
B	7	W27X102	-	21%	31%

*Se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado

Tabla 7.7 Porcentaje de reducción de V2 y M3 en columnas del pórtico con DVE (R=3)

VIGAS: EX			P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton-m)	
*EJE	NIVEL	Perfil	SIN DVE R=5	CON DVE R=3	SIN DVE R=5	CON DVE R=3	SIN DVE R=5	CON DVE R=3
A	1	W21X83	1.03	0.96	11.90	11.95	31.21	31.35
C	2	W21X83	0.00	0.00	14.05	14.01	37.07	36.98
E	3	W21X83	2.24	1.88	14.15	13.62	38.41	36.91
A	4	W18X71	2.06	1.79	10.35	9.67	27.14	25.36
E	5	W18X71	1.78	1.46	9.57	8.70	26.00	23.62
E	6	W18X71	1.91	1.46	8.24	7.26	22.46	19.74
A	7	W18X46	0.70	0.50	4.32	3.58	11.36	9.44
A	8	W18X46	1.11	0.70	3.00	2.42	7.81	6.31

*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado

Tabla 7.8 Comparación de fuerzas en columnas entre pórtico convencional (R=5) y pórtico con DVE (R=3)

VIGAS: EX			V2 (Ton)	M3 (Ton-m)
*EJE	NIVEL	Perfil	% Reducción	% Reducción
A	1	W21X83	0%	0%
C	2	W21X83	0%	0%
E	3	W21X83	4%	4%
A	4	W18X71	7%	7%
E	5	W18X71	9%	9%
E	6	W18X71	12%	12%
A	7	W18X46	17%	17%
A	8	W18X46	20%	19%

*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado

Tabla 7.9 Porcentaje de reducción de V2 y M3 en vigas del pórtico con DVE (R=3)

7.3.2. Deformaciones Laterales y Revisión de Derivas inelásticas

En la Tabla 7.10, se muestra que las derivas cumplen con lo requerido en el NEC-11 que pide que las derivas inelásticas sean menores al 2%. Además podemos observar que al comparar las deformaciones del pórtico convencional (usando R=6) con el pórtico con DVE (usando R=3), estas son muy similares pero las derivas inelásticas se han disminuido casi a la mitad, remarcando la eficiencia del uso de disipadores viscoelásticos.

PÓRTICO SIN DVE, R=5						CON DVE, R=3	
NIVEL	Defor. X (cm)	h (cm)	0.75R	Δ_M	< 2%	Defor. X (cm)	Δ_M
8	9.67	300.00	3.75	1.06%	OK	8.88	0.52%
7	8.82	300.00	3.75	1.41%	OK	8.19	0.71%
6	7.69	300.00	3.75	1.60%	OK	7.24	0.85%
5	6.41	300.00	3.75	1.80%	OK	6.11	0.98%
4	4.97	300.00	3.75	1.81%	OK	4.80	1.01%
3	3.52	300.00	3.75	1.62%	OK	3.45	0.93%
2	2.22	300.00	3.75	1.51%	OK	2.21	0.89%
1	1.01	400.00	3.75	0.95%	OK	1.02	0.57%
PB	0.00					0.00	

Tabla 7.10 Deformaciones Laterales y Revisión de derivas inelásticas con DVE (I=1.5)

7.4. Alternativa 3: Rediseño del Pórtico de Acero usando DVE

El uso de disipadores viscoelásticos en el pórtico convencional disminuye las deformaciones laterales, las derivas inelásticas y las fuerzas internas tanto de vigas como de columnas. Con estas reducciones, las secciones asignadas a los elementos estructurales pueden ser consideradas sobredimensionadas, por lo que se buscará hacer más eficiente el diseño del pórtico y así obtener un buen diseño acompañado de la economía de la estructura.

7.4.1. Prediseño de los perfiles de acero de los elementos estructurales

A partir de las fuerzas que se obtuvieron del pórtico anterior usando DVE, se efectuó el prediseño de los nuevos perfiles metálicos. Se trató de disminuir el peso de la estructura pensando en la economía del pórtico. Las características de cada perfil se pueden revisar en el Anexo 3.

Los nuevos perfiles que se usan en el programa SAP2000 son:

PERFILES W			
PISO	ELEMENTOS		
	VIGAS	COLUMNAS INTERIORES	COLUMNAS DE BORDE
8	W18X40	W27X94	W24X94
7	W18X40	W27X94	W24X94
6	W18X46	W27X114	W24X94
5	W18X46	W27X114	W24X94
4	W18X46	W27X114	W24X94
3	W21X50	W27X146	W24X131
2	W21X50	W27X146	W24X131
1	W21X50	W27X146	W24X131

Tabla 7.11 Nuevos perfiles de acero de vigas y columnas

7.4.2. Rediseño de los disipadores viscoelásticos

Se realiza nuevamente el diseño de los disipadores viscoelásticos porque el comportamiento dinámico de la estructura con los nuevos perfiles asignados sufre cambios.

El periodo fundamental de la nueva configuración estructural sin ningún DVE, es igual a: 1.6519 seg. La estructura con nuevos perfiles tiene un peso menor al anterior igual a: 1117.59 Ton.

En la Tabla 7.12 se detalla los cálculos realizados para hallar las nuevas propiedades mecánicas del disipador viscoelástico:

T (seg)	ω (rad/seg)	peso (ton)	masa (ton*seg ² /m)	k (Ton/m)	ζ	c (Ton s/m)	θ (rad)	θ (grado)
1.6519	3.804	1117.59	113.92	1648.18	0.02	17.333	0.464	26.565

G' (ksi)	G'' (ksi)	G' (Ton/m ²)	G'' (Ton/m ²)	n	ζ adicional	k' (Ton/m)	h (m) dos capas	Área (m ²)
0.13	0.15	91.59	105.68	1.15	0.20	874.54	0.044	0.4201

c' (Ton s/m)	k'x (Ton/m)	c'x (Ton s/m)	\bar{k} (Ton/m)	\bar{c} (Ton s/m)	$\bar{\zeta}$
265.298	699.63	212.24	2347.81	229.57	0.22

Tabla 7.12 Diseño de nuevos disipadores viscoelásticos

Se observa que se pudo obtener un factor de amortiguamiento crítico de 22%. Los módulos de almacenamiento y pérdida de cortante disminuyeron porque el periodo de la estructura aumentó. El área necesaria de las capas de material viscoelástico es menor y el espesor aumentó a 2.2 cm cada capa para cumplir con el límite de 100% de deformación unitaria.

Las propiedades mecánicas de los disipadores viscoelásticos que son necesarias para modelar en SAP2000 se redujeron a:

$$k'_x = 699.63 \text{ Ton/m}$$

$$c'_x = 212.24 \text{ Ton s/m}$$

7.4.3. Análisis y Diseño del Nuevo Pórtico de Acero con DVE

Se realiza un análisis lineal con Espectro de Diseño tal como se estudió en el Capítulo 4 y en el Capítulo 5, con las nuevas propiedades de los disipadores viscoelásticos y con las nuevas secciones de vigas y columnas.

7.4.3.1. Análisis Modal del Nuevo Pórtico de Acero con DVE

Tal como en los capítulos anteriores, la masa participativa se consideró la suma de 100% de la carga muerta y 25% de la carga viva y se consideraron 12 modos de vibración libre de la estructura.

Modo de vibración	Período seg.	Masa X	Masa X acumulada
1	1.5229	0.7968	0.7968
2	0.4962	0.1190	0.9159
3	0.2648	0.0430	0.9589
4	0.1653	0.0000	0.9589
5	0.1651	0.0218	0.9806
6	0.1615	0.0003	0.9809
7	0.1531	0.0000	0.9809
8	0.1488	0.0000	0.9809
9	0.1235	0.0000	0.9809
10	0.1235	0.0000	0.9810
11	0.1137	0.0108	0.9918
12	0.0848	0.0049	0.9967

Tabla 7.13 Masa modal acumulada en dirección X del nuevo pórtico con DV

7.4.3.2. Deformaciones laterales y revisión de derivas inelásticas del nuevo pórtico con DVE

PÓRTICO CON DVE, REDISEÑO						SIN DVE	
NIVEL	Deformación X (cm)	h (cm)	0.75R	Δ_M	< 2%	Deformación X (cm)	Δ_M
8	12.91	300.00	2.25	0.64%	OK	16.11	1.06%
7	12.06	300.00	2.25	0.94%	OK	14.69	1.41%
6	10.81	300.00	2.25	1.20%	OK	12.82	1.60%
5	9.21	300.00	2.25	1.43%	OK	10.69	1.80%
4	7.31	300.00	2.25	1.51%	OK	8.28	1.81%
3	5.30	300.00	2.25	1.46%	OK	5.87	1.62%
2	3.35	300.00	2.25	1.38%	OK	3.71	1.51%
1	1.51	400.00	2.25	0.85%	OK	1.69	0.95%
PB	0.00					0.00	

Tabla 7.14 Deformaciones laterales y revisión de derivas inelásticas del nuevo pórtico con DVE

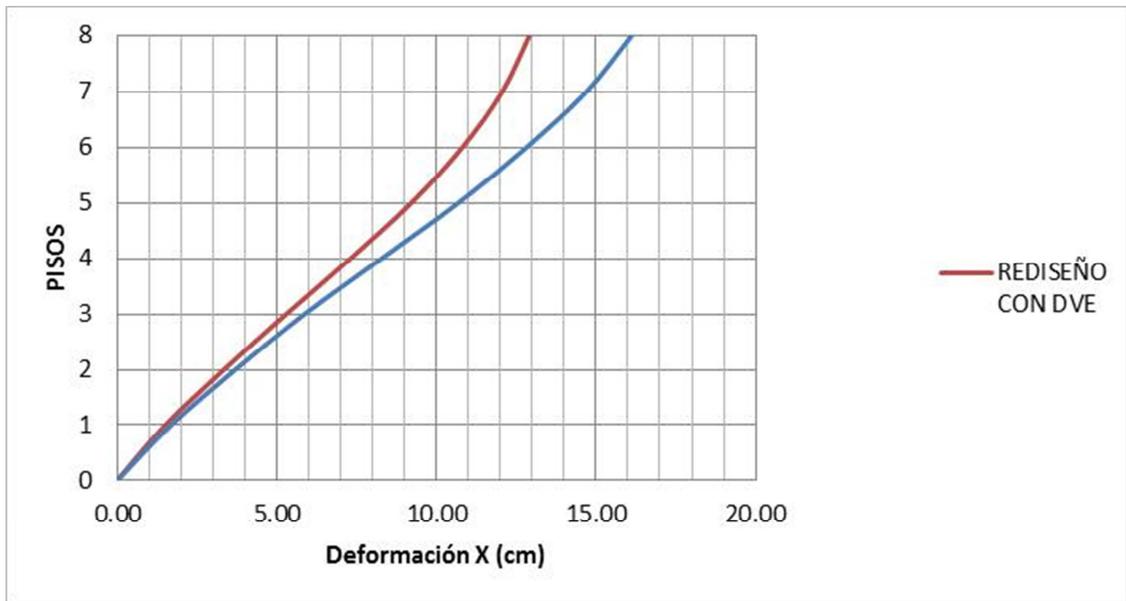


Figura 7.1 Comparación de Deformaciones X del pórtico original sin DVE y rediseño del pórtico con DVE

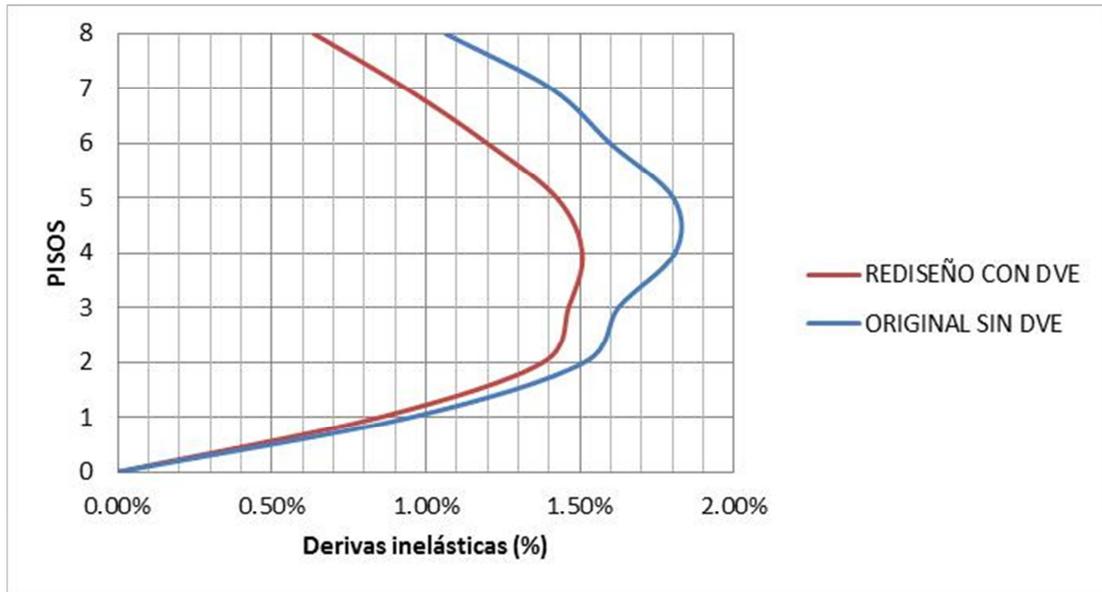


Figura 7.2 Comparación de Deformaciones X del pórtico original sin DVE y rediseño del pórtico con DVE

El nuevo diseño cumple con los límites impuestos por el NEC-11. Todas las derivas inelásticas resultaron menores al 2%. Las deformaciones laterales y las derivas inelásticas resultaron menores en el rediseño con DVE que en el pórtico convencional.

7.4.3.3. Revisión del Nuevo Diseño Estructural con DVE

Tal como se hizo en los capítulos anteriores en el análisis lineal, el diseño de los elementos fue comprobado con la opción de SAP2000, *Start Design/Check of Structure* con el código de diseño AISC 360-05/IBC2006. Los resultados fueron satisfactorios:

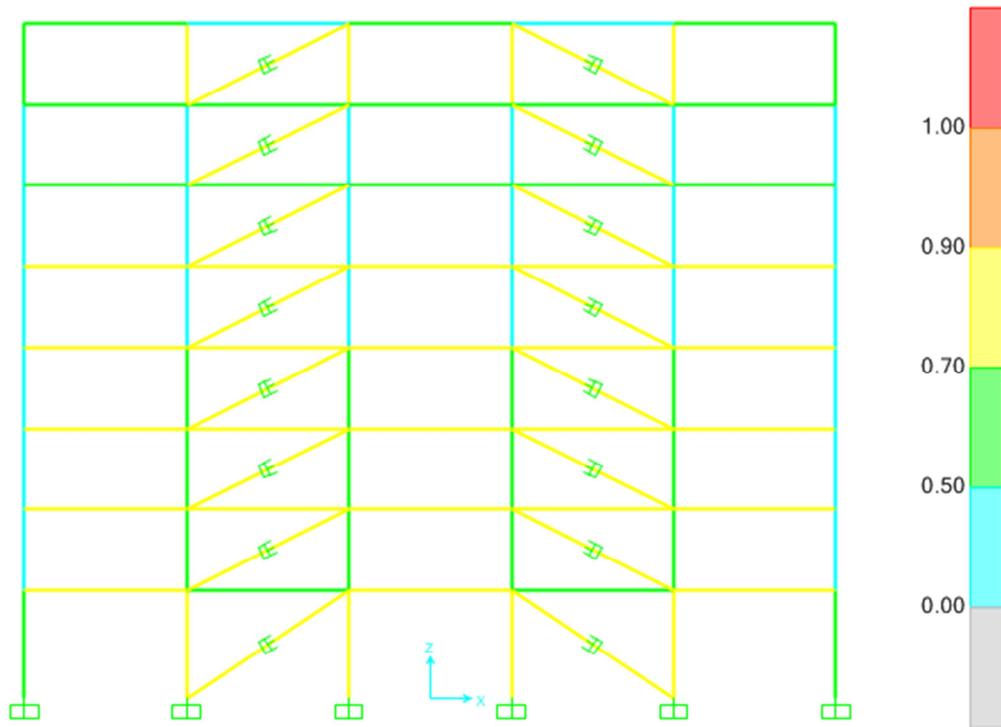


Figura 7.3 Resultados de la Revisión del nuevo diseño estructural con DVE

Los factores de en ningún parámetro de diseño excedió a la unidad, como se muestra en la Figura 7.3. En la Tabla A7.1 del Anexo 7, se pueden observar los factores críticos para cada elemento estructural.

Se indica los factores de la revisión PMM Demanda/Resistencia para ciertos elementos estructurales en la Tabla 7.15 para columnas y en la Tabla 7.16 para las vigas. En el Anexo 7 se puede ver con mayor detalle el cálculo del factor Demanda/Resistencia.

EJE	*NIVEL	Elemento	Perfil	Factor	Tipo de Revisión
A	1	COL	W24X131	0.70	PMM
A	4	COL	W24X94	0.48	PMM
A	7	COL	W24X76	0.28	PMM
B	1	COL	W27X146	0.83	PMM
B	4	COL	W27X114	0.55	PMM
B	7	COL	W27X94	0.26	PMM
*NIVEL: se refiere a la columna que se encuentra debajo del eje indicado					

Tabla 7.15 Resultados de revisión de diseño PMM de las columnas del pórtico nuevo con DVE

*EJE	NIVEL	Elemento	Perfil	Factor	Tipo de Revisión
A	1	VIGA	W21X50	0.73	PMM
C	2	VIGA	W21X50	0.79	PMM
E	3	VIGA	W21X50	0.83	PMM
A	4	VIGA	W18X46	0.83	PMM
E	5	VIGA	W18X46	0.77	PMM
E	6	VIGA	W18X46	0.68	PMM
A	7	VIGA	W18X40	0.63	PMM
A	8	VIGA	W18X40	0.50	PMM
*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado					

Tabla 7.16 Resultados de revisión de diseño PMM de las vigas del pórtico nuevo con DVE

7.4.4. Análisis Modal no lineal Tiempo–Historia del Rediseño del Pórtico con DVE

Para revisar el comportamiento de la nueva estructura ante un evento sísmico, se ha realizado un análisis modal no lineal Tiempo-Historia similar al Capítulo 6. A continuación se detallan los resultados obtenidos del modelo en SAP2000 del comportamiento de la nueva estructura usando disipadores viscoelásticos y se los compara con la estructura original sin disipadores viscoelásticos. Para el análisis no lineal también se ingresaron las propiedades de los disipadores como no lineales como se explicó en el Capítulo 6.

7.4.4.1. Distribución de Energía

En la Tabla 7.17, se observa que la Energía Modal de Amortiguamiento es menor cuando se usa DVE ya que estos últimos aportan al amortiguamiento de la estructura. La Tabla 7.18 muestra una comparación del porcentaje de la Energía de Entrada absorbido por la Energía Modal de Amortiguamiento y los disipadores VE.

REDISEÑO CON DVE	ENERGÍA (Ton - m)				
	Entrada	Cinética	Potencial	Amortig. Modal	DVE
GYE 93 - CENTENARIO	38.06	11.76	5.61	20.58	17.32
% E. Entrada	100%	31%	15%	54%	46%

Tabla 7.17 Distribución de Energía en Pórtico rediseñado con DVE

	ENERGÍA	
	Amortiguamiento Modal	DVE
PÓRTICO SIN DVE	91%	-
PÓRTICO CON DVE	48%	51%
REDISEÑO CON DVE	54%	46%

Tabla 7.18 Porcentaje de Energía de Entrada absorbida

Las siguientes figuras permiten una mayor comprensión de los porcentajes distribución de energía visto en las tablas anteriores, donde se detalla la Energía de Entrada (color naranja), Energía Cinética (color verde), Energía Potencial (color azul), Energía Modal de Amortiguamiento (color rojo) y Energía disipada por los DVE (color negro).

