



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

TÍTULO:

Uso de disipadores viscosos en edificios de hormigón armado en la ciudad de Guayaquil para el mejoramiento del desempeño sísmico

AUTOR:

Cuntó López, Italo Xavier

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

TUTOR:

Casal Rodríguez, Xavier Federico

**Guayaquil, Ecuador
2014**



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

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por **Italo Xavier Cuntó López**, como requerimiento parcial para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

Xavier Federico, Casal Rodríguez

REVISOR(ES)

Walter, Mera Ortiz

Sonia, Baño

DIRECTOR DE LA CARRERA

Mario, Dueñas Rossi

Guayaquil, a los 25 días del mes de Marzo del año 2014



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

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Italo Xavier Cuntó López**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **Uso de disipadores viscosos en edificios de hormigón armado en la ciudad de Guayaquil para el mejoramiento del desempeño sísmico** 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 25 días del mes de Marzo del año 2014

EL AUTOR:

Italo Xavier Cuntó López



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

AUTORIZACIÓN

Yo, **Italo Xavier Cuntó López**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Uso de disipadores viscosos en edificios de hormigón armado en la ciudad de Guayaquil para el mejoramiento del desempeño sísmico**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 25 días del mes de Marzo del año 2014

EL AUTOR:

Italo Xavier Cuntó López

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por la vida y por los padres que me han dado, ya que ellos son los que, con su trabajo y esfuerzo, me han podido dar la educación y formación necesaria para salir adelante en la vida y además, son un ejemplo a seguir.

Agradezco a mis hermanos y amigos, porque son un apoyo incansable y un pilar fundamental en mi vida para sobreponerme a los obstáculos.

A mi novia, por su amor, apoyo, comprensión y motivación que me brinda todos los días para que siempre sea positivo y me esfuerce al máximo por lograr mis metas.

A mis profesores por mi formación académica y profesional; en especial al Ing. Xavier Casal, por aportar con su conocimiento y experiencia en la realización de este trabajo.

A la empresa Sísmica-Ingenieros Consultores; a los ingenieros, Ottón Lara y Jaime Hernández, por poder darme la oportunidad de trabajar y aprender de ellos, además del apoyo brindado para poder realizar este trabajo.

Un agradecimiento especial a la empresa Geocimientos S.A. por facilitarme la información de los perfiles estratigráficos de la ciudad de Guayaquil.

Italo Cuntó

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia, amigos y a mi novia por la motivación que me dan para ser siempre positivo y alcanzar mis metas, esforzándome al máximo.

Italo Cuntó

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Xavier Federico Casal Rodríguez
PROFESOR GUÍA Ó TUTOR

Walter Mera Ortiz
PROFESOR DELEGADO



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

CALIFICACIÓN

**Xavier Federico Casal Rodríguez
PROFESOR GUÍA Ó TUTOR**

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes.....	4
Objetivos.....	7
Preguntas de investigación.....	8
CAPÍTULO 1: EFECTOS DEL SISMO EN LOS SUELOS BLANDOS (GUAYAQUIL).....	9
1.1. Introducción	9
1.2. Suelos de Guayaquil.....	10
1.2.1. Espesor de Estratos de Suelos de 0.00m a 4.00m.....	12
1.2.2. Espesor de Estratos de Suelos de 4.00m a 10.00m.....	13
1.2.3. Espesor de Estratos de Suelos de 10.00m a 15.00m.....	13
1.3. Sismicidad de Guayaquil	13
1.4. Efecto de amplificación de onda sísmica.....	16
CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE 1 GRADO DE LIBERTAD AMORTIGUADOS ...	17
2.1. Introducción	17
2.2. Comportamiento Dinámico de las Estructuras.....	18
2.2.1. FI (Fuerza de Inercia)	20
2.2.2. FD (Fuerza de Amortiguamiento)	21
2.2.3. FS (Fuerza Elástica).....	21
2.3. Sistemas de 1 Grado de Libertad Amortiguados en Vibración libre	25
2.4. Sistemas de 1 Grado de Libertad Amortiguados sujetos a Carga armónica y periódica.....	32
2.5. Sistemas de 1 Grado de Libertad Amortiguados sujetos a Carga Periódica.....	41
2.6. Sistemas de 1 Grado de Libertad Amortiguados sujetos a pulsos	43