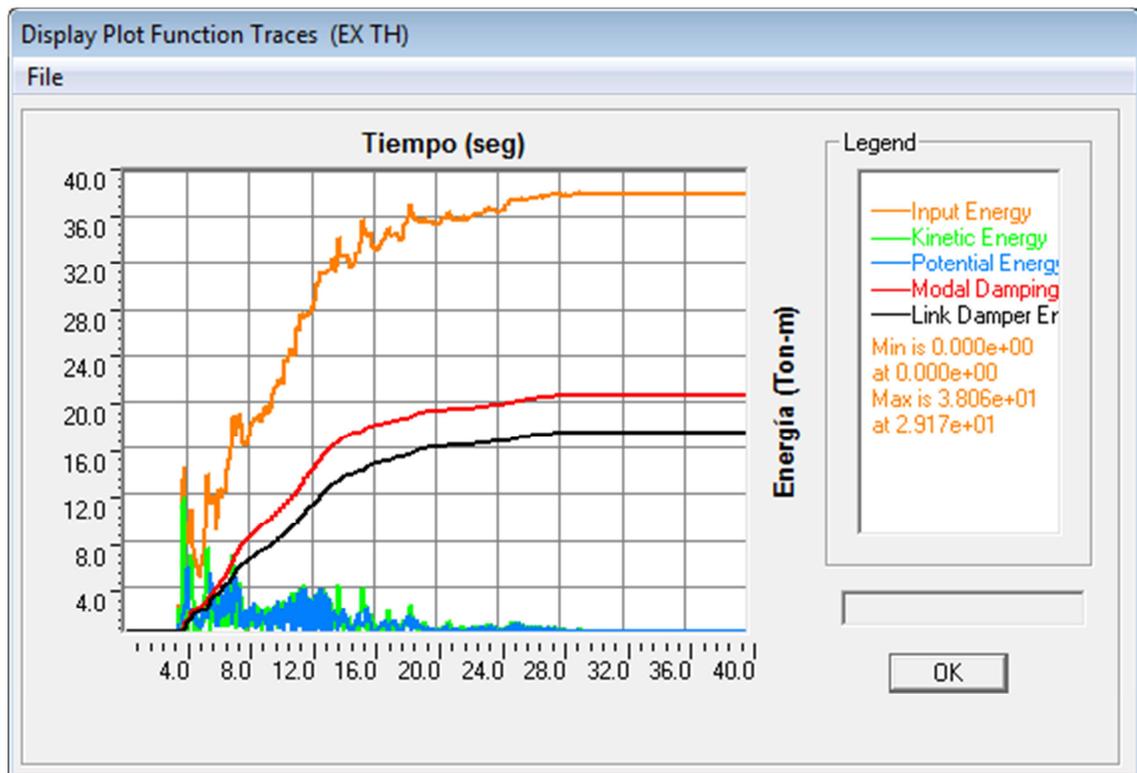


Figura 7.4 Distribución de Energía en pórtico rediseñado

7.4.4.2. Histéresis de los Nuevos Disipadores Viscoelásticos

En la Figura 7.5 se indica una deformación máxima de 1.46 cm. Al calcular la deformación unitaria del material viscoelástico de 2.2 cm de espesor, resulta: $1.46/2.2 = 66\% < 100\%$, lo cual cumple con lo expuesto por Chang (et als, 2012) en el subcapítulo 3.4. En el Anexo 9 se puede revisar las fuerzas axiales y deformaciones de los nuevos disipadores viscoelásticos.

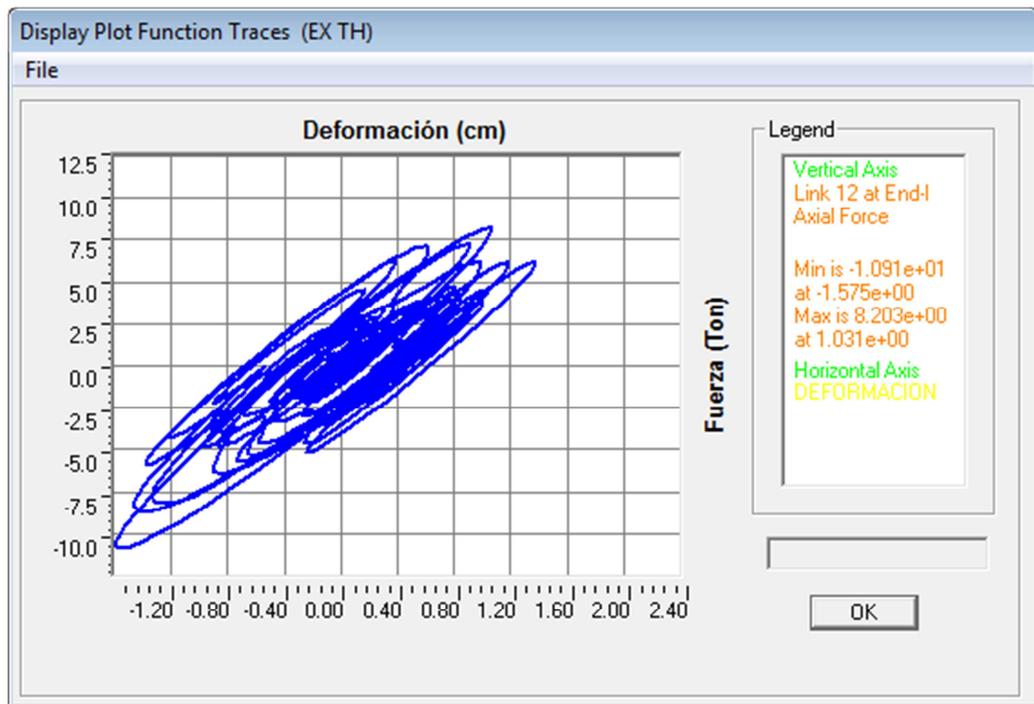


Figura 7.5 Histéresis elíptica del nuevo disipador viscoelástico D12

7.4.4.3. Deformaciones Laterales

Las deformaciones laterales máximas con respecto al pórtico original sin DVE, son similares como se aprecia en la Tabla 7.19. Se ha comparado nuevamente los resultados a los 15.45 segundos del pórtico rediseñado con DVE y el pórtico

original sin DVE; los resultados se ven en la Tabla 7.20 y en la Figura 7.6 y Figura 7.7.

	SIN DVE	REDISEÑO
Nivel	Def. x (cm)	Def. x (cm)
8	11.47	11.01
7	8.96	9.00
6	6.99	7.06
5	5.92	5.83
4	4.72	5.06
3	3.40	4.18
2	2.21	3.03
1	1.12	1.52

Tabla 7.19 Envolvente de deformaciones en rediseño con DVE – Análisis Tiempo-Historia

TIEMPO: 15.45 seg		ORIGINAL SIN DVE		REDCON DVE		% REDUCCIÓN	
Nivel	h (cm)	Def. x (cm)	Δ_M	Def. x (cm)	Δ_M	Def. x	Δ_M
8	300.00	7.63	0.09%	4.13	0.10%	46%	-10%
7	300.00	7.35	0.18%	3.83	0.15%	48%	16%
6	300.00	6.80	0.30%	3.37	0.20%	51%	31%
5	300.00	5.92	0.40%	2.76	0.23%	53%	41%
4	300.00	4.72	0.44%	2.05	0.23%	57%	48%
3	300.00	3.40	0.41%	1.36	0.19%	60%	53%
2	300.00	2.16	0.39%	0.78	0.15%	64%	61%
1	400.00	0.98	0.25%	0.32	0.08%	68%	68%

Tabla 7.20 Comparación de Deformaciones laterales y Derivas entre pisos – Análisis Tiempo-Historia

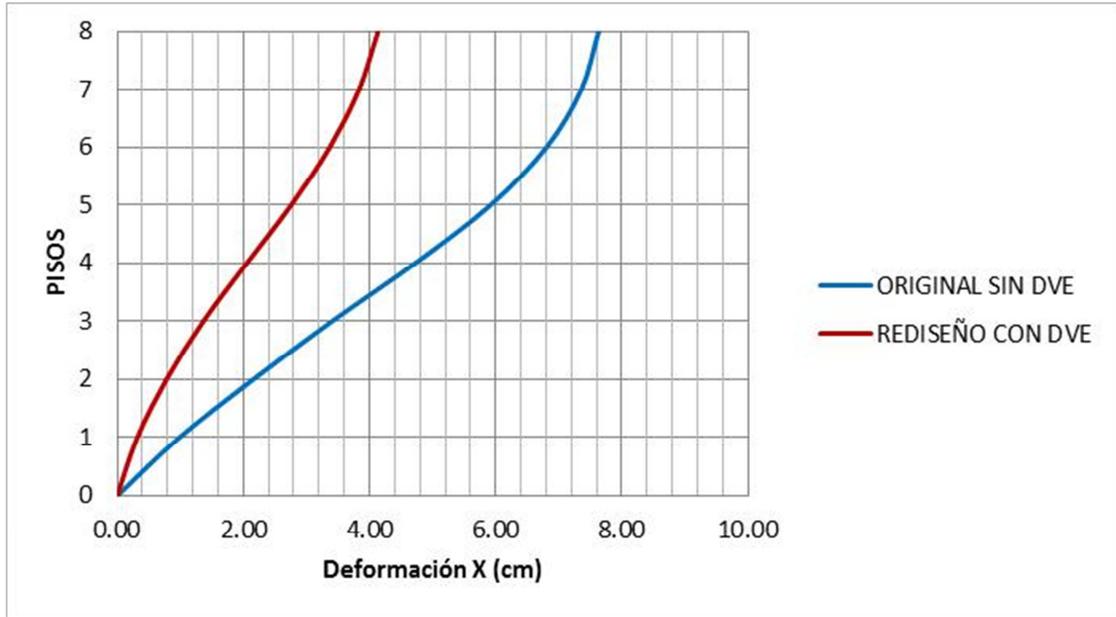


Figura 7.6 Comparación de Deformaciones X del pórtico original sin DVE y rediseño del pórtico con DVE – Análisis Tiempo-Historia

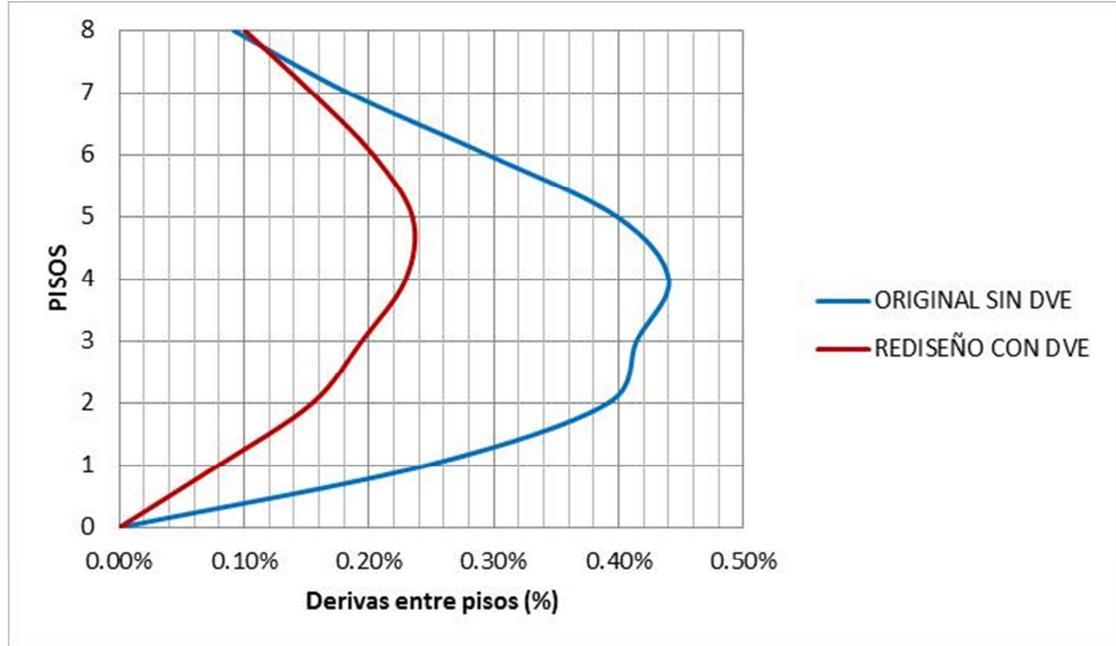


Figura 7.7 Comparación de Derivas entre pisos del pórtico original sin DVE y rediseño del pórtico con DVE – Análisis Tiempo-Historia

7.4.4.4. Fuerzas en Columnas

Se detallan las fuerzas en columnas del pórtico con secciones rediseñadas usando DVE y se las compara con el pórtico original sin DVE. Tal como se explica en capítulos anteriores, el uso de DVE provoca una redistribución de cargas axiales en las columnas interiores, pero este cambio no afecta al elemento debido a que su capacidad es elevada.

COLUMNAS		P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton-m)		% REDUCCIÓN		
EJE	*NIVEL	SIN DVE	REDISEÑO	SIN DVE	REDISEÑO	SIN DVE	REDISEÑO	P	V2	M3
A	1	79.87	55.00	28.73	28.84	91.79	94.55	31%	0%	-3%
A	4	61.52	43.44	22.71	14.91	44.50	37.14	29%	34%	17%
A	7	22.63	16.52	22.03	14.55	41.94	27.67	27%	34%	34%
B	1	4.29	24.69	54.07	41.77	172.71	132.09	-	23%	24%
B	4	2.59	19.21	38.45	25.91	72.66	60.44	-	33%	17%
B	7	1.10	5.97	36.87	25.93	67.96	46.94	-	30%	31%

*Se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado

Tabla 7.21 Fuerza en Columnas en rediseño con DVE – Análisis Tiempo-Historia

7.4.4.5. Fuerzas en Vigas

Se detallan las fuerzas en vigas del pórtico con secciones rediseñadas usando DVE y se las compara con el pórtico original sin DVE. Se observa en la tabla que existe reducción en todas las fuerzas. El aumento en vez de la disminución de carga axial en la viga del nivel 1 no es representativo y no afecta a la viga puesto que sigue siendo muy pequeño.

VIGAS		P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton-m)		% REDUCCIÓN		
*EJE	NIVEL	SIN DVE	REDISEÑO	SIN DVE	REDISEÑO	SIN DVE	REDISEÑO	P	V2	M3
A	1	1.52	2.20	16.59	11.03	43.51	28.90	-45%	34%	34%
C	2	0.00	0.00	16.16	8.92	42.65	23.66	0%	45%	45%
E	3	3.19	1.39	17.84	9.18	48.46	24.90	56%	49%	49%
A	4	2.63	1.23	13.27	9.57	34.79	25.21	53%	28%	28%
E	5	2.84	1.17	14.91	9.88	40.54	26.76	59%	34%	34%
E	6	3.82	1.38	15.73	10.57	42.87	28.65	64%	33%	33%
A	7	1.94	0.97	11.89	8.73	31.28	23.06	50%	27%	26%
A	8	3.30	1.47	9.54	6.86	24.85	18.03	56%	28%	27%

*Se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado

Tabla 7.22 Fuerza en Vigas en rediseño con DVE – Análisis Tiempo-Historia

7.4.5. Comparación económica de pórticos diseñados

El rediseño del pórtico de acero ha sido realizado con perfiles de acero que son menos pesados que los anteriores, resultando una estructura más liviana y económica con respecto a la cantidad de acero usado en el pórtico. En la Tabla 7.23 se visualiza una comparación de pesos y costos estimados de ambos pórticos.

COMPARACIÓN CANTIDADES - COSTO DE ACERO	
PÓRTICO CONVENCIONAL	NUEVO PÓRTICO CON DVE
58.59 Ton	42.39 Ton
58593.3 Kg	42385.8 Kg
3 \$/Kg	3 \$/Kg
\$ 175,779.90	\$ 127,157.40
AHORRO	\$ 48,622.50
	28%

Tabla 7.23 Comparación Cantidades – Costo de Acero

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

El uso de disipadores viscoelásticos produjo la reducción de esfuerzos en los elementos estructurales, reducción de deformaciones laterales en cada piso y disminución de derivas entre pisos, debido a la acción de una carga sísmica.

En las columnas, la fuerza cortante y el momento flector originadas por la carga sísmica, disminuyen cuando se agrega disipadores viscoelásticos (DVE) a la estructura. En el caso de las fuerzas axiales, la reducción no ocurre en todos los elementos. Las fuerzas axiales se redistribuyen con el uso de DVE, haciendo que las columnas interiores reciban mayor carga axial que en el caso convencional sin DVE, y que la carga axial en las columnas laterales disminuya. Este último resultado es el mayor beneficio para la estructura, puesto que en el pórtico sin DVE, las columnas laterales eran las más esforzadas y las columnas interiores recibían una carga axial muy baja. Hay que recalcar que la nueva carga axial que reciben las columnas interiores no es una mayor amenaza comparada a la capacidad que poseen.

En las vigas, cuando se agregan DVE al pórtico, todas las fuerzas internas disminuyen: fuerzas axiales, fuerzas cortantes y momentos flectores provocados por la carga sísmica.

Los esfuerzos de los elementos estructurales debido a cargas gravitacionales no se ven alterados al agregar DVE.

La función de los DVE fue comprobada usando un Análisis lineal con un Espectro de Diseño y con un Análisis Modal no lineal Tiempo – Historia (FNA) usando un registro del suelo característico de Guayaquil, pero la eficiencia de los DVE en la reducción de esfuerzos no es la misma. Primero se debe indicar que los esfuerzos y deformaciones laterales obtenidos en el pórtico convencional sin DVE con el Espectro de diseño resultaron mayores que los obtenidos en el Análisis no lineal Tiempo-Historia.

Cuando se realizó el análisis lineal con Espectro de Diseño en el pórtico con DVE se presentaron reducciones de esfuerzos, deformaciones laterales y derivas inelásticas en el orden del 40% al 50% aproximadamente; pero cuando se realizó el análisis modal no lineal Tiempo-Historia (FNA), las reducciones de esfuerzos en columnas alcanzaron un máximo del 22% y en vigas del 16%, dependiendo de la ubicación del elemento ya que algunos casos presentaron disminución insignificante o incrementos de esfuerzos. En el caso de las deformaciones máximas para cada piso con el análisis no lineal, se logró una reducción hasta 17%, pero hay que tener en cuenta que estos valores máximos no ocurren al mismo tiempo. Si se realiza una comparación tanto deformaciones laterales como de derivas entre pisos para un tiempo determinado, se observa que se alcanzan reducciones entre el 40 al 50%, similar a lo que ocurre en el análisis lineal con Espectro de Diseño.

La comparación de distribución de energía entre el pórtico convencional y con DVE, usando el análisis no lineal Tiempo-Historia, nos indica que los disipadores viscoelásticos sí cumplen el objetivo de reducir los daños en la estructura, ya que la Energía Modal de Amortiguamiento propio de la estructura disminuye de 91% a 48% de la Energía de Entrada, ya que los DVE llegan a disipar el 51%.

La histéresis formada por los disipadores viscoelásticos resultaron ser de forma elíptica al graficar las fuerzas contra las deformaciones tal como lo indicaban los diferentes autores citados en este trabajo de grado.

Las alternativas de análisis y diseño presentadas entregan ventajas tanto técnicas como económicas. Los disipadores viscoelásticos otorgan mayor seguridad a la estructura, y permite ser analizadas para situaciones sísmicas más críticas manteniendo diseños más sencillos como es el caso de la Alternativa 1 que mostró que la estructura estudiada con las secciones analizadas podía ser considerada como una edificación esencial y/o peligrosa si se comparan esfuerzos y deformaciones. Además si nos basamos en la Alternativa 2 nos indica que la adición de DVE a la estructura permite que esta sea analizada y diseñada para un factor de reducción inelástica R menor, es decir, se puede diseñar la estructura considerando una menor ductilidad. Finalmente, la Alternativa 3 nos muestra que agregar DVE nos representa una ventaja económica, al permitir el uso de secciones más livianas. Aunque hubo un porcentaje considerable de ahorro en cantidad de acero, existe la posibilidad que este porcentaje sea igualado o superado por los costos que significa el uso de disipadores viscoelásticos.

Si en algún momento resulta con mayor costo estructural el pórtico con DVE, el verdadero beneficio de usar estos se observaría en el momento de un gran evento sísmico, ya que una estructura con DVE sufrirá menos daños que una estructura convencional que puede presentar deformaciones y daños excesivos cuyas reparaciones tengan costos elevados o en el peor de los casos tenga que ser demolida porque no puede ser utilizada.

8.2. Recomendaciones

Se recomienda realizar un modelo físico del disipador viscoelástico para comprobar las propiedades mecánicas del mismo en la ciudad de Guayaquil en función de la frecuencia y la temperatura y así confirmar su comportamiento, además de revisar que las deformaciones unitarias del material viscoelástico no exceden el límite de 100%, y si dicho valor es el más recomendado para el control de deformaciones unitarias ya que diferentes autores (Chang, et al., 1996; Kelly, 2001; Villaverde, 2009) no coinciden en el mismo límite.

Se necesitan más estudios acerca del número necesario de disipadores por piso, inclinación y distribución de los mismos, para hacer más eficiente la disipación de energía y reducción de daños. Este estudio no se debería quedar en un pórtico en dos dimensiones sino llevarlo a un pórtico de tres dimensiones más cercano a la realidad.

En este trabajo se ha limitado a encontrar las propiedades de rigidez y amortiguamiento del disipador viscoelástico para poder modelar su comportamiento en el modelo en el programa SAP2000. No se ha detallado características del disipador como las placas de acero que son unidas mediante el DVE, ni el arriostramiento que lo sostiene. Con las cargas axiales halladas para cada disipador se puede diseñar el arriostramiento que lo conecta al marco estructural.

Se debe hacer un estudio de mercado acerca del costo de los disipadores para hacer una comparación más detallada que nos pueda indicar si representa un beneficio económico usar disipadores viscoelásticos o mantenernos con el diseño convencional. También resulta útil realizar un

estudio sobre los materiales que puedan tener las propiedades mecánicas necesarias para poder ser usados en el disipador.

La cantidad de registros sísmicos de la ciudad de Guayaquil son escasos, lo que impide hacer un análisis no lineal Tiempo-Historia más profundo. Incluso el registro sísmico utilizado en este trabajo tuvo que ser escalado para representar mejor una mayor amenaza sísmica.

Se recomienda analizar y diseñar estructuras de hormigón armado usando DVE, además de estudiar estructuras ya existentes en la ciudad de Guayaquil con la adición de disipadores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aiken, I.; Nims, D.; Whittaker, A. & Kelly, J. (1993). Testing of passive energy dissipation systems. *Earthquake Spectra Vol. 9 (3)*, 1993. Extraído de http://www.siecorp.com/publications/papers/ida_1993a.pdf
- American Institute of Steel Construction (2005). Specification for Structural Steel Buildings (AISC 360-05). Load and Resistance Factor Design (LRFD). Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction
- American Institute of Steel Construction (2005). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (AISC 341-05). Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction
- American Society of Civil Engineers (2010). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE 7-05). Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers
- Avilés, R. (2001), *Dispositivos para el control de vibraciones*. Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile. Extraído de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2001/bmfcia958d/doc/bmfcia958d.pdf>
- Balart, R. (2007). *Modelo de Kelvin-Voigt de Comportamiento Viscoelástico*. © UPV. Extraído de https://www.youtube.com/watch?v=FQwdnGV9r-M&feature=youtube_gdata_player
- Bozzo, L. & Barbat, A. (2004). Diseño sismorresistente de edificios: Técnicas convencionales y avanzadas. Barcelona: Editorial Reverté
- Chang K., Chen S. & Lai M. (1996). Abstracto de *Inelastic Behavior of Steel Frames with Added Viscoelastic Dampers*. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, No. 10, October 1996, p. 1178-1186. American Society of Civil Engineering. Extraído de <http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?102512>
- Chopra, A. (2001), *Dynamic of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (2nd ed). California: Prentice Hall
- CSI Analysis Reference Manual: For SAP2000, Etabs, Safe And CSI Bridge
- CSI Knowledge Base. Extraído de <https://wiki.csiberkeley.com/display/kb/Home>

- Falk, P. (2010), *Análisis del comportamiento de estructuras de acero provistas de disipadores de energía tipo "Slotted Bolted Connection"*. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Extraído de http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cf-falk_pq/pdfAmont/cf-falk_pq.pdf
- Grigorian, C. & Popov E.(1994). *Energy Dissipation with Slotted Bolted Connections*. Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- Jímenez, M. (2007), *Análisis Experimental de un Disipador de Energía Viscoelástico*. Carrera de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica del Ejército.
- Kelly, T. (2001). *In-Structure Damping and Energy Dissipation -Design Guidelines*, Holmes Consulting Group Ltd. Wellington, Nueva Zelanda. Extraído de <http://www.holmesgroup.com/assets/Uploads/pdfs/www.holmesgroup.comdesignguidesDamperDesignGuidelines-TOC.pdf>
- Kitamura, H.; Teramoto, T.&Kobori, T. (1991). *Advanced technology in response control of high-rise buildings*. Second Conference on Tall Building in Seismic Regions, Los Angeles, Mayo 1991.
- Lai, M.; Lu, P.; Lunsford, D.; Kasai, K.; Chang, K. (1996). *Viscoelastic Damper: A Damper with Linear or Non-Linear Material?*. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering.Paper No. 795. Extraído de http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/11_795.PDF
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. NEC – 11. *Capítulo 1: Cargas y Materiales*
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. NEC – 11. *Capítulo 2: Peligro Sísmico y Requisitos de Diseño Sismo Resistente*
- Oviedo, A. &Duque, M. (2006). *Sistemas de Control de Respuesta Sísmica en Edificaciones*. Revista EIA, ISSN 1794-1237 (6), 105-120. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia). Extraído de <http://revista.eia.edu.co/articulos6/Articulo9.pdf>

- Oviedo, R. (2006). *Disipadores Viscosos vs. Disipadores Viscoelásticos*. II Congreso de Ingeniería Estructural, Sísmica y Puentes; Perú. Extraído de <http://atrapadoz.com/descargas/7.pdf>
- Soong, T. & Dargush G. (1997). *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. New York: John Wiley & Sons Ltd.
- Symans, M.; Charney, F.; Whittaker, A.;Constantinou, M.; Kircher, C.; Johnson, M. &McNamara, R. (2008). *Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments*. Journal of Structural Engineering ASC/ January 2008. Extraído de http://www.ce.berkeley.edu/~mahin/CE227web/EnergyDissipationSystem s-Symans-Charney-Whittaker_JSE_Jan08.pdf
- Taylor, D. P. & Katz, I. *Seismic protection with fluid viscous dampers for the Torre Mayor, a 57-story office tower in Mexico City, Mexico*. Extraído de <http://taylordevices.com/Tech-Paper-archives/literature-pdf/71-SeismicProtectionwithFVD.pdf>
- Villarreal, G. & Oviedo, R. (2008). *Edificaciones con Disipadores de Energía*. Extraído de <http://gennervillarrealcastro.blogspot.com/2012/07/libros-digitales-del-dr-genner.html>
- Villaverde, R. (2009). *Fundamental Concepts of Earthquake Engineering*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.

ANEXOS

Anexo 1 Espectros de diseño Elástico e Inelástico según NEC-11

ESPECTRO DE DISEÑO R=3, I=1

LOCALIZACIÓN	
Ciudad:	Guayaquil
Región:	Costa (sin Esmeraldas)
Zona:	5
z =	0.40 g
η =	1.80

SUELO Y FACTORES DE SITIO

Tipo de suelo:	E
r =	1.50
F_a =	1.15
F_d =	1.60
F_s =	1.90

PARÁMETROS DE DISEÑO

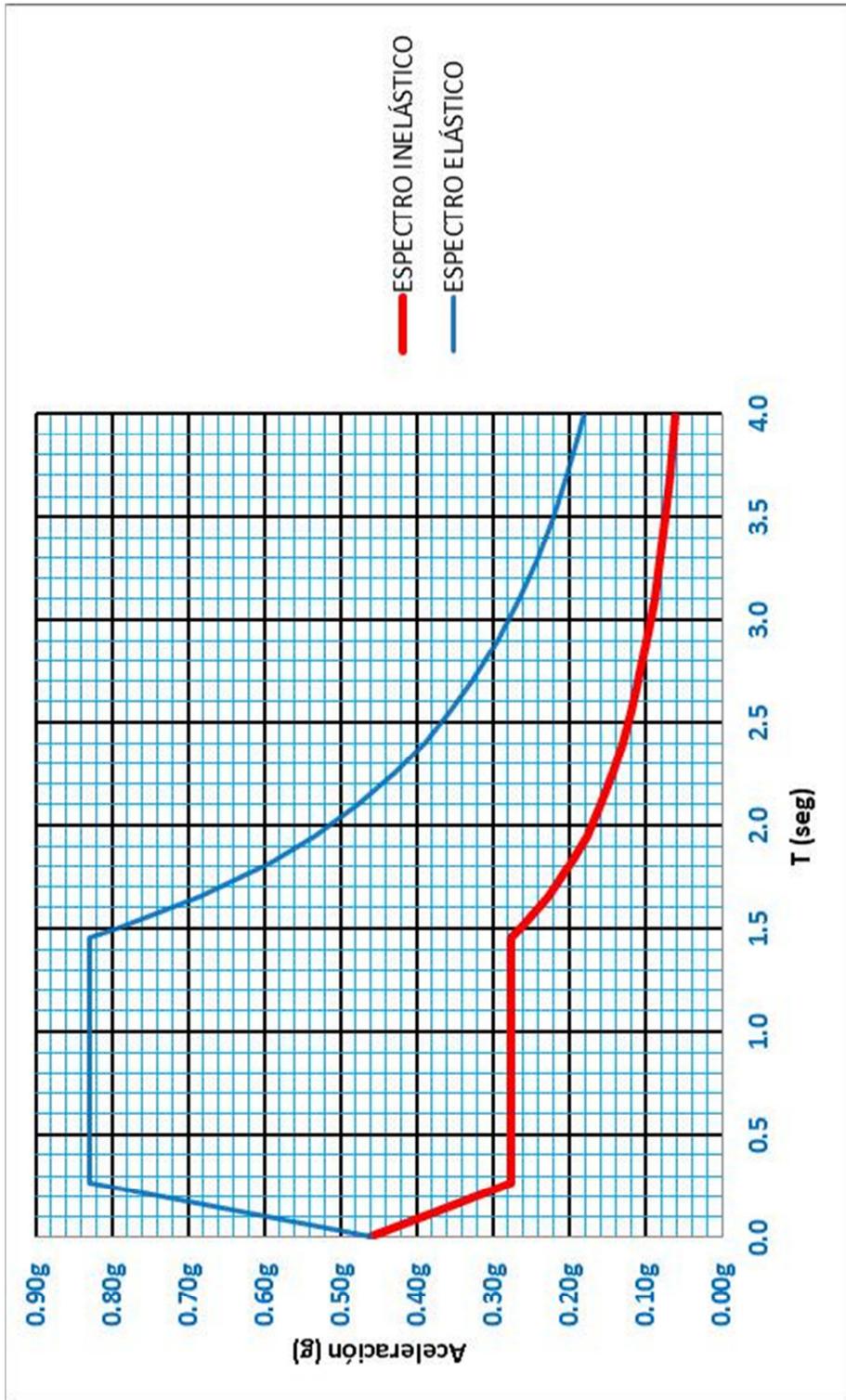
I =	1.00
R =	3.00
ϕ_p =	1.00
ϕ_E =	1.00

PERIODO CORTO Y PERIODO CRÍTICO

T_0 =	0.26 seg
T_c =	1.45 seg

COORDENADAS ESPECTRALES		
T (seg)	Aceleración	
	E. Elástico S_a (g)	E. Inelástico C_s (g)
0.00	0.460	0.460
0.13	0.644	0.368
0.26	0.828	0.276
0.86	0.828	0.276
1.45	0.828	0.276
1.50	0.790	0.263
1.65	0.685	0.228
1.80	0.601	0.200
1.95	0.533	0.178
2.10	0.477	0.159
2.25	0.430	0.143
2.40	0.390	0.130
2.55	0.356	0.119
2.70	0.327	0.109
2.90	0.294	0.098
3.10	0.266	0.089
3.30	0.242	0.081
3.50	0.222	0.074
3.70	0.204	0.068
3.90	0.188	0.063
4.10	0.175	0.058

ESPECTRO DE DISEÑO R=3, I=1



ESPECTRO DE DISEÑO R=3, I=1.5

LOCALIZACIÓN	
Ciudad:	Guayaquil
Región:	Costa (sin Esmeraldas)
Zona:	5
z =	0.4 g
η =	1.8

SUELO Y FACTORES DE SITIO

Tipo de suelo:		E
r =	1.5	
F_a =	1.15	
F_d =	1.6	
F_s =	1.9	

PARÁMETROS DE DISEÑO

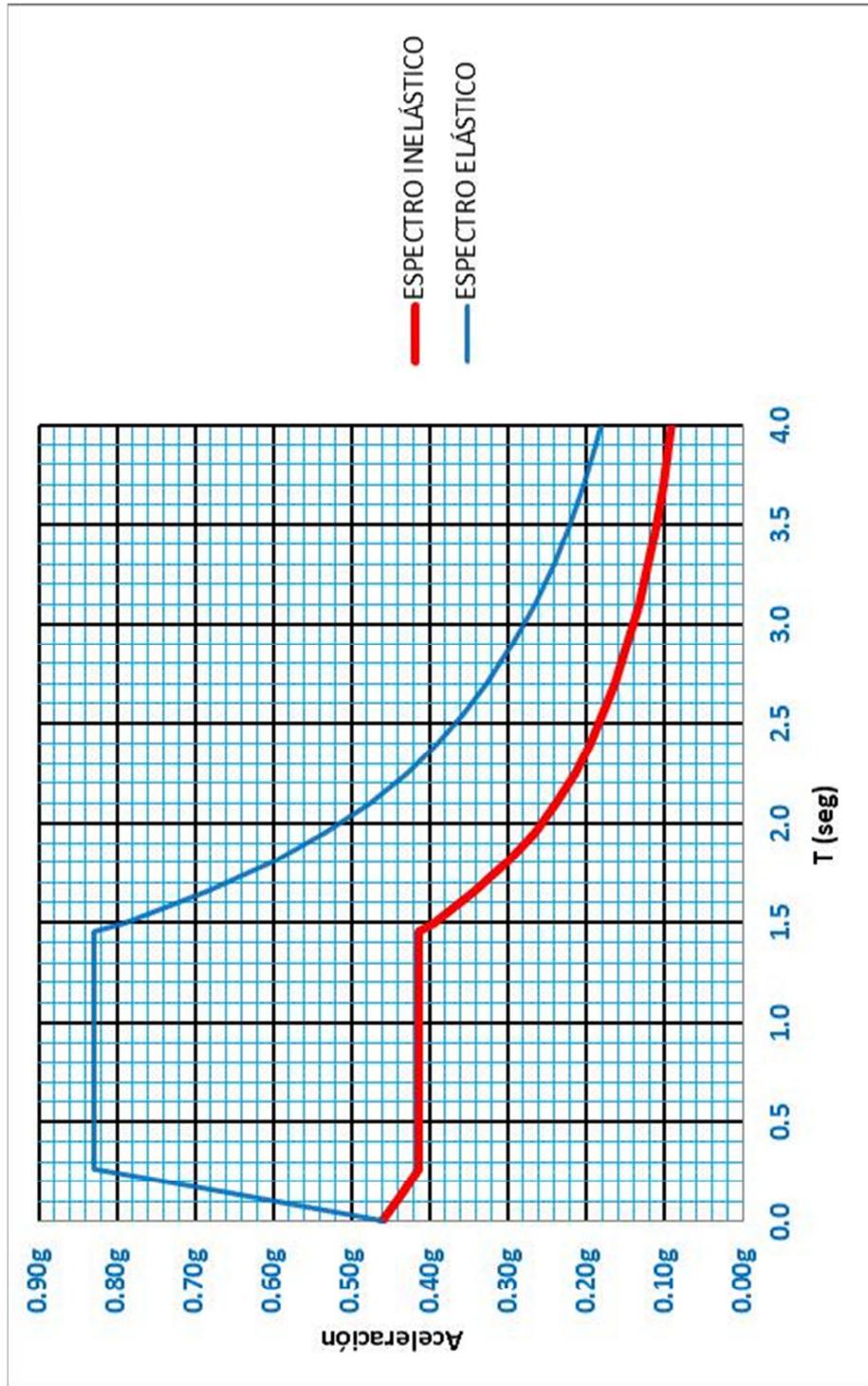
I =	1.50
R =	3.00
ϕ_P =	1.00
ϕ_E =	1.00

PERIODO CORTO Y PERIODO CRÍTICO

T_0 =	0.26 seg
T_c =	1.45 seg

COORDENADAS ESPECTRALES		
T (seg)	Aceleración	
	E. Elástico S_a (g)	E. Inelástico C_s (g)
0.00	0.460	0.460
0.13	0.644	0.437
0.26	0.828	0.414
0.86	0.828	0.414
1.45	0.828	0.414
1.50	0.790	0.395
1.65	0.685	0.342
1.80	0.601	0.301
1.95	0.533	0.267
2.10	0.477	0.238
2.25	0.430	0.215
2.40	0.390	0.195
2.55	0.356	0.178
2.70	0.327	0.164
2.90	0.294	0.147
3.10	0.266	0.133
3.30	0.242	0.121
3.50	0.222	0.111
3.70	0.204	0.102
3.90	0.188	0.094
4.10	0.175	0.087

ESPECTRO DE DISEÑO R=3, I=1.5



ESPECTRO DE DISEÑO R=5, I=1

LOCALIZACIÓN	
Ciudad:	Guayaquil
Región:	Costa (sin Esmeraldas)
Zona:	5
z =	0.4 g
η =	1.8

SUELO Y FACTORES DE SITIO

Tipo de suelo:		E
r =	1.5	
F_a =	1.15	
F_d =	1.6	
F_s =	1.9	

PARÁMETROS DE DISEÑO

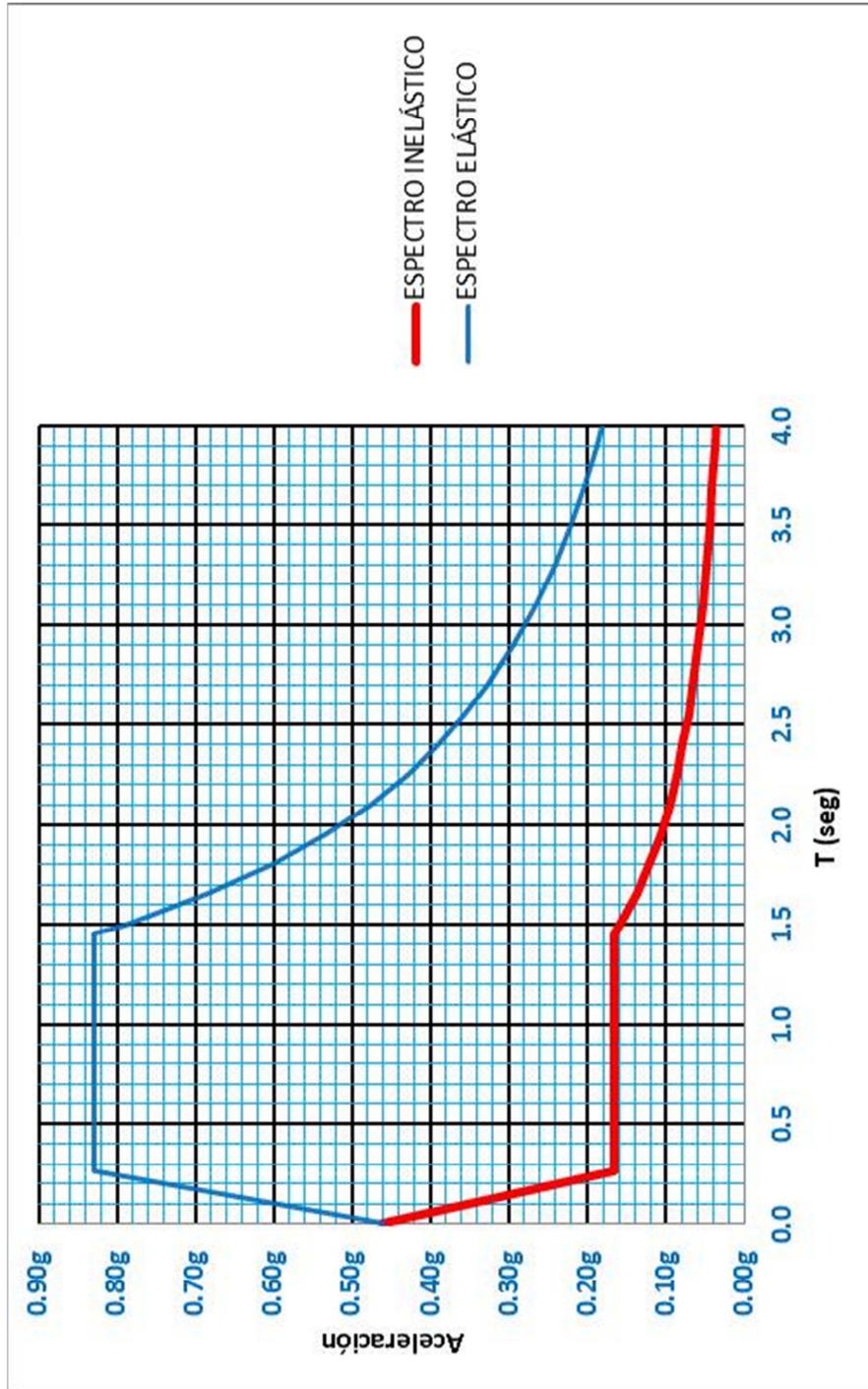
I =	1.00
R =	5.00
ϕ_P =	1.00
ϕ_E =	1.00

PERIODO CORTO Y PERIODO CRÍTICO

T_0 =	0.26 seg
T_c =	1.45 seg

COORDENADAS ESPECTRALES		
T (seg)	Aceleración	
	E. Elástico S_a (g)	E. Inelástico C_s (g)
0.00	0.460	0.460
0.13	0.644	0.313
0.26	0.828	0.166
0.86	0.828	0.166
1.45	0.828	0.166
1.50	0.790	0.158
1.65	0.685	0.137
1.80	0.601	0.120
1.95	0.533	0.107
2.10	0.477	0.095
2.25	0.430	0.086
2.40	0.390	0.078
2.55	0.356	0.071
2.70	0.327	0.065
2.90	0.294	0.059
3.10	0.266	0.053
3.30	0.242	0.048
3.50	0.222	0.044
3.70	0.204	0.041
3.90	0.188	0.038
4.10	0.175	0.035

ESPECTRO DE DISEÑO R=5, I=1



Anexo 2 Propiedades de los perfiles de acero W usado en el pórtico convencional

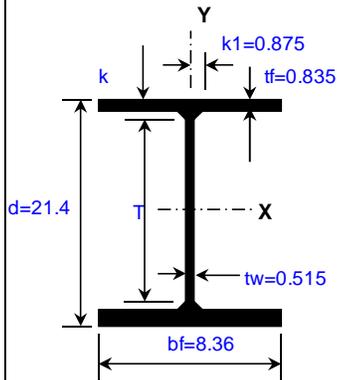
Se elaboró un archivo de Excel a partir de un archivo elaborado por Alex Tomanovich, P.E. "AISC 13th Editor Member Dimensions And Properties Viewer". Extraído de http://www.calculatoredge.com/structural/AISCprop_13.htm

La nomenclatura que se utiliza la tabla es:

NOMENCLATURE FOR AISC VERSION 13.0 MEMBER PROPERTIES AND DIMENSIONS:	
A	Cross-sectional area of member (in. ²)
d	Depth of member, parallel to Y-axis (in.)
h	Depth of member, parallel to Y-axis (in.)
tw	Thickness of web of member (in.)
bf	Width of flange of member, parallel to X-axis (in.)
b	Width of member, parallel to X-axis (in.)
tf	Thickness of flange of member (in.)
k	Distance from outer face of flange to web toe of fillet (in.)
k1	Distance from web centerline to flange toe of fillet (in.)
T	Distance between fillets for wide-flange or channel shape = $d(\text{nom}) - 2 * k(\text{det})$ (in.)
gage	Standard gage (bolt spacing) for member (in.)
I_x	Moment of inertia of member taken about X-axis (in. ⁴)
S_x	Elastic section modulus of member taken about X-axis (in. ³)
r_x	Radius of gyration of member taken about X-axis (in.) = $\text{SQRT}(I_x/A)$
I_y	Moment of inertia of member taken about Y-axis (in. ⁴)
S_y	Elastic section modulus of member taken about Y-axis (in. ³)
r_y	Radius of gyration of member taken about Y-axis (in.) = $\text{SQRT}(I_y/A)$
Z_x	Plastic section modulus of member taken about X-axis (in. ³)
Z_y	Plastic section modulus of member taken about Y-axis (in. ³)
r_{ts}	$\text{SQRT}(\text{SQRT}(I_y * C_w) / S_x)$ (in.)
x_p	horizontal distance from designated member edge to plastic neutral axis (in.)
y_p	vertical distance from designated member edge to plastic neutral axis (in.)
h_o	Distance between centroid of flanges, $d - t_f$ (in.)
J	Torsional moment of inertia of member (in. ⁴)
C_w	Warping constant (in. ⁶)
C	Torsional constant for HSS shapes (in. ³)
a	Torsional property, $a = \text{SQRT}(E * C_w / G * J)$ (in.)

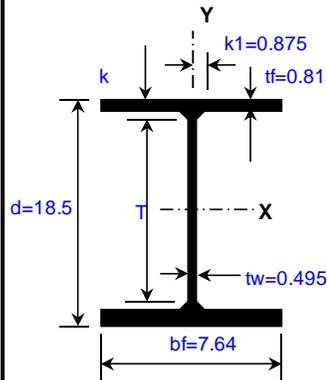
E =	Modulus of elasticity of steel = 29,000 ksi
G =	Shear modulus of elasticity of steel = 11,200 ksi
W_{no} =	Normalized warping function at a point at the flange edge (in. ²)
S_w =	Warping statical moment at a point on the cross section (in. ⁴)
Q_f =	Statical moment for a point in the flange directly above the vertical edge of the web (in. ³)
Q_w =	Statical moment at the mid-depth of the section (in. ³)

VIGAS PISO 1 - 3



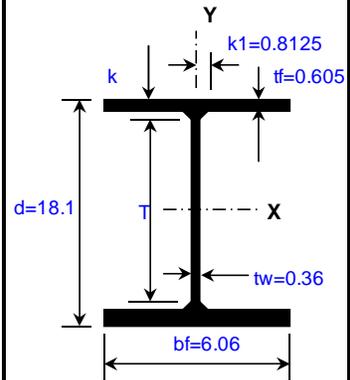
	W21X83	
A =	24.3	pulg ²
d =	21.4	in.
tw =	0.515	in.
bf =	8.36	in.
tf =	0.835	in.
k(des) =	1.34	in.
k(det) =	1.5	in.
k1 =	0.875	in.
T =	18.375	in.
gage =	5.5	in.
wt./ft. =	83	plf.
bf/(2*tf) =	5	
h/tw =	36.4	
Ix =	1830	in. ⁴
Sx =	171	in. ³
rx =	8.67	in.
Zx =	196	in. ³
Iy =	81.4	in. ⁴
Sy =	19.5	in. ³
ry =	1.83	in.
Zy =	30.5	in. ³
rts =	2.21	in.
ho =	20.6	in.
J =	4.34	in. ⁴
Cw =	8630	in. ⁶
a =	71.75	in.
Wno =	43	in. ²
Sw =	75	in. ⁴
Qf =	33.7	in. ³
Qw =	96.8	in. ³

VIGAS PISO 4 - 6



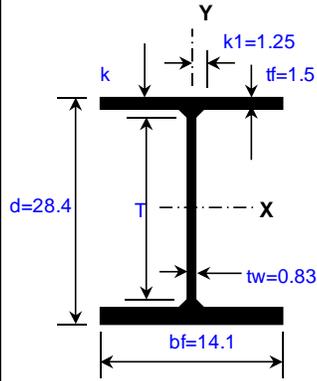
	W18X71	
A =	20.8	in. ²
d =	18.5	in.
tw =	0.495	in.
bf =	7.64	in.
tf =	0.81	in.
k(des) =	1.21	in.
k(det) =	1.5	in.
k1 =	0.875	in.
T =	15.5	in.
gage =	3.5	in.
wt./ft. =	71	plf.
bf/(2*tf) =	4.71	
h/tw =	32.4	
Ix =	1170	in. ⁴
Sx =	127	in. ³
rx =	7.5	in.
Zx =	146	in. ³
Iy =	60.3	in. ⁴
Sy =	15.8	in. ³
ry =	1.7	in.
Zy =	24.7	in. ³
rts =	2.05	in.
ho =	17.7	in.
J =	3.49	in. ⁴
Cw =	4700	in. ⁶
a =	59.05	in.
Wno =	33.8	in. ²
Sw =	52.3	in. ⁴
Qf =	25.6	in. ³
Qw =	72.4	in. ³

VIGAS PISO 7 - 8



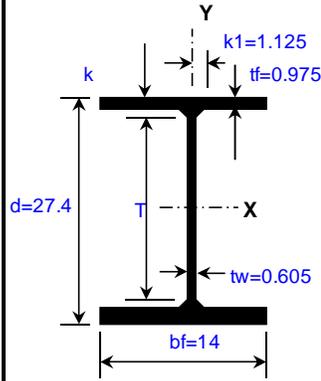
	W18X46	
A =	13.5	in. ²
d =	18.1	in.
tw =	0.36	in.
bf =	6.06	in.
tf =	0.605	in.
k(des) =	1.01	in.
k(det) =	1.25	in.
k1 =	0.8125	in.
T =	15.5	in.
gage =	3.5	in.
wt./ft. =	46	plf.
bf/(2*tf) =	5.01	
h/tw =	44.6	
Ix =	712	in. ⁴
Sx =	78.8	in. ³
rx =	7.25	in.
Zx =	90.7	in. ³
Iy =	22.5	in. ⁴
Sy =	7.43	in. ³
ry =	1.29	in.
Zy =	11.7	in. ³
rts =	1.58	in.
ho =	17.5	in.
J =	1.22	in. ⁴
Cw =	1720	in. ⁶
a =	60.42	in.
Wno =	26.5	in. ²
Sw =	24.3	in. ⁴
Qf =	15.1	in. ³
Qw =	44.9	in. ³

COL INTERIOR PISO 1 - 3



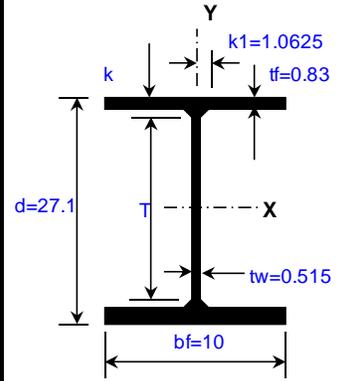
W27X217	
A =	64 in. ²
d =	28.4 in.
tw =	0.83 in.
bf =	14.1 in.
tf =	1.5 in.
k(des) =	2.29 in.
k(det) =	2.375 in.
k1 =	1.25 in.
T =	23.625 in.
gage =	5.5 in.
wt./ft. =	217 plf.
bf/(2*tf) =	4.71
h/tw =	28.7
Ix =	8910 in. ⁴
Sx =	627 in. ³
rx =	11.8 in.
Zx =	711 in. ³
Iy =	704 in. ⁴
Sy =	100 in. ³
ry =	3.32 in.
Zy =	154 in. ³
rts =	3.89 in.
ho =	26.9 in.
J =	37.6 in. ⁴
Cw =	128000 in. ⁶
a =	93.89 in.
Wno =	94.8 in. ²
Sw =	501 in. ⁴
Qf =	134 in. ³
Qw =	351 in. ³

COL INTERIOR PISO 4 - 6



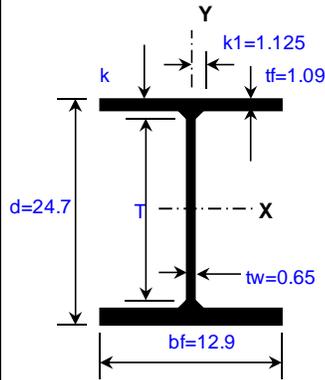
W27X146	
A =	43.1 in. ²
d =	27.4 in.
tw =	0.605 in.
bf =	14 in.
tf =	0.975 in.
k(des) =	1.76 in.
k(det) =	1.875 in.
k1 =	1.125 in.
T =	23.625 in.
gage =	5.5 in.
wt./ft. =	146 plf.
bf/(2*tf) =	7.16
h/tw =	39.4
Ix =	5660 in. ⁴
Sx =	414 in. ³
rx =	11.5 in.
Zx =	464 in. ³
Iy =	443 in. ⁴
Sy =	63.5 in. ³
ry =	3.2 in.
Zy =	97.7 in. ³
rts =	3.76 in.
ho =	26.4 in.
J =	11.3 in. ⁴
Cw =	77200 in. ⁶
a =	133.00 in.
Wno =	92.5 in. ²
Sw =	316 in. ⁴
Qf =	86.3 in. ³
Qw =	229 in. ³

COL INTERIOR PISO 7 - 8



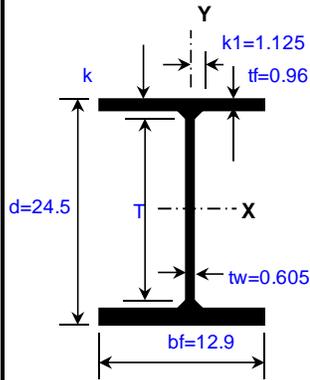
W27X102	
A =	30 in. ²
d =	27.1 in.
tw =	0.515 in.
bf =	10 in.
tf =	0.83 in.
k(des) =	1.43 in.
k(det) =	1.75 in.
k1 =	1.0625 in.
T =	23.625 in.
gage =	5.5 in.
wt./ft. =	102 plf.
bf/(2*tf) =	6.03
h/tw =	47.1
Ix =	3620 in. ⁴
Sx =	267 in. ³
rx =	11 in.
Zx =	305 in. ³
Iy =	139 in. ⁴
Sy =	27.8 in. ³
ry =	2.15 in.
Zy =	43.4 in. ³
rts =	2.62 in.
ho =	26.3 in.
J =	5.28 in. ⁴
Cw =	24000 in. ⁶
a =	108.49 in.
Wno =	65.7 in. ²
Sw =	136 in. ⁴
Qf =	51.7 in. ³
Qw =	151 in. ³

COL BORDE PISO 1 - 3



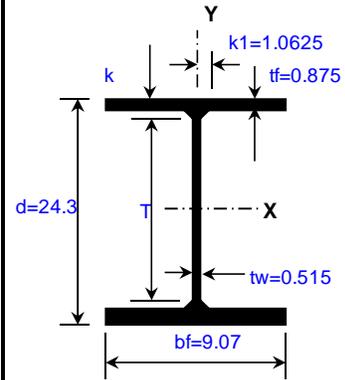
	W24X146	
A =	43	in.^2
d =	24.7	in.
tw =	0.65	in.
bf =	12.9	in.
tf =	1.09	in.
k(des) =	1.59	in.
k(det) =	2	in.
k1 =	1.125	in.
T =	20.75	in.
gage =	5.5	in.
wt./ft. =	146	plf.
bf/(2*tf) =	5.92	
h/tw =	33.2	
Ix =	4580	in.^4
Sx =	371	in.^3
rx =	10.3	in.
Zx =	418	in.^3
Iy =	391	in.^4
Sy =	60.5	in.^3
ry =	3.01	in.
Zy =	93.2	in.^3
rts =	3.53	in.
ho =	23.7	in.
J =	13.4	in.^4
Cw =	54600	in.^6
a =	102.72	in.
Wno =	76.1	in.^2
Sw =	268	in.^4
Qf =	78.8	in.^3
Qw =	207	in.^3

COL BORDE PISO 4 - 6



	W24X131	
A =	38.5	in.^2
d =	24.5	in.
tw =	0.605	in.
bf =	12.9	in.
tf =	0.96	in.
k(des) =	1.46	in.
k(det) =	1.875	in.
k1 =	1.125	in.
T =	20.75	in.
gage =	5.5	in.
wt./ft. =	131	plf.
bf/(2*tf) =	6.7	
h/tw =	35.6	
Ix =	4020	in.^4
Sx =	329	in.^3
rx =	10.2	in.
Zx =	370	in.^3
Iy =	340	in.^4
Sy =	53	in.^3
ry =	2.97	in.
Zy =	81.5	in.^3
rts =	3.49	in.
ho =	23.5	in.
J =	9.5	in.^4
Cw =	47100	in.^6
a =	113.30	in.
Wno =	75.9	in.^2
Sw =	235	in.^4
Qf =	69.5	in.^3
Qw =	184	in.^3

COL BORDE PISO 7 - 8



	W24X94	
A =	27.7	in.^2
d =	24.3	in.
tw =	0.515	in.
bf =	9.07	in.
tf =	0.875	in.
k(des) =	1.38	in.
k(det) =	1.75	in.
k1 =	1.0625	in.
T =	20.75	in.
gage =	5.5	in.
wt./ft. =	94	plf.
bf/(2*tf) =	5.18	
h/tw =	41.9	
Ix =	2700	in.^4
Sx =	222	in.^3
rx =	9.87	in.
Zx =	254	in.^3
Iy =	109	in.^4
Sy =	24	in.^3
ry =	1.98	in.
Zy =	37.5	in.^3
rts =	2.4	in.
ho =	23.4	in.
J =	5.26	in.^4
Cw =	15000	in.^6
a =	85.93	in.
Wno =	53.1	in.^2
Sw =	105	in.^4
Qf =	43.8	in.^3
Qw =	126	in.^3

Anexo 3 Propiedades de los perfiles de acero W usado en el rediseño del pórtico con disipadores viscoelásticos

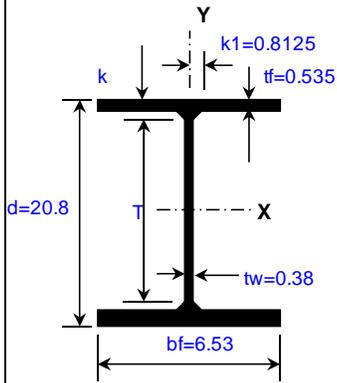
Se elaboró un archivo de Excel a partir de un archivo elaborado por Alex Tomanovich, P.E. "AISC 13th Editor Member Dimensions And Properties Viewer". Extraído de http://www.calculatoredge.com/structural/AISCprop_13.htm

La nomenclatura que se utiliza la tabla es:

NOMENCLATURE FOR AISC VERSION 13.0 MEMBER PROPERTIES AND DIMENSIONS:	
A =	Cross-sectional area of member (in. ²)
d =	Depth of member, parallel to Y-axis (in.)
h =	Depth of member, parallel to Y-axis (in.)
tw =	Thickness of web of member (in.)
bf =	Width of flange of member, parallel to X-axis (in.)
b =	Width of member, parallel to X-axis (in.)
tf =	Thickness of flange of member (in.)
k =	Distance from outer face of flange to web toe of fillet (in.)
k1 =	Distance from web centerline to flange toe of fillet (in.)
T =	Distance between fillets for wide-flange or channel shape = $d(\text{nom}) - 2 * k(\text{det})$ (in.)
gage =	Standard gage (bolt spacing) for member (in.)
Ix =	Moment of inertia of member taken about X-axis (in. ⁴)
Sx =	Elastic section modulus of member taken about X-axis (in. ³)
rx =	Radius of gyration of member taken about X-axis (in.) = $\text{SQRT}(I_x/A)$
Iy =	Moment of inertia of member taken about Y-axis (in. ⁴)
Sy =	Elastic section modulus of member taken about Y-axis (in. ³)
ry =	Radius of gyration of member taken about Y-axis (in.) = $\text{SQRT}(I_y/A)$
Zx =	Plastic section modulus of member taken about X-axis (in. ³)
Zy =	Plastic section modulus of member taken about Y-axis (in. ³)
rts =	$\text{SQRT}(\text{SQRT}(I_y * C_w) / S_x)$ (in.)
xp =	horizontal distance from designated member edge to plastic neutral axis (in.)
yp =	vertical distance from designated member edge to plastic neutral axis (in.)
ho =	Distance between centroid of flanges, $d - t_f$ (in.)
J =	Torsional moment of inertia of member (in. ⁴)
Cw =	Warping constant (in. ⁶)
C =	Torsional constant for HSS shapes (in. ³)
a =	Torsional property, $a = \text{SQRT}(E * C_w / G * J)$ (in.)

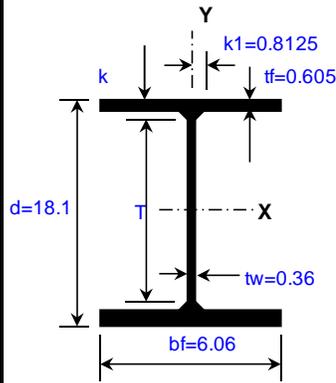
E =	Modulus of elasticity of steel = 29,000 ksi
G =	Shear modulus of elasticity of steel = 11,200 ksi
Wno =	Normalized warping function at a point at the flange edge (in. ²)
SW =	Warping statical moment at a point on the cross section (in. ⁴)
Qf =	Statical moment for a point in the flange directly above the vertical edge of the web (in. ³)
QW =	Statical moment at the mid-depth of the section (in. ³)

VIGAS PISO 1 - 3



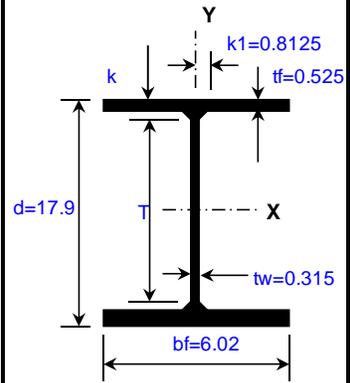
	W21X50	
A =	14.7	pulg ²
d =	20.8	in.
tw =	0.38	in.
bf =	6.53	in.
tf =	0.535	in.
k(des) =	1.04	in.
k(det) =	1.25	in.
k1 =	0.8125	in.
T =	18.375	in.
gage =	3.5	in.
wt./ft. =	50	plf.
bf/(2*tf) =	6.1	
h/tw =	49.4	
Ix =	984	in. ⁴
Sx =	94.5	in. ³
rx =	8.18	in.
Zx =	110	in. ³
Iy =	24.9	in. ⁴
Sy =	7.64	in. ³
ry =	1.3	in.
Zy =	12.2	in. ³
rts =	1.64	in.
ho =	20.3	in.
J =	1.14	in. ⁴
Cw =	2570	in. ⁶
a =	76.40	in.
Wno =	33.1	in. ²
Sw =	28.9	in. ⁴
Qf =	16.7	in. ³
Qw =	53.9	in. ³

VIGAS PISO 4 - 6



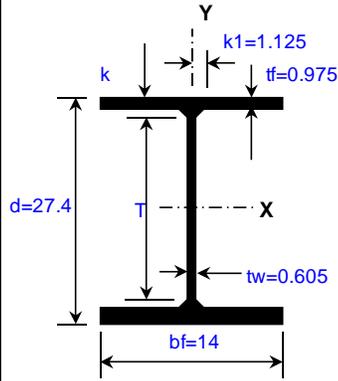
	W18X46	
A =	13.5	in. ²
d =	18.1	in.
tw =	0.36	in.
bf =	6.06	in.
tf =	0.605	in.
k(des) =	1.01	in.
k(det) =	1.25	in.
k1 =	0.8125	in.
T =	15.5	in.
gage =	3.5	in.
wt./ft. =	46	plf.
bf/(2*tf) =	5.01	
h/tw =	44.6	
Ix =	712	in. ⁴
Sx =	78.8	in. ³
rx =	7.25	in.
Zx =	90.7	in. ³
Iy =	22.5	in. ⁴
Sy =	7.43	in. ³
ry =	1.29	in.
Zy =	11.7	in. ³
rts =	1.58	in.
ho =	17.5	in.
J =	1.22	in. ⁴
Cw =	1720	in. ⁶
a =	60.42	in.
Wno =	26.5	in. ²
Sw =	24.3	in. ⁴
Qf =	15.1	in. ³
Qw =	44.9	in. ³

VIGAS PISO 7 - 8



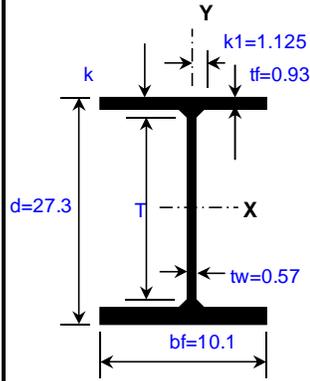
	W18X40	
A =	11.8	in. ²
d =	17.9	in.
tw =	0.315	in.
bf =	6.02	in.
tf =	0.525	in.
k(des) =	0.927	in.
k(det) =	1.1875	in.
k1 =	0.8125	in.
T =	15.5	in.
gage =	3.5	in.
wt./ft. =	40	plf.
bf/(2*tf) =	5.73	
h/tw =	50.9	
Ix =	612	in. ⁴
Sx =	68.4	in. ³
rx =	7.21	in.
Zx =	78.4	in. ³
Iy =	19.1	in. ⁴
Sy =	6.35	in. ³
ry =	1.27	in.
Zy =	10	in. ³
rts =	1.56	in.
ho =	17.4	in.
J =	0.81	in. ⁴
Cw =	1440	in. ⁶
a =	67.85	in.
Wno =	26.1	in. ²
Sw =	20.7	in. ⁴
Qf =	13	in. ³
Qw =	38.6	in. ³

COL INTERIOR PISO 1 - 3



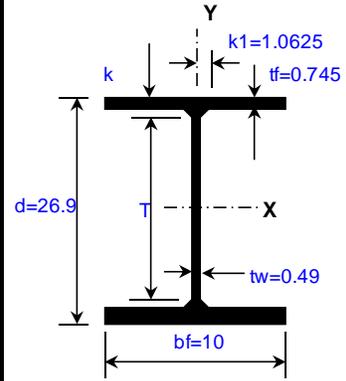
W27X146	
A =	43.1 in. ²
d =	27.4 in.
tw =	0.605 in.
bf =	14 in.
tf =	0.975 in.
k(des) =	1.76 in.
k(det) =	1.875 in.
k1 =	1.125 in.
T =	23.625 in.
gage =	5.5 in.
wt./ft. =	146 plf.
bf/(2*tf) =	7.16
h/tw =	39.4
Ix =	5660 in. ⁴
Sx =	414 in. ³
rx =	11.5 in.
Zx =	464 in. ³
Iy =	443 in. ⁴
Sy =	63.5 in. ³
ry =	3.2 in.
Zy =	97.7 in. ³
rts =	3.76 in.
ho =	26.4 in.
J =	11.3 in. ⁴
Cw =	77200 in. ⁶
a =	133.00 in.
Wno =	92.5 in. ²
Sw =	316 in. ⁴
Qf =	86.3 in. ³
Qw =	229 in. ³

COL INTERIOR PISO 4 - 6



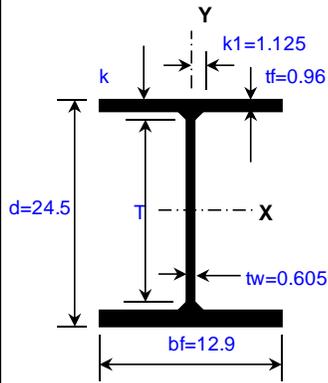
W27X114	
A =	33.5 in. ²
d =	27.3 in.
tw =	0.57 in.
bf =	10.1 in.
tf =	0.93 in.
k(des) =	1.53 in.
k(det) =	1.8125 in.
k1 =	1.125 in.
T =	23.625 in.
gage =	5.5 in.
wt./ft. =	114 plf.
bf/(2*tf) =	5.41
h/tw =	42.5
Ix =	4080 in. ⁴
Sx =	299 in. ³
rx =	11 in.
Zx =	343 in. ³
Iy =	159 in. ⁴
Sy =	31.5 in. ³
ry =	2.18 in.
Zy =	49.3 in. ³
rts =	2.64 in.
ho =	26.4 in.
J =	7.33 in. ⁴
Cw =	27600 in. ⁶
a =	98.74 in.
Wno =	66.6 in. ²
Sw =	156 in. ⁴
Qf =	58.4 in. ³
Qw =	170 in. ³

COL INTERIOR PISO 7 - 8



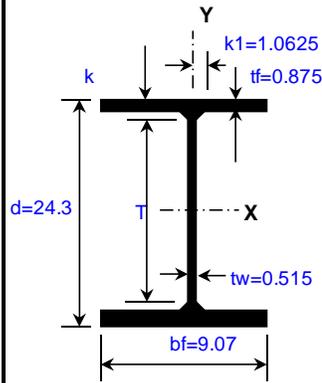
W27X94	
A =	27.7 in. ²
d =	26.9 in.
tw =	0.49 in.
bf =	10 in.
tf =	0.745 in.
k(des) =	1.34 in.
k(det) =	1.625 in.
k1 =	1.0625 in.
T =	23.625 in.
gage =	5.5 in.
wt./ft. =	94 plf.
bf/(2*tf) =	6.7
h/tw =	49.5
Ix =	3270 in. ⁴
Sx =	243 in. ³
rx =	10.9 in.
Zx =	278 in. ³
Iy =	124 in. ⁴
Sy =	24.8 in. ³
ry =	2.12 in.
Zy =	38.8 in. ³
rts =	2.59 in.
ho =	26.2 in.
J =	4.03 in. ⁴
Cw =	21300 in. ⁶
a =	116.98 in.
Wno =	65.4 in. ²
Sw =	122 in. ⁴
Qf =	46.3 in. ³
Qw =	137 in. ³

COL BORDE PISO 1 - 3



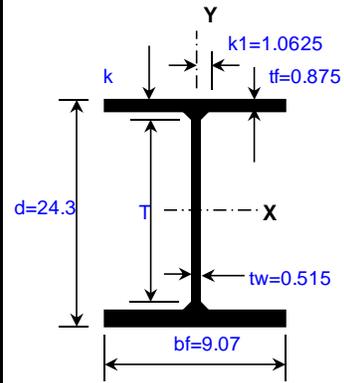
	W24X131	
A =	38.5	in.^2
d =	24.5	in.
tw =	0.605	in.
bf =	12.9	in.
tf =	0.96	in.
k(des) =	1.46	in.
k(det) =	1.875	in.
k1 =	1.125	in.
T =	20.75	in.
gage =	5.5	in.
wt./ft. =	131	plf.
bf/(2*tf) =	6.7	
h/tw =	35.6	
Ix =	4020	in.^4
Sx =	329	in.^3
rx =	10.2	in.
Zx =	370	in.^3
Iy =	340	in.^4
Sy =	53	in.^3
ry =	2.97	in.
Zy =	81.5	in.^3
rts =	3.49	in.
ho =	23.5	in.
J =	9.5	in.^4
Cw =	47100	in.^6
a =	113.30	in.
Wno =	75.9	in.^2
Sw =	235	in.^4
Qf =	69.5	in.^3
Qw =	184	in.^3

COL BORDE PISO 4 - 6



	W24X94	
A =	27.7	in.^2
d =	24.3	in.
tw =	0.515	in.
bf =	9.07	in.
tf =	0.875	in.
k(des) =	1.38	in.
k(det) =	1.75	in.
k1 =	1.0625	in.
T =	20.75	in.
gage =	5.5	in.
wt./ft. =	94	plf.
bf/(2*tf) =	5.18	
h/tw =	41.9	
Ix =	2700	in.^4
Sx =	222	in.^3
rx =	9.87	in.
Zx =	254	in.^3
Iy =	109	in.^4
Sy =	24	in.^3
ry =	1.98	in.
Zy =	37.5	in.^3
rts =	2.4	in.
ho =	23.4	in.
J =	5.26	in.^4
Cw =	15000	in.^6
a =	85.93	in.
Wno =	53.1	in.^2
Sw =	105	in.^4
Qf =	43.8	in.^3
Qw =	126	in.^3

COL BORDE PISO 7 - 8



	W24X94	
A =	27.7	in.^2
d =	24.3	in.
tw =	0.515	in.
bf =	9.07	in.
tf =	0.875	in.
k(des) =	1.38	in.
k(det) =	1.75	in.
k1 =	1.0625	in.
T =	20.75	in.
gage =	5.5	in.
wt./ft. =	94	plf.
bf/(2*tf) =	5.18	
h/tw =	41.9	
Ix =	2700	in.^4
Sx =	222	in.^3
rx =	9.87	in.
Zx =	254	in.^3
Iy =	109	in.^4
Sy =	24	in.^3
ry =	1.98	in.
Zy =	37.5	in.^3
rts =	2.4	in.
ho =	23.4	in.
J =	5.26	in.^4
Cw =	15000	in.^6
a =	85.93	in.
Wno =	53.1	in.^2
Sw =	105	in.^4
Qf =	43.8	in.^3
Qw =	126	in.^3

Anexo 4 Resultados de la Revisión de Diseño con el programa SAP2000 del Pórtico Convencional de Acero

Los dos factores críticos que se presentaron fueron los revisados por la relación Demanda/Resistencia por un análisis PMM (comportamiento Fuerza Axial-Momento Biaxial), y la relación capacidad viga/columna (CBC) en las columnas. El combo de diseño que originó las mayores fuerzas en los elementos estructurales fue el COMBO 3: 1.2 DL + 0.5 LL + 1.0 Ex.

Tabla A4.1: Factores críticos del análisis de columnas

EJE	*NIVEL	Elemento	Perfil	Factor	Tipo de Revisión
A	1	COL	W24X146	0.80	PMM
A	2	COL	W24X146	0.54	PMM
A	3	COL	W24X146	0.45	PMM
A	4	COL	W24X131	0.47	PMM
A	5	COL	W24X131	0.32	PMM
A	6	COL	W24X131	0.34	CBC
A	7	COL	W24X94	0.30	PMM
A	8	COL	W24X94	0.50	CBC
B	1	COL	W27X217	0.73	PMM
B	2	COL	W27X217	0.46	CBC
B	3	COL	W27X217	0.56	CBC
B	4	COL	W27X146	0.52	PMM
B	5	COL	W27X146	0.50	CBC
B	6	COL	W27X146	0.59	CBC
B	7	COL	W27X102	0.44	CBC
B	8	COL	W27X102	0.86	CBC
C	1	COL	W27X217	0.72	PMM
C	2	COL	W27X217	0.46	CBC
C	3	COL	W27X217	0.56	CBC
C	4	COL	W27X146	0.53	PMM
C	5	COL	W27X146	0.50	CBC
C	6	COL	W27X146	0.58	CBC
C	7	COL	W27X102	0.44	CBC
C	8	COL	W27X102	0.86	CBC
D	1	COL	W27X217	0.72	PMM
D	2	COL	W27X217	0.46	CBC

D	3	COL	W27X217	0.56	CBC
D	4	COL	W27X146	0.53	PMM
D	5	COL	W27X146	0.50	CBC
D	6	COL	W27X146	0.58	CBC
D	7	COL	W27X102	0.44	CBC
D	8	COL	W27X102	0.86	CBC
E	1	COL	W27X217	0.73	PMM
E	2	COL	W27X217	0.46	CBC
E	3	COL	W27X217	0.56	CBC
E	4	COL	W27X146	0.52	PMM
E	5	COL	W27X146	0.50	CBC
E	6	COL	W27X146	0.59	CBC
E	7	COL	W27X102	0.44	CBC
E	8	COL	W27X102	0.86	CBC
F	1	COL	W24X146	0.80	PMM
F	2	COL	W24X146	0.54	PMM
F	3	COL	W24X146	0.45	PMM
F	4	COL	W24X131	0.47	PMM
F	5	COL	W24X131	0.32	PMM
F	6	COL	W24X131	0.34	CBC
F	7	COL	W24X94	0.30	PMM
F	8	COL	W24X94	0.50	CBC
*NIVEL: se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado					

Tabla A4.2: Cálculo de los Factores Demanda/Resistencia por análisis PMM de las columnas

COLUMNAS			Demanda	Resistencia			Demanda	Resistencia		
Resultados con combo:		COMBO 3	Pr	PcComp	PcTension	Factor P	Mr	McMajor	Factor M	Factor Total
EJE	*NIVEL	Perfil	Tonf	Tonf	Tonf		Tonf-m	Tonf-m		
A	1	W24X146	-281.1	719.0	877.7	0.39	-99.9	216.7	0.41	0.80
A	2	W24X146	-242.0	784.6	877.7	0.31	-57.1	216.7	0.23	0.54
A	3	W24X146	-200.1	784.6	877.7	0.26	-47.0	216.7	0.19	0.45
A	4	W24X131	-157.2	700.1	785.8	0.22	-53.3	191.8	0.25	0.47
A	5	W24X131	-119.7	700.1	785.8	0.09	44.3	191.8	0.23	0.32
A	6	W24X131	-83.9	700.1	785.8	0.06	41.6	191.8	0.22	0.28
A	7	W24X94	-50.5	436.2	565.4	0.06	31.4	131.7	0.24	0.30
A	8	W24X94	-23.7	436.2	565.4	0.03	32.8	131.7	0.25	0.28
B	1	W27X217	-309.4	1104.9	1302.3	0.28	-183.9	367.1	0.45	0.73
B	2	W27X217	-269.8	1187.3	1302.3	0.23	-94.1	367.1	0.23	0.46
B	3	W27X217	-230.3	1187.3	1302.3	0.10	-79.3	367.1	0.22	0.31
B	4	W27X146	-191.1	783.3	875.7	0.24	-75.3	239.0	0.28	0.52
B	5	W27X146	-151.9	783.3	875.7	0.10	63.5	239.0	0.27	0.36
B	6	W27X146	-113.5	783.3	875.7	0.07	59.0	239.0	0.25	0.32
B	7	W27X102	-75.4	474.0	612.3	0.08	39.4	158.1	0.25	0.33
B	8	W27X102	-37.5	474.0	612.3	0.04	32.3	158.1	0.20	0.24
C	1	W27X217	-306.0	1104.9	1302.3	0.28	-184.0	367.1	0.45	0.72
C	2	W27X217	-267.0	1187.3	1302.3	0.22	-94.8	367.1	0.23	0.45
C	3	W27X217	-228.4	1187.3	1302.3	0.10	-80.2	367.1	0.22	0.31
C	4	W27X146	-189.7	783.3	875.7	0.24	-76.1	239.0	0.28	0.53
C	5	W27X146	-150.8	783.3	875.7	0.10	64.1	239.0	0.27	0.36
C	6	W27X146	-112.7	783.3	875.7	0.07	59.6	239.0	0.25	0.32
C	7	W27X102	-74.8	474.0	612.3	0.08	39.7	158.1	0.25	0.33
C	8	W27X102	-37.1	474.0	612.3	0.04	32.7	158.1	0.21	0.25
D	1	W27X217	-306.0	1104.9	1302.3	0.28	184.0	367.1	0.45	0.72
D	2	W27X217	-267.0	1187.3	1302.3	0.22	94.8	367.1	0.23	0.45
D	3	W27X217	-228.4	1187.3	1302.3	0.10	80.2	367.1	0.22	0.31
D	4	W27X146	-189.7	783.3	875.7	0.24	76.1	239.0	0.28	0.53
D	5	W27X146	-150.8	783.3	875.7	0.10	-64.1	239.0	0.27	0.36
D	6	W27X146	-112.7	783.3	875.7	0.07	-59.6	239.0	0.25	0.32
D	7	W27X102	-74.8	474.0	612.3	0.08	-39.7	158.1	0.25	0.33
D	8	W27X102	-37.1	474.0	612.3	0.04	-32.7	158.1	0.21	0.25
E	1	W27X217	-309.4	1104.9	1302.3	0.28	183.9	367.1	0.45	0.73

E	2	W27X217	-269.8	1187.3	1302.3	0.23	94.1	367.1	0.23	0.46
E	3	W27X217	-230.3	1187.3	1302.3	0.10	79.3	367.1	0.22	0.31
E	4	W27X146	-191.1	783.3	875.7	0.24	75.3	239.0	0.28	0.52
E	5	W27X146	-151.9	783.3	875.7	0.10	-63.5	239.0	0.27	0.36
E	6	W27X146	-113.5	783.3	875.7	0.07	-59.0	239.0	0.25	0.32
E	7	W27X102	-75.4	474.0	612.3	0.08	-39.4	158.1	0.25	0.33
E	8	W27X102	-37.5	474.0	612.3	0.04	-32.3	158.1	0.20	0.24
F	1	W24X146	-281.1	719.0	877.7	0.39	99.9	216.7	0.41	0.80
F	2	W24X146	-242.0	784.6	877.7	0.31	57.1	216.7	0.23	0.54
F	3	W24X146	-200.1	784.6	877.7	0.26	47.0	216.7	0.19	0.45
F	4	W24X131	-157.2	700.1	785.8	0.22	53.3	191.8	0.25	0.47
F	5	W24X131	-119.7	700.1	785.8	0.09	-44.3	191.8	0.23	0.32
F	6	W24X131	-83.9	700.1	785.8	0.06	-41.6	191.8	0.22	0.28
F	7	W24X94	-50.5	436.2	565.4	0.06	-31.4	131.7	0.24	0.30
F	8	W24X94	-23.7	436.2	565.4	0.03	-32.8	131.7	0.25	0.28
*NIVEL: se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado										

Tabla A4.3: Cálculo de los Factores Demanda/Resistencia por análisis PMM de las vigas

VIGAS			Demanda	Resistencia			Demanda	Resistencia		
Resultados con: COMBO 3			Pr	PcComp	PcTension		Mr	Mc		
*EJE	NIVEL	Perfil	Tonf	Tonf	Tonf	Factor P	Tonf-m	Tonf-m	Factor M	Factor Total
A	1	W21X83	4.6	475.3	496.0	0.00	-65.6	101.6	0.65	0.65
B	1	W21X83	0.2	475.6	496.0	0.00	-65.6	101.6	0.65	0.65
C	1	W21X83	0.0	475.6	496.0	0.00	-65.6	101.6	0.65	0.65
D	1	W21X83	0.2	475.6	496.0	0.00	-65.6	101.6	0.65	0.65
E	1	W21X83	4.6	475.3	496.0	0.00	-65.6	101.6	0.65	0.65
A	2	W21X83	3.5	475.3	496.0	0.00	-73.7	101.6	0.73	0.73
B	2	W21X83	0.3	475.6	496.0	0.00	-74.2	101.6	0.73	0.73
C	2	W21X83	0.0	475.6	496.0	0.00	-74.2	101.6	0.73	0.73
D	2	W21X83	0.3	475.6	496.0	0.00	-74.2	101.6	0.73	0.73
E	2	W21X83	3.5	475.3	496.0	0.00	-73.7	101.6	0.73	0.73
A	3	W21X83	6.3	475.3	496.0	0.01	-77.1	101.6	0.76	0.76
B	3	W21X83	0.5	475.6	496.0	0.00	-76.6	101.6	0.75	0.75
C	3	W21X83	0.0	475.6	496.0	0.00	-76.5	101.6	0.75	0.75
D	3	W21X83	0.5	475.6	496.0	0.00	-76.6	101.6	0.75	0.75
E	3	W21X83	6.3	475.3	496.0	0.01	-77.1	101.6	0.76	0.76
A	4	W18X71	5.5	400.8	424.6	0.01	-60.5	75.2	0.80	0.81
B	4	W18X71	0.4	401.2	424.6	0.00	-59.8	75.2	0.79	0.80
C	4	W18X71	0.0	401.2	424.6	0.00	-59.8	75.2	0.79	0.79
D	4	W18X71	0.4	401.2	424.6	0.00	-59.8	75.2	0.79	0.80
E	4	W18X71	5.5	400.8	424.6	0.01	-60.5	75.2	0.80	0.81
A	5	W18X71	5.0	400.8	424.6	0.01	-57.4	75.2	0.76	0.77
B	5	W18X71	0.4	401.2	424.6	0.00	-56.7	75.2	0.75	0.76
C	5	W18X71	0.0	401.2	424.6	0.00	-56.8	75.2	0.76	0.76
D	5	W18X71	0.4	401.2	424.6	0.00	-56.7	75.2	0.75	0.76
E	5	W18X71	5.0	400.8	424.6	0.01	-57.4	75.2	0.76	0.77
A	6	W18X71	5.6	400.8	424.6	0.01	-51.5	75.2	0.69	0.69
B	6	W18X71	0.6	401.2	424.6	0.00	-50.9	75.2	0.68	0.68
C	6	W18X71	0.0	401.2	424.6	0.00	-50.9	75.2	0.68	0.68
D	6	W18X71	0.6	401.2	424.6	0.00	-50.9	75.2	0.68	0.68
E	6	W18X71	5.6	400.8	424.6	0.01	-51.5	75.2	0.69	0.69
A	7	W18X46	2.7	247.8	275.6	0.00	-33.5	47.0	0.71	0.72
B	7	W18X46	0.2	247.9	275.6	0.00	-33.2	47.0	0.71	0.71
C	7	W18X46	0.0	247.9	275.6	0.00	-33.3	47.0	0.71	0.71

D	7	W18X46	0.2	247.9	275.6	0.00	-33.2	47.0	0.71	0.71
E	7	W18X46	2.7	247.8	275.6	0.00	-33.5	47.0	0.71	0.72
A	8	W18X46	5.8	247.8	275.6	0.01	-26.3	47.0	0.56	0.57
B	8	W18X46	0.6	247.9	275.6	0.00	-27.0	47.0	0.57	0.58
C	8	W18X46	0.0	247.9	275.6	0.00	-27.0	47.0	0.57	0.57
D	8	W18X46	0.6	247.9	275.6	0.00	-27.0	47.0	0.57	0.58
E	8	W18X46	5.8	247.8	275.6	0.01	-26.3	47.0	0.56	0.57
*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado										

Anexo 5 Resultados de la Revisión de Diseño con el programa SAP2000 del Pórtico de Acero con Disipadores Viscoelásticos

Los dos factores críticos que se presentaron fueron los revisados por la relación Demanda/Resistencia por un análisis PMM (comportamiento Fuerza Axial-Momento Biaxial), y la relación capacidad viga/columna en las columnas (CBC). El combo de diseño que originó las mayores fuerzas en los elementos estructurales fue el COMBO 3: 1.2 DL + 0.5 LL + 1.0 Ex.

Tabla A5.1: Factores críticos del análisis de columnas

EJE	*NIVEL	Elemento	Perfil	Factor	Tipo de Revisión
A	1	COL	W24X146	0.57	PMM
A	2	COL	W24X146	0.40	PMM
A	3	COL	W24X146	0.40	CBC
A	4	COL	W24X131	0.30	CBC
A	5	COL	W24X131	0.29	CBC
A	6	COL	W24X131	0.34	CBC
A	7	COL	W24X94	0.25	CBC
A	8	COL	W24X94	0.50	CBC
B	1	COL	W27X217	0.58	PMM
B	2	COL	W27X217	0.47	CBC
B	3	COL	W27X217	0.57	CBC
B	4	COL	W27X146	0.53	CBC
B	5	COL	W27X146	0.50	CBC
B	6	COL	W27X146	0.59	CBC
B	7	COL	W27X102	0.44	CBC
B	8	COL	W27X102	0.86	CBC
C	1	COL	W27X217	0.57	PMM
C	2	COL	W27X217	0.47	CBC
C	3	COL	W27X217	0.57	CBC
C	4	COL	W27X146	0.53	CBC
C	5	COL	W27X146	0.50	CBC
C	6	COL	W27X146	0.59	CBC
C	7	COL	W27X102	0.45	CBC
C	8	COL	W27X102	0.86	CBC
D	1	COL	W27X217	0.57	PMM
D	2	COL	W27X217	0.47	CBC

D	3	COL	W27X217	0.57	CBC
D	4	COL	W27X146	0.53	CBC
D	5	COL	W27X146	0.50	CBC
D	6	COL	W27X146	0.59	CBC
D	7	COL	W27X102	0.45	CBC
D	8	COL	W27X102	0.86	CBC
E	1	COL	W27X217	0.58	PMM
E	2	COL	W27X217	0.47	CBC
E	3	COL	W27X217	0.57	CBC
E	4	COL	W27X146	0.53	CBC
E	5	COL	W27X146	0.50	CBC
E	6	COL	W27X146	0.59	CBC
E	7	COL	W27X102	0.44	CBC
E	8	COL	W27X102	0.86	CBC
F	1	COL	W24X146	0.57	PMM
F	2	COL	W24X146	0.40	PMM
F	3	COL	W24X146	0.40	CBC
F	4	COL	W24X131	0.30	CBC
F	5	COL	W24X131	0.29	CBC
F	6	COL	W24X131	0.34	CBC
F	7	COL	W24X94	0.25	CBC
F	8	COL	W24X94	0.50	CBC

*NIVEL: se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado

Tabla A5.2: Cálculo de los Factores Demanda/Resistencia por análisis PMM de las columnas

COLUMNAS			Demanda	Resistencia			Demanda	Resistencia		
Resultados en COMBO 3			Pr	PcComp	PcTension		Mr	McMajor		
EJE	*NIVEL	Perfil	Tonf	Tonf	Tonf	Factor P	Tonf-m	Tonf-m	Factor M	Factor Total
A	1	W24X146	-227.2	719.0	877.7	0.32	-61.9	216.7	0.25	0.57
A	2	W24X146	-195.8	784.6	877.7	0.25	-37.2	216.7	0.15	0.40
A	3	W24X146	-163.0	784.6	877.7	0.21	-30.3	216.7	0.12	0.33
A	4	W24X131	-129.8	700.1	785.8	0.09	-32.8	191.8	0.17	0.26
A	5	W24X131	-99.8	700.1	785.8	0.07	29.3	191.8	0.15	0.22
A	6	W24X131	-71.2	700.1	785.8	0.05	28.3	191.8	0.15	0.20
A	7	W24X94	-44.2	436.2	565.4	0.05	20.4	131.7	0.16	0.21
A	8	W24X94	-21.1	436.2	565.4	0.02	24.7	131.7	0.19	0.21
B	1	W27X217	-336.1	1104.9	1302.3	0.30	-111.9	367.1	0.27	0.58
B	2	W27X217	-291.8	1187.3	1302.3	0.25	-54.0	367.1	0.13	0.38
B	3	W27X217	-248.0	1187.3	1302.3	0.21	-44.0	367.1	0.11	0.32
B	4	W27X146	-204.0	783.3	875.7	0.26	-40.3	239.0	0.15	0.41
B	5	W27X146	-160.1	783.3	875.7	0.20	35.5	239.0	0.13	0.34
B	6	W27X146	-117.9	783.3	875.7	0.08	32.3	239.0	0.14	0.21
B	7	W27X102	-76.8	474.0	612.3	0.08	20.6	158.1	0.13	0.21
B	8	W27X102	-37.3	474.0	612.3	0.04	15.3	158.1	0.10	0.14
C	1	W27X217	-334.9	1104.9	1302.3	0.30	112.0	367.1	0.27	0.57
C	2	W27X217	-292.0	1187.3	1302.3	0.25	54.5	367.1	0.13	0.38
C	3	W27X217	-249.5	1187.3	1302.3	0.21	44.6	367.1	0.11	0.32
C	4	W27X146	-206.9	783.3	875.7	0.26	40.8	239.0	0.15	0.42
C	5	W27X146	-163.5	783.3	875.7	0.21	-35.8	239.0	0.13	0.34
C	6	W27X146	-121.1	783.3	875.7	0.08	-32.5	239.0	0.14	0.21
C	7	W27X102	-79.8	474.0	612.3	0.08	20.7	158.1	0.13	0.22
C	8	W27X102	-39.1	474.0	612.3	0.04	-15.4	158.1	0.10	0.14
D	1	W27X217	-334.9	1104.9	1302.3	0.30	-112.0	367.1	0.27	0.57
D	2	W27X217	-292.0	1187.3	1302.3	0.25	-54.5	367.1	0.13	0.38
D	3	W27X217	-249.5	1187.3	1302.3	0.21	-44.6	367.1	0.11	0.32
D	4	W27X146	-206.9	783.3	875.7	0.26	-40.8	239.0	0.15	0.42
D	5	W27X146	-163.5	783.3	875.7	0.21	35.8	239.0	0.13	0.34
D	6	W27X146	-121.1	783.3	875.7	0.08	32.5	239.0	0.14	0.21
D	7	W27X102	-79.8	474.0	612.3	0.08	-20.7	158.1	0.13	0.22
D	8	W27X102	-39.1	474.0	612.3	0.04	15.4	158.1	0.10	0.14
E	1	W27X217	-336.1	1104.9	1302.3	0.30	111.9	367.1	0.27	0.58

E	2	W27X217	-291.8	1187.3	1302.3	0.25	54.0	367.1	0.13	0.38
E	3	W27X217	-248.0	1187.3	1302.3	0.21	44.0	367.1	0.11	0.32
E	4	W27X146	-204.0	783.3	875.7	0.26	40.3	239.0	0.15	0.41
E	5	W27X146	-160.1	783.3	875.7	0.20	-35.5	239.0	0.13	0.34
E	6	W27X146	-117.9	783.3	875.7	0.08	-32.3	239.0	0.14	0.21
E	7	W27X102	-76.8	474.0	612.3	0.08	-20.6	158.1	0.13	0.21
E	8	W27X102	-37.3	474.0	612.3	0.04	-15.3	158.1	0.10	0.14
F	1	W24X146	-227.2	719.0	877.7	0.32	61.9	216.7	0.25	0.57
F	2	W24X146	-195.8	784.6	877.7	0.25	37.2	216.7	0.15	0.40
F	3	W24X146	-163.0	784.6	877.7	0.21	30.3	216.7	0.12	0.33
F	4	W24X131	-129.8	700.1	785.8	0.09	32.8	191.8	0.17	0.26
F	5	W24X131	-99.8	700.1	785.8	0.07	-29.3	191.8	0.15	0.22
F	6	W24X131	-71.2	700.1	785.8	0.05	-28.3	191.8	0.15	0.20
F	7	W24X94	-44.2	436.2	565.4	0.05	-20.4	131.7	0.16	0.21
F	8	W24X94	-21.1	436.2	565.4	0.02	-24.7	131.7	0.19	0.21
*NIVEL: se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado										

Tabla A5.3: Cálculo de los Factores Demanda/Resistencia por análisis PMM de las vigas

VIGAS			Demand	Resistencia			Demand	Resistenci		
Resultados en:			Pr	PcCom	PcTensio	Mr	Mc			
*EJE	NIVEL	Perfil	Tonf	Tonf	Tonf	Factor P	Tonf-m	Tonf-m	Factor M	Factor Total
A	1	W21X83	3.89	475.28	496.00	0.00	-44.28	101.62	0.44	0.44
B	1	W21X83	0.17	475.64	496.00	0.00	-43.56	101.62	0.43	0.43
C	1	W21X83	0.00	475.64	496.00	0.00	-44.74	101.62	0.44	0.44
D	1	W21X83	0.17	475.64	496.00	0.00	-43.56	101.62	0.43	0.43
E	1	W21X83	3.89	475.28	496.00	0.00	-44.28	101.62	0.44	0.44
A	2	W21X83	2.92	475.28	496.00	0.00	-48.76	101.62	0.48	0.48
B	2	W21X83	0.26	475.64	496.00	0.00	-47.41	101.62	0.47	0.47
C	2	W21X83	0.00	475.64	496.00	0.00	-49.36	101.62	0.49	0.49
D	2	W21X83	0.26	475.64	496.00	0.00	-47.41	101.62	0.47	0.47
E	2	W21X83	2.92	475.28	496.00	0.00	-48.76	101.62	0.48	0.48
A	3	W21X83	4.42	475.28	496.00	0.00	-49.99	101.62	0.49	0.50
B	3	W21X83	0.42	475.64	496.00	0.00	-47.59	101.62	0.47	0.47
C	3	W21X83	0.00	475.64	496.00	0.00	-50.16	101.62	0.49	0.49
D	3	W21X83	0.42	475.64	496.00	0.00	-47.59	101.62	0.47	0.47
E	3	W21X83	4.42	475.28	496.00	0.00	-49.99	101.62	0.49	0.50
A	4	W18X71	3.86	400.85	424.56	0.00	-39.85	75.18	0.53	0.53
B	4	W18X71	0.33	401.16	424.56	0.00	-37.47	75.18	0.50	0.50
C	4	W18X71	0.00	401.16	424.56	0.00	-39.66	75.18	0.53	0.53
D	4	W18X71	0.33	401.16	424.56	0.00	-37.47	75.18	0.50	0.50
E	4	W18X71	3.86	400.85	424.56	0.00	-39.85	75.18	0.53	0.53
A	5	W18X71	3.45	400.85	424.56	0.00	-37.68	75.18	0.50	0.51
B	5	W18X71	0.40	401.16	424.56	0.00	-34.95	75.18	0.46	0.47
C	5	W18X71	0.00	401.16	424.56	0.00	-37.50	75.18	0.50	0.50
D	5	W18X71	0.40	401.16	424.56	0.00	-34.95	75.18	0.46	0.47
E	5	W18X71	3.45	400.85	424.56	0.00	-37.68	75.18	0.50	0.51
A	6	W18X71	3.90	400.85	424.56	0.00	-33.85	75.18	0.45	0.45
B	6	W18X71	0.55	401.16	424.56	0.00	-31.06	75.18	0.41	0.41
C	6	W18X71	0.00	401.16	424.56	0.00	-33.81	75.18	0.45	0.45
D	6	W18X71	0.55	401.16	424.56	0.00	-31.06	75.18	0.41	0.41
E	6	W18X71	3.90	400.85	424.56	0.00	-33.85	75.18	0.45	0.45
A	7	W18X46	1.99	247.77	275.56	0.00	-23.70	47.02	0.50	0.51
B	7	W18X46	0.23	247.93	275.56	0.00	-21.75	47.02	0.46	0.46
C	7	W18X46	0.00	247.93	275.56	0.00	-23.58	47.02	0.50	0.50

D	7	W18X46	0.23	247.93	275.56	0.00	-21.75	47.02	0.46	0.46
E	7	W18X46	1.99	247.77	275.56	0.00	-23.70	47.02	0.50	0.51
A	8	W18X46	4.66	247.77	275.56	0.01	-19.26	47.02	0.41	0.42
B	8	W18X46	0.58	247.93	275.56	0.00	-18.51	47.02	0.39	0.39
C	8	W18X46	0.00	247.93	275.56	0.00	-20.30	47.02	0.43	0.43
D	8	W18X46	0.58	247.93	275.56	0.00	-18.51	47.02	0.39	0.39
E	8	W18X46	4.66	247.77	275.56	0.01	-19.26	47.02	0.41	0.42
*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado										

Anexo 6 Comparación de resultados de pórtico convencional sin y con Disipadores Viscoelásticos

Tabla A6.1: Comparación de fuerzas y factor Demanda/Resistencia por análisis PMM en columnas entre el pórtico sin DVE y con DVE

COLUMNAS: COMBO 3			Pr (Ton)		Mr (Ton-m)		Factor	
EJE	*NIVEL	Perfil	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE
A	1	W24X146	-281.1	-227.2	-99.9	-61.9	0.80	0.57
A	2	W24X146	-242.0	-195.8	-57.1	-37.2	0.54	0.40
A	3	W24X146	-200.1	-163.0	-47.0	-30.3	0.45	0.33
A	4	W24X131	-157.2	-129.8	-53.3	-32.8	0.47	0.26
A	5	W24X131	-119.7	-99.8	44.3	29.3	0.32	0.22
A	6	W24X131	-83.9	-71.2	41.6	28.3	0.28	0.20
A	7	W24X94	-50.5	-44.2	31.4	20.4	0.30	0.21
A	8	W24X94	-23.7	-21.1	32.8	24.7	0.28	0.21
B	1	W27X217	-309.4	-336.1	-183.9	-111.9	0.73	0.58
B	2	W27X217	-269.8	-291.8	-94.1	-54.0	0.46	0.38
B	3	W27X217	-230.3	-248.0	-79.3	-44.0	0.31	0.32
B	4	W27X146	-191.1	-204.0	-75.3	-40.3	0.52	0.41
B	5	W27X146	-151.9	-160.1	63.5	35.5	0.36	0.34
B	6	W27X146	-113.5	-117.9	59.0	32.3	0.32	0.21
B	7	W27X102	-75.4	-76.8	39.4	20.6	0.33	0.21
B	8	W27X102	-37.5	-37.3	32.3	15.3	0.24	0.14
C	1	W27X217	-306.0	-334.9	-184.0	112.0	0.72	0.57
C	2	W27X217	-267.0	-292.0	-94.8	54.5	0.45	0.38
C	3	W27X217	-228.4	-249.5	-80.2	44.6	0.31	0.32
C	4	W27X146	-189.7	-206.9	-76.1	40.8	0.53	0.42
C	5	W27X146	-150.8	-163.5	64.1	-35.8	0.36	0.34
C	6	W27X146	-112.7	-121.1	59.6	-32.5	0.32	0.21
C	7	W27X102	-74.8	-79.8	39.7	20.7	0.33	0.22
C	8	W27X102	-37.1	-39.1	32.7	-15.4	0.25	0.14
D	1	W27X217	-306.0	-334.9	184.0	-112.0	0.72	0.57
D	2	W27X217	-267.0	-292.0	94.8	-54.5	0.45	0.38
D	3	W27X217	-228.4	-249.5	80.2	-44.6	0.31	0.32
D	4	W27X146	-189.7	-206.9	76.1	-40.8	0.53	0.42
D	5	W27X146	-150.8	-163.5	-64.1	35.8	0.36	0.34
D	6	W27X146	-112.7	-121.1	-59.6	32.5	0.32	0.21
D	7	W27X102	-74.8	-79.8	-39.7	-20.7	0.33	0.22

D	8	W27X102	-37.1	-39.1	-32.7	15.4	0.25	0.14
E	1	W27X217	-309.4	-336.1	183.9	111.9	0.73	0.58
E	2	W27X217	-269.8	-291.8	94.1	54.0	0.46	0.38
E	3	W27X217	-230.3	-248.0	79.3	44.0	0.31	0.32
E	4	W27X146	-191.1	-204.0	75.3	40.3	0.52	0.41
E	5	W27X146	-151.9	-160.1	-63.5	-35.5	0.36	0.34
E	6	W27X146	-113.5	-117.9	-59.0	-32.3	0.32	0.21
E	7	W27X102	-75.4	-76.8	-39.4	-20.6	0.33	0.21
E	8	W27X102	-37.5	-37.3	-32.3	-15.3	0.24	0.14
F	1	W24X146	-281.1	-227.2	99.9	61.9	0.80	0.57
F	2	W24X146	-242.0	-195.8	57.1	37.2	0.54	0.40
F	3	W24X146	-200.1	-163.0	47.0	30.3	0.45	0.33
F	4	W24X131	-157.2	-129.8	53.3	32.8	0.47	0.26
F	5	W24X131	-119.7	-99.8	-44.3	-29.3	0.32	0.22
F	6	W24X131	-83.9	-71.2	-41.6	-28.3	0.28	0.20
F	7	W24X94	-50.5	-44.2	-31.4	-20.4	0.30	0.21
F	8	W24X94	-23.7	-21.1	-32.8	-24.7	0.28	0.21
*NIVEL: se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado								

Tabla A6.2: Comparación de fuerzas y factor Demanda/Resistencia por análisis PMM en vigas entre el pórtico sin DVE y con DVE

VIGAS:		COMBO3		Mr (Ton-m)		Factor	
*EJE	NIVEL	Perfil	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE	
A	1	W21X83	-65.58	-44.28	0.65	0.44	
B	1	W21X83	-65.63	-43.56	0.65	0.43	
C	1	W21X83	-65.60	-44.74	0.65	0.44	
D	1	W21X83	-65.63	-43.56	0.65	0.43	
E	1	W21X83	-65.58	-44.28	0.65	0.44	
A	2	W21X83	-73.69	-48.76	0.73	0.48	
B	2	W21X83	-74.19	-47.41	0.73	0.47	
C	2	W21X83	-74.16	-49.36	0.73	0.49	
D	2	W21X83	-74.19	-47.41	0.73	0.47	
E	2	W21X83	-73.69	-48.76	0.73	0.48	
A	3	W21X83	-77.07	-49.99	0.76	0.50	
B	3	W21X83	-76.57	-47.59	0.75	0.47	
C	3	W21X83	-76.51	-50.16	0.75	0.49	
D	3	W21X83	-76.57	-47.59	0.75	0.47	
E	3	W21X83	-77.07	-49.99	0.76	0.50	
A	4	W18X71	-60.48	-39.85	0.81	0.53	
B	4	W18X71	-59.76	-37.47	0.80	0.50	
C	4	W18X71	-59.76	-39.66	0.79	0.53	
D	4	W18X71	-59.76	-37.47	0.80	0.50	
E	4	W18X71	-60.48	-39.85	0.81	0.53	
A	5	W18X71	-57.37	-37.68	0.77	0.51	
B	5	W18X71	-56.75	-34.95	0.76	0.47	
C	5	W18X71	-56.76	-37.50	0.76	0.50	
D	5	W18X71	-56.75	-34.95	0.76	0.47	
E	5	W18X71	-57.37	-37.68	0.77	0.51	
A	6	W18X71	-51.52	-33.85	0.69	0.45	
B	6	W18X71	-50.93	-31.06	0.68	0.41	
C	6	W18X71	-50.95	-33.81	0.68	0.45	
D	6	W18X71	-50.93	-31.06	0.68	0.41	
E	6	W18X71	-51.52	-33.85	0.69	0.45	
A	7	W18X46	-33.49	-23.70	0.72	0.51	
B	7	W18X46	-33.23	-21.75	0.71	0.46	
C	7	W18X46	-33.26	-23.58	0.71	0.50	
D	7	W18X46	-33.23	-21.75	0.71	0.46	
E	7	W18X46	-33.49	-23.70	0.72	0.51	

A	8	W18X46	-26.35	-19.26	0.57	0.42
B	8	W18X46	-27.03	-18.51	0.58	0.39
C	8	W18X46	-27.02	-20.30	0.57	0.43
D	8	W18X46	-27.03	-18.51	0.58	0.39
E	8	W18X46	-26.35	-19.26	0.57	0.42
*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado						

Tabla A6.3: Comparación de fuerzas en columnas por COMBO5 (Servicio) entre el pórtico sin DVE y con DVE

COLUMNAS: COMBO 5			P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton)	
EJE	*NIVEL	Perfil	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE
A	1	W24X146	-150.9	-150.9	-2.25	-2.25	-2.57	-2.58
A	2	W24X146	-132.1	-132.1	-6.17	-6.17	-9.75	-9.76
A	3	W24X146	-113.3	-113.3	-5.82	-5.82	-8.49	-8.50
A	4	W24X131	-94.3	-94.4	-5.80	-5.80	-8.45	-8.46
A	5	W24X131	-75.4	-75.4	-6.06	-6.07	-9.14	-9.15
A	6	W24X131	-56.3	-56.4	-6.73	-6.74	-9.56	-9.57
A	7	W24X94	-37.2	-37.2	-5.20	-5.21	-7.92	-7.93
A	8	W24X94	-18.4	-18.4	-9.18	-9.19	-10.90	-10.90
B	1	W27X217	-293.6	-294.7	-0.07	-0.07	-0.08	-0.08
B	2	W27X217	-255.8	-256.7	-0.28	-0.27	-0.37	-0.36
B	3	W27X217	-218.6	-219.3	-0.47	-0.45	-0.60	-0.59
B	4	W27X146	-181.5	-182.0	-0.44	-0.43	-0.62	-0.60
B	5	W27X146	-145.0	-145.3	-0.56	-0.55	-0.79	-0.78
B	6	W27X146	-108.6	-108.8	-0.78	-0.77	-1.05	-1.03
B	7	W27X102	-72.3	-72.4	-0.55	-0.54	-0.90	-0.89
B	8	W27X102	-36.3	-36.3	-0.78	-0.77	-0.92	-0.91
C	1	W27X217	-295.3	-293.5	0.00	0.00	0.00	0.00
C	2	W27X217	-257.7	-256.5	-0.01	0.01	-0.01	0.01
C	3	W27X217	-220.5	-219.5	-0.01	0.01	-0.02	0.01
C	4	W27X146	-183.2	-182.5	-0.01	0.00	-0.02	0.01
C	5	W27X146	-146.4	-145.9	-0.01	0.00	-0.02	0.00
C	6	W27X146	-109.6	-109.3	-0.02	0.00	-0.02	0.00
C	7	W27X102	-72.8	-72.6	-0.01	0.00	-0.02	0.00
C	8	W27X102	-36.4	-36.3	-0.01	0.00	-0.02	0.00
D	1	W27X217	-295.3	-293.5	0.00	0.00	0.00	0.00
D	2	W27X217	-257.7	-256.5	0.01	-0.01	0.01	-0.01
D	3	W27X217	-220.5	-219.5	0.01	-0.01	0.02	-0.01
D	4	W27X146	-183.2	-182.5	0.01	0.00	0.02	-0.01
D	5	W27X146	-146.4	-145.9	0.01	0.00	0.02	0.00
D	6	W27X146	-109.6	-109.3	0.02	0.00	0.02	0.00
D	7	W27X102	-72.8	-72.6	0.01	0.00	0.02	0.00
D	8	W27X102	-36.4	-36.3	0.01	0.00	0.02	0.00
E	1	W27X217	-293.6	-294.7	0.07	0.07	0.08	0.08
E	2	W27X217	-255.8	-256.7	0.28	0.27	0.37	0.36

E	3	W27X217	-218.6	-219.3	0.47	0.45	0.60	0.59
E	4	W27X146	-181.5	-182.0	0.44	0.43	0.62	0.60
E	5	W27X146	-145.0	-145.3	0.56	0.55	0.79	0.78
E	6	W27X146	-108.6	-108.8	0.78	0.77	1.05	1.03
E	7	W27X102	-72.3	-72.4	0.55	0.54	0.90	0.89
E	8	W27X102	-36.3	-36.3	0.78	0.77	0.92	0.91
F	1	W24X146	-150.9	-150.9	2.25	2.25	2.57	2.58
F	2	W24X146	-132.1	-132.1	6.17	6.17	9.75	9.76
F	3	W24X146	-113.3	-113.3	5.82	5.82	8.49	8.50
F	4	W24X131	-94.3	-94.4	5.80	5.80	8.45	8.46
F	5	W24X131	-75.4	-75.4	6.06	6.07	9.14	9.15
F	6	W24X131	-56.3	-56.4	6.73	6.74	9.56	9.57
F	7	W24X94	-37.2	-37.2	5.20	5.21	7.92	7.93
F	8	W24X94	-18.4	-18.4	9.18	9.19	10.90	10.90
*NIVEL: se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado								

Tabla A6.4: Comparación de fuerzas en vigas por COMBO5 (Servicio) entre el pórtico sin DVE y con DVE

VIGAS: COMBO 5			P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton-m)	
*EJE	NIVEL	Perfil	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE
A	1	W21X83	2.83	2.84	16.17	16.16	-12.05	-12.04
B	1	W21X83	0.05	0.05	15.95	15.96	-11.97	-12.00
C	1	W21X83	0.00	0.00	15.95	15.95	-11.98	-11.98
D	1	W21X83	0.05	0.05	15.94	15.93	-11.96	-11.93
E	1	W21X83	2.83	2.84	16.01	16.01	-11.63	-11.64
A	2	W21X83	2.24	2.24	15.91	15.90	-11.48	-11.46
B	2	W21X83	0.08	0.08	15.95	15.97	-11.97	-12.01
C	2	W21X83	0.00	0.00	15.95	15.95	-11.98	-11.98
D	2	W21X83	0.08	0.08	15.94	15.93	-11.96	-11.91
E	2	W21X83	2.24	2.24	16.27	16.28	-12.44	-12.45
A	3	W21X83	2.45	2.46	15.82	15.81	-11.20	-11.17
B	3	W21X83	0.14	0.14	15.95	15.97	-11.97	-12.02
C	3	W21X83	0.01	0.00	15.95	15.95	-11.98	-11.98
D	3	W21X83	0.14	0.14	15.94	15.92	-11.93	-11.88
E	3	W21X83	2.45	2.46	16.36	16.37	-12.64	-12.66
A	4	W18X71	2.00	2.01	15.72	15.72	-11.16	-11.14
B	4	W18X71	0.13	0.13	15.99	16.00	-12.15	-12.19
C	4	W18X71	0.01	0.00	15.98	15.98	-12.15	-12.16
D	4	W18X71	0.13	0.13	15.98	15.96	-12.12	-12.08
E	4	W18X71	2.00	2.01	16.46	16.47	-13.13	-13.15
A	5	W18X71	1.93	1.93	15.55	15.55	-10.72	-10.70
B	5	W18X71	0.17	0.17	15.99	16.01	-12.14	-12.19
C	5	W18X71	0.01	0.00	15.98	15.98	-12.15	-12.15
D	5	W18X71	0.17	0.17	15.97	15.96	-12.11	-12.06
E	5	W18X71	1.93	1.93	16.63	16.64	-13.60	-13.62
A	6	W18X71	2.36	2.36	15.51	15.50	-10.54	-10.52
B	6	W18X71	0.24	0.25	16.00	16.02	-12.16	-12.21
C	6	W18X71	0.01	0.00	15.98	15.98	-12.15	-12.16
D	6	W18X71	0.24	0.25	15.97	15.95	-12.08	-12.03
E	6	W18X71	2.36	2.36	16.67	16.68	-13.65	-13.67
A	7	W18X46	1.44	1.44	15.52	15.51	-10.89	-10.88
B	7	W18X46	0.11	0.11	15.91	15.92	-12.12	-12.16
C	7	W18X46	0.01	0.00	15.90	15.90	-12.14	-12.14
D	7	W18X46	0.11	0.11	15.90	15.89	-12.12	-12.09

E	7	W18X46	1.44	1.44	16.50	16.51	-13.53	-13.55
A	8	W18X46	3.84	3.84	15.86	15.86	-11.45	-11.44
B	8	W18X46	0.26	0.27	15.93	15.94	-12.16	-12.19
C	8	W18X46	0.01	0.00	15.90	15.90	-12.14	-12.14
D	8	W18X46	0.26	0.27	15.88	15.87	-12.04	-12.00
E	8	W18X46	3.84	3.84	16.16	16.16	-12.25	-12.26
*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado								

Tabla A6.5: Comparación de fuerzas en columnas por fuerza sísmica EX entre el pórtico sin DVE y con DVE

COLUMNAS: EX			P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton-m)	
EJE	*NIVEL	Perfil	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE
A	1	W24X146	124.50	70.60	27.67	17.16	97.22	59.25
A	2	W24X146	104.96	58.77	25.82	15.38	47.05	27.14
A	3	W24X146	82.68	45.52	22.26	13.13	38.27	21.51
A	4	W24X131	59.36	31.94	24.21	13.67	44.52	24.01
A	5	W24X131	42.20	22.24	19.98	10.87	26.09	12.98
A	6	W24X131	26.27	13.49	15.15	8.07	16.30	7.23
A	7	W24X94	12.48	6.16	12.09	5.90	13.85	5.36
A	8	W24X94	5.15	2.50	5.13	2.02	4.16	1.67
B	1	W27X217	5.18	30.72	52.45	32.37	183.77	111.79
B	2	W27X217	4.82	25.95	51.15	30.11	93.75	53.65
B	3	W27X217	3.96	20.88	49.00	28.06	78.65	43.41
B	4	W27X146	3.22	15.61	42.74	23.56	74.64	39.66
B	5	W27X146	2.66	10.50	37.67	20.06	51.36	25.80
B	6	W27X146	1.93	6.14	30.96	15.84	36.35	16.76
B	7	W27X102	1.16	2.56	21.89	10.43	27.79	11.51
B	8	W27X102	0.52	0.29	12.58	5.02	8.27	1.49
C	1	W27X217	0.14	30.79	52.66	32.54	184.00	111.97
C	2	W27X217	0.13	26.35	51.92	30.70	94.80	54.45
C	3	W27X217	0.12	22.18	50.20	28.98	80.23	44.61
C	4	W27X146	0.11	18.02	43.69	24.30	76.09	40.78
C	5	W27X146	0.09	13.28	38.63	20.83	52.74	26.90
C	6	W27X146	0.08	8.86	32.13	16.80	37.92	18.06
C	7	W27X102	0.05	5.27	22.64	11.05	28.99	12.54
C	8	W27X102	0.03	2.08	13.56	5.87	9.11	2.33
D	1	W27X217	0.14	30.79	52.66	32.54	184.00	111.97
D	2	W27X217	0.13	26.35	51.92	30.70	94.80	54.45
D	3	W27X217	0.12	22.18	50.20	28.98	80.23	44.61
D	4	W27X146	0.11	18.02	43.69	24.30	76.09	40.78
D	5	W27X146	0.09	13.28	38.63	20.83	52.74	26.90
D	6	W27X146	0.08	8.86	32.13	16.80	37.92	18.06
D	7	W27X102	0.05	5.27	22.64	11.05	28.99	12.54
D	8	W27X102	0.03	2.08	13.56	5.87	9.11	2.33
E	1	W27X217	5.18	30.72	52.45	32.37	183.77	111.79
E	2	W27X217	4.82	25.95	51.15	30.11	93.75	53.65

E	3	W27X217	3.96	20.88	49.00	28.06	78.65	43.41
E	4	W27X146	3.22	15.61	42.74	23.56	74.64	39.66
E	5	W27X146	2.66	10.50	37.67	20.06	51.36	25.80
E	6	W27X146	1.93	6.14	30.96	15.84	36.35	16.76
E	7	W27X102	1.16	2.56	21.89	10.43	27.79	11.51
E	8	W27X102	0.52	0.29	12.58	5.02	8.27	1.49
F	1	W24X146	124.50	70.60	27.67	17.16	97.22	59.25
F	2	W24X146	104.96	58.77	25.82	15.38	47.05	27.14
F	3	W24X146	82.68	45.52	22.26	13.13	38.27	21.51
F	4	W24X131	59.36	31.94	24.21	13.67	44.52	24.01
F	5	W24X131	42.20	22.24	19.98	10.87	26.09	12.98
F	6	W24X131	26.27	13.49	15.15	8.07	16.30	7.23
F	7	W24X94	12.48	6.16	12.09	5.90	13.85	5.36
F	8	W24X94	5.15	2.50	5.13	2.02	4.16	1.67
*NIVEL: se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado								

Tabla A6.6: Comparación de fuerzas en vigas por fuerza sísmica EX entre el pódico sin DVE y con DVE

VIGAS: EX			P (Ton)		V2 (Ton)		M3 (Ton-m)	
*EJE	NIVEL	Perfil	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE	SIN DVE	CON DVE
A	1	W21X83	1.72	0.96	19.83	11.95	52.02	31.35
B	1	W21X83	0.15	0.12	20.18	11.82	53.21	31.16
C	1	W21X83	0.00	0.00	20.17	12.26	53.23	32.36
D	1	W21X83	0.15	0.12	20.18	11.82	53.27	31.20
E	1	W21X83	1.72	0.96	19.83	11.95	53.56	32.25
A	2	W21X83	1.19	0.61	22.57	13.33	59.36	35.06
B	2	W21X83	0.22	0.17	23.42	13.27	61.75	35.00
C	2	W21X83	0.00	0.00	23.41	14.01	61.78	36.98
D	2	W21X83	0.22	0.17	23.42	13.27	61.83	35.06
E	2	W21X83	1.19	0.61	22.57	13.33	60.84	35.90
A	3	W21X83	3.73	1.88	23.59	13.62	61.58	35.60
B	3	W21X83	0.36	0.28	24.32	13.34	64.11	35.17
C	3	W21X83	0.00	0.00	24.30	14.32	64.13	37.79
D	3	W21X83	0.36	0.28	24.32	13.34	64.24	35.27
E	3	W21X83	3.73	1.88	23.59	13.62	64.01	36.91
A	4	W18X71	3.43	1.79	17.25	9.67	45.22	25.36
B	4	W18X71	0.25	0.19	17.80	9.39	47.16	24.89
C	4	W18X71	0.00	0.00	17.80	10.22	47.21	27.11
D	4	W18X71	0.25	0.19	17.80	9.39	47.24	24.95
E	4	W18X71	3.43	1.79	17.25	9.67	46.92	26.27
A	5	W18X71	2.96	1.46	15.94	8.70	41.82	22.85
B	5	W18X71	0.27	0.22	16.66	8.44	44.15	22.36
C	5	W18X71	0.00	0.00	16.67	9.41	44.21	24.95
D	5	W18X71	0.27	0.22	16.66	8.44	44.24	22.43
E	5	W18X71	2.96	1.46	15.94	8.70	43.32	23.62
A	6	W18X71	3.19	1.46	13.74	7.26	35.94	19.02
B	6	W18X71	0.36	0.30	14.48	6.97	38.35	18.45
C	6	W18X71	0.00	0.00	14.48	8.01	38.39	21.26
D	6	W18X71	0.36	0.30	14.48	6.97	38.46	18.54
E	6	W18X71	3.19	1.46	13.74	7.26	37.43	19.74
A	7	W18X46	1.17	0.50	7.19	3.58	18.92	9.44
B	7	W18X46	0.14	0.12	7.80	3.47	20.68	9.20
C	7	W18X46	0.00	0.00	7.81	4.16	20.74	11.05
D	7	W18X46	0.14	0.12	7.80	3.47	20.72	9.24

E	7	W18X46	1.17	0.50	7.19	3.58	19.52	9.72
A	8	W18X46	1.85	0.70	4.99	2.42	12.98	6.31
B	8	W18X46	0.36	0.31	5.47	2.25	14.48	5.93
C	8	W18X46	0.00	0.00	5.46	2.93	14.50	7.78
D	8	W18X46	0.36	0.31	5.47	2.25	14.59	6.02
E	8	W18X46	1.85	0.70	4.99	2.42	13.71	6.60
*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado								

Anexo 7 Resultados de la Revisión de Diseño con el programa SAP2000 del Rediseño del Pórtico de Acero con Disipadores Viscoelásticos

Los dos factores críticos que se presentaron fueron los revisados por la relación Demanda/Resistencia por un análisis PMM (comportamiento Fuerza Axial-Momento Biaxial), y la relación capacidad viga/columna en las columnas (CBC)

Tabla A7.1: Factores críticos del análisis de columnas

EJE	*NIVEL	Elemento	Perfil	Factor	Tipo de Revisión
A	1	COL	W24X131	0.70	PMM
A	2	COL	W24X131	0.46	PMM
A	3	COL	W24X131	0.37	PMM
A	4	COL	W24X94	0.48	PMM
A	5	COL	W24X94	0.42	PMM
A	6	COL	W24X94	0.30	CBC
A	7	COL	W24X76	0.28	CBC
A	8	COL	W24X76	0.55	CBC
B	1	COL	W27X146	0.83	PMM
B	2	COL	W27X146	0.56	PMM
B	3	COL	W27X146	0.50	CBC
B	4	COL	W27X114	0.55	PMM
B	5	COL	W27X114	0.47	PMM
B	6	COL	W27X114	0.46	CBC
B	7	COL	W27X94	0.42	CBC
B	8	COL	W27X94	0.82	CBC
C	1	COL	W27X146	0.84	PMM
C	2	COL	W27X146	0.56	PMM
C	3	COL	W27X146	0.51	CBC
C	4	COL	W27X114	0.56	PMM
C	5	COL	W27X114	0.47	PMM
C	6	COL	W27X114	0.47	CBC
C	7	COL	W27X94	0.42	CBC
C	8	COL	W27X94	0.82	CBC
D	1	COL	W27X146	0.84	PMM
D	2	COL	W27X146	0.56	PMM
D	3	COL	W27X146	0.51	CBC
D	4	COL	W27X114	0.56	PMM

D	5	COL	W27X114	0.47	PMM
D	6	COL	W27X114	0.47	CBC
D	7	COL	W27X94	0.42	CBC
D	8	COL	W27X94	0.82	CBC
E	1	COL	W27X146	0.83	PMM
E	2	COL	W27X146	0.56	PMM
E	3	COL	W27X146	0.50	CBC
E	4	COL	W27X114	0.55	PMM
E	5	COL	W27X114	0.47	PMM
E	6	COL	W27X114	0.46	CBC
E	7	COL	W27X94	0.42	CBC
E	8	COL	W27X94	0.82	CBC
F	1	COL	W24X131	0.70	PMM
F	2	COL	W24X131	0.46	PMM
F	3	COL	W24X131	0.37	PMM
F	4	COL	W24X94	0.48	PMM
F	5	COL	W24X94	0.42	PMM
F	6	COL	W24X94	0.30	CBC
F	7	COL	W24X76	0.28	CBC
F	8	COL	W24X76	0.55	CBC
*NIVEL: se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado					

Tabla A7.2: Cálculo de los Factores Demanda/Resistencia por análisis PMM de las columnas

COLUMNAS			Demanda	Resistencia			Demanda	Resistencia		
Resultados en combo:			Pr	PcComp	PcTension		Mr	McMajor		
EJE	*NIVEL	Perfil	Tonf	Tonf	Tonf	Factor P	Tonf-m	Tonf-m	Factor M	Factor Total
A	1	W24X131	-220.93	639.98	785.85	0.35	-76.37	191.83	0.35	0.70
A	2	W24X131	-191.03	700.13	785.85	0.27	-40.01	191.83	0.19	0.46
A	3	W24X131	-159.50	700.13	785.85	0.23	-31.01	191.83	0.14	0.37
A	4	W24X94	-127.62	436.16	565.40	0.29	-27.15	131.69	0.18	0.48
A	5	W24X94	-98.56	436.16	565.40	0.23	28.85	131.69	0.19	0.42
A	6	W24X94	-70.92	436.16	565.40	0.08	28.42	131.69	0.22	0.30
A	7	W24X76	-44.89	335.27	457.22	0.07	21.95	103.69	0.21	0.28
A	8	W24X76	-21.36	335.27	457.22	0.03	25.41	103.69	0.25	0.28
B	1	W27X146	-328.31	732.05	875.66	0.45	-103.54	239.01	0.39	0.83
B	2	W27X146	-285.31	783.34	875.66	0.36	-51.75	239.01	0.19	0.56
B	3	W27X146	-242.64	783.34	875.66	0.31	-40.38	239.01	0.15	0.46
B	4	W27X114	-199.96	543.88	683.79	0.37	-36.29	177.83	0.18	0.55
B	5	W27X114	-157.06	543.88	683.79	0.29	35.28	177.83	0.18	0.47
B	6	W27X114	-115.77	543.88	683.79	0.21	32.63	177.83	0.16	0.38
B	7	W27X94	-75.63	428.95	565.40	0.09	24.59	144.13	0.17	0.26
B	8	W27X94	-37.02	428.95	565.40	0.04	16.84	144.13	0.12	0.16
C	1	W27X146	-330.43	732.05	875.66	0.45	-103.51	239.01	0.38	0.84
C	2	W27X146	-288.44	783.34	875.66	0.37	-51.64	239.01	0.19	0.56
C	3	W27X146	-246.34	783.34	875.66	0.31	-40.20	239.01	0.15	0.46
C	4	W27X114	-204.10	543.88	683.79	0.38	-36.08	177.83	0.18	0.56
C	5	W27X114	-161.24	543.88	683.79	0.30	35.07	177.83	0.18	0.47
C	6	W27X114	-119.38	543.88	683.79	0.22	32.35	177.83	0.16	0.38
C	7	W27X94	-78.45	428.95	565.40	0.09	24.35	144.13	0.17	0.26
C	8	W27X94	-38.46	428.95	565.40	0.04	16.43	144.13	0.11	0.16
D	1	W27X146	-330.43	732.05	875.66	0.45	103.51	239.01	0.38	0.84
D	2	W27X146	-288.44	783.34	875.66	0.37	51.64	239.01	0.19	0.56
D	3	W27X146	-246.34	783.34	875.66	0.31	40.20	239.01	0.15	0.46
D	4	W27X114	-204.10	543.88	683.79	0.38	36.08	177.83	0.18	0.56
D	5	W27X114	-161.24	543.88	683.79	0.30	-35.07	177.83	0.18	0.47
D	6	W27X114	-119.38	543.88	683.79	0.22	-32.35	177.83	0.16	0.38
D	7	W27X94	-78.45	428.95	565.40	0.09	-24.35	144.13	0.17	0.26
D	8	W27X94	-38.46	428.95	565.40	0.04	-16.43	144.13	0.11	0.16
E	1	W27X146	-328.31	732.05	875.66	0.45	103.54	239.01	0.39	0.83

E	2	W27X146	-285.31	783.34	875.66	0.36	51.75	239.01	0.19	0.56
E	3	W27X146	-242.64	783.34	875.66	0.31	40.38	239.01	0.15	0.46
E	4	W27X114	-199.96	543.88	683.79	0.37	36.29	177.83	0.18	0.55
E	5	W27X114	-157.06	543.88	683.79	0.29	-35.28	177.83	0.18	0.47
E	6	W27X114	-115.77	543.88	683.79	0.21	-32.63	177.83	0.16	0.38
E	7	W27X94	-75.63	428.95	565.40	0.09	-24.59	144.13	0.17	0.26
E	8	W27X94	-37.02	428.95	565.40	0.04	-16.84	144.13	0.12	0.16
F	1	W24X131	-220.93	639.98	785.85	0.35	76.37	191.83	0.35	0.70
F	2	W24X131	-191.03	700.13	785.85	0.27	40.01	191.83	0.19	0.46
F	3	W24X131	-159.50	700.13	785.85	0.23	31.01	191.83	0.14	0.37
F	4	W24X94	-127.62	436.16	565.40	0.29	27.15	131.69	0.18	0.48
F	5	W24X94	-98.56	436.16	565.40	0.23	-28.85	131.69	0.19	0.42
F	6	W24X94	-70.92	436.16	565.40	0.08	-28.42	131.69	0.22	0.30
F	7	W24X76	-44.89	335.27	457.22	0.07	-21.95	103.69	0.21	0.28
F	8	W24X76	-21.36	335.27	457.22	0.03	-25.41	103.69	0.25	0.28
*NIVEL: se refiere a la columna que se encuentra debajo del nivel indicado										

Tabla A7.3: Cálculo de los Factores Demanda/Resistencia por análisis PMM de las vigas

VIGAS			Demanda	Resistencia			Demanda	Resistencia		
Resultados en combo:			Pr	PcCom p	PcTensio n		Mr	Mc		
*EJE	NIVEL	Perfil	Tonf	Tonf	Tonf	Factor P	Tonf-m	Tonf-m	Factor M	Factor Total
A	1	W21X50	3.89	262.2	300.1	0.01	-41.3	57.0	0.72	0.73
B	1	W21X50	0.14	262.3	300.1	0.00	-39.3	57.0	0.69	0.69
C	1	W21X50	0.00	262.3	300.1	0.00	-40.2	57.0	0.71	0.71
D	1	W21X50	0.14	262.3	300.1	0.00	-39.3	57.0	0.69	0.69
E	1	W21X50	3.89	262.2	300.1	0.01	-41.3	57.0	0.72	0.73
A	2	W21X50	3.18	262.2	300.1	0.01	-46.3	57.0	0.81	0.82
B	2	W21X50	0.21	262.3	300.1	0.00	-43.3	57.0	0.76	0.76
C	2	W21X50	0.00	262.3	300.1	0.00	-44.9	57.0	0.79	0.79
D	2	W21X50	0.21	262.3	300.1	0.00	-43.3	57.0	0.76	0.76
E	2	W21X50	3.18	262.2	300.1	0.01	-46.3	57.0	0.81	0.82
A	3	W21X50	3.61	262.2	300.1	0.01	-47.1	57.0	0.83	0.83
B	3	W21X50	0.33	262.3	300.1	0.00	-43.7	57.0	0.77	0.77
C	3	W21X50	0.00	262.3	300.1	0.00	-45.7	57.0	0.80	0.80
D	3	W21X50	0.33	262.3	300.1	0.00	-43.7	57.0	0.77	0.77
E	3	W21X50	3.61	262.2	300.1	0.01	-47.1	57.0	0.83	0.83
A	4	W18X46	2.89	247.8	275.6	0.01	-38.6	47.0	0.82	0.83
B	4	W18X46	0.26	248.0	275.6	0.00	-35.8	47.0	0.76	0.76
C	4	W18X46	0.00	248.0	275.6	0.00	-37.7	47.0	0.80	0.80
D	4	W18X46	0.26	248.0	275.6	0.00	-35.8	47.0	0.76	0.76
E	4	W18X46	2.89	247.8	275.6	0.01	-38.6	47.0	0.82	0.83
A	5	W18X46	2.67	247.8	275.6	0.00	-36.0	47.0	0.77	0.77
B	5	W18X46	0.30	248.0	275.6	0.00	-33.0	47.0	0.70	0.70
C	5	W18X46	0.00	248.0	275.6	0.00	-35.1	47.0	0.75	0.75
D	5	W18X46	0.30	248.0	275.6	0.00	-33.0	47.0	0.70	0.70
E	5	W18X46	2.67	247.8	275.6	0.00	-36.0	47.0	0.77	0.77
A	6	W18X46	2.91	247.8	275.6	0.01	-31.8	47.0	0.68	0.68
B	6	W18X46	0.38	248.0	275.6	0.00	-28.8	47.0	0.61	0.61
C	6	W18X46	0.01	248.0	275.6	0.00	-31.1	47.0	0.66	0.66
D	6	W18X46	0.38	248.0	275.6	0.00	-28.8	47.0	0.61	0.61
E	6	W18X46	2.91	247.8	275.6	0.01	-31.8	47.0	0.68	0.68
A	7	W18X40	1.99	208.7	240.9	0.00	-25.3	40.6	0.62	0.63
B	7	W18X40	0.27	208.9	240.9	0.00	-22.5	40.6	0.55	0.55
C	7	W18X40	0.00	208.9	240.9	0.00	-24.6	40.6	0.61	0.61

D	7	W18X40	0.27	208.9	240.9	0.00	-22.5	40.6	0.55	0.55
E	7	W18X40	1.99	208.7	240.9	0.00	-25.3	40.6	0.62	0.63
A	8	W18X40	4.82	208.7	240.9	0.01	-20.1	40.6	0.49	0.50
B	8	W18X40	0.66	208.9	240.9	0.00	-18.9	40.6	0.46	0.47
C	8	W18X40	0.01	208.9	240.9	0.00	-20.9	40.6	0.51	0.51
D	8	W18X40	0.66	208.9	240.9	0.00	-18.9	40.6	0.46	0.47
E	8	W18X40	4.82	208.7	240.9	0.01	-20.1	40.6	0.49	0.50

*EJE: se refiere a la viga que se encuentra a la derecha del eje indicado

Anexo 8 Deformaciones y Fuerzas Axiales de los disipadores viscoelásticos adicionados al pórtico convencional

En la siguiente gráfica se muestra el nombre asignado a cada disipador viscoelástico para una mayor comprensión de las tablas de la siguiente página:

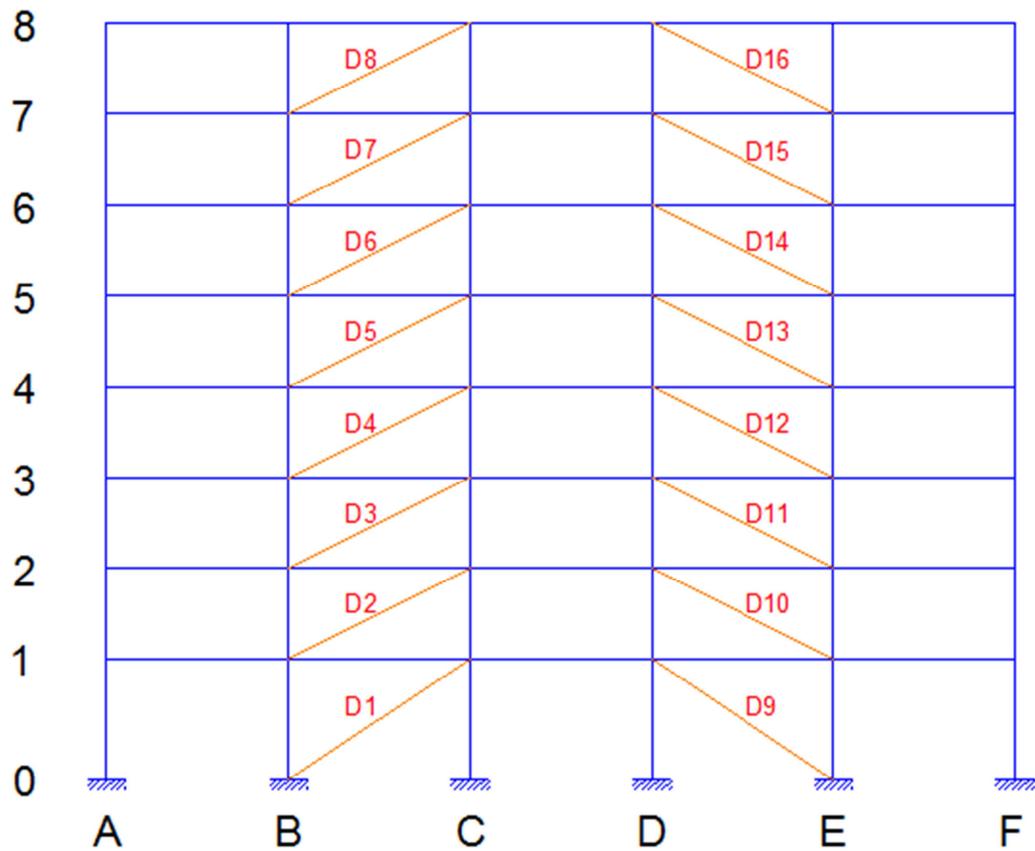


Tabla A8.1. Deformaciones y Fuerzas Axiales en los DVE

DVE	P Ton	U1 cm	Deformación Unitaria	< 100%
1	8.46	0.85	43%	OK
2	9.11	0.91	46%	OK
3	9.57	1.02	51%	OK
4	13.56	1.4	70%	OK
5	16.16	1.66	83%	OK
6	15.6	1.65	82%	OK
7	16.5	1.88	94%	OK
8	16.55	1.83	91%	OK
9	11.86	1.16	58%	OK
10	13.4	1.25	62%	OK
11	11.8	1.3	65%	OK
12	13.78	1.63	81%	OK
13	12.91	1.53	77%	OK
14	10.63	1.45	72%	OK
15	11.72	1.54	77%	OK
16	11.03	1.41	70%	OK

Anexo 9 Deformaciones y Fuerzas Axiales de los disipadores viscoelásticos del Rediseño del pórtico de Acero

Tabla A9.1. Deformaciones y Fuerzas Axiales en los nuevos DVE

Link DVE	P Ton	U1 cm	Deformación Unitaria	≤ 100%
1	8.46	1.26	57%	OK
2	9.11	1.35	61%	OK
3	9.57	1.28	58%	OK
4	13.56	1.60	73%	OK
5	16.16	1.88	86%	OK
6	15.60	1.91	87%	OK
7	16.50	2.11	96%	OK
8	16.55	1.73	78%	OK
11	11.86	1.49	68%	OK
12	13.40	1.46	66%	OK
13	11.80	1.04	47%	OK
14	13.78	1.38	63%	OK
16	12.91	1.45	66%	OK
17	10.63	1.40	64%	OK
18	11.72	1.82	83%	OK
19	11.03	1.80	82%	OK