2.7. Sistemas de 1 Grado de Libertad Amortiguados sujetos a Carga de Sismo.....	46
CAPÍTULO 3: SISTEMAS PASIVOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA.....	56
3.1. Introducción	56
3.2. Sistema de Protección Sísmica Pasivo con Disipadores de Energía	57
3.3. Tipos de Disipadores de Energía.....	57
3.3.1. Disipador de Fricción.....	58
3.3.2. Disipador de Plastificación de Metales	61
3.3.3. Disipador Viscoelástico	65
3.3.4. Disipador Viscoso.....	67
CAPÍTULO 4: TEORÍA Y COMPORTAMIENTO DE LOS DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO	71
4.1. Introducción	71
4.2. Energía Disipada por Amortiguamiento	73
4.3. Amortiguamiento Viscoso Efectivo	75
4.4. Principios Básicos de la Dinámica de Fluidos	81
4.4.1. Las leyes de Equilibrio.....	81
4.4.2. Fluido Newtoniano.....	82
4.4.3. Fluido No-Newtoniano	84
4.5. Disipadores Viscosos de orificios	84
4.6. Análisis Estructural incluyendo Disipadores de Fluido Viscoso	88
4.6.1. Sistemas de 1 GDL	88
4.6.2. Sistemas de Múltiples Grados de Libertad	89
4.7. Diagrama de Flujo para Control de la Respuesta del Sistema	91
4.8. Ejemplo de Aplicación	92
4.8.1. Generalidades	92

4.8.2. Método de la Diferencia Central	95
4.8.3. Respuesta del Sistema Sin Disipador	97
4.8.4. Respuesta del Sistema Con Disipador	100
4.8.5. Comparación entre la Respuesta del Sistema Sin y Con Disipador	103
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y DISEÑO DE PÓRTICOS DE HORMIGÓN ARMADO DE 4, 8 Y 12 PISOS.....	105
5.1. Introducción	105
5.2. Normas y Códigos a utilizar	105
5.3. Características de los Pórticos	106
5.3.1. Geometría en elevación	106
5.3.2. Materiales.....	107
5.4. Estados de Carga	107
5.4.1. Carga Muerta	107
5.4.2. Carga Viva.....	109
5.4.3. Carga Sísmica.....	111
5.5. Combinaciones de Carga	113
5.6. Análisis y Diseño de los Pórticos en el Programa SAP2000	113
5.6.1. Consideraciones en los modelos de los Pórticos	113
5.6.2. Prediseño	114
5.6.3. Análisis Modal	115
5.6.4. Deformaciones laterales y Derivas	116
5.6.5. Diseño Estructural de los Pórticos.....	116
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA DE LOS PÓRTICOS SIN Y CON DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO	121
6.1. Introducción	121
6.2. Análisis FNA (Fast Non-Linear Analysis).....	121

6.3. Registros Acelerográficos, Sismo de México de 1985 y Sismo de “El Centenario”	123
6.4. Análisis Dinámico No-Lineal Tiempo-Historia de los pórticos sin disipadores	126
6.5. Análisis Dinámico No-Lineal Tiempo-Historia de los pórticos con disipadores	155
6.5.1. Propiedades de los Elementos Link	157
6.5.2. Distribución de los disipadores en la altura de los pórticos	160
6.5.3 Resultados Obtenidos	166
6.6. Análisis comparativo de los resultados obtenidos para los pórticos sin disipadores y con disipadores	195
6.6.1. Deformaciones y Derivas	196
6.6.2. Energía.....	201
6.6.3. Cortante Basal.....	205
6.6.4. Fuerzas Internas en los elementos.....	206
6.6.5. Diagramas de momento-curvatura de vigas y columnas.....	214
CONCLUSIONES	227
RECOMENDACIONES	230
BIBLIOGRAFÍA.....	231
ANEXOS.....	234
Anexo 1: Resultados de perforaciones en suelos de la ciudad de Guayaquil (Via La Costa), proporcionado por la Empresa Geocimientos S.A.	235
Anexo 2: Resultado de perforaciones en suelos de la ciudad de Guayaquil (Av. Barcelona), proporcionado por la Empresa Geocimientos S.A.	236
Anexo 3: Registro Acelerográfico de la componente N-S del Sismo de Imperial Valley (El Centro, California 1940).....	237
Anexo 4: Espectro de diseño Elástico e Inelástico según NEC-11 (R=5)....	251

Anexo 5: Resultado del diseño a flexión de las vigas del pórtico de 4 Pisos.	253
Anexo 6: Resultado del diseño a flexión de las columnas del pórtico de 4 Pisos.....	254
Anexo 7: Resultado del diseño a corte de las vigas y columnas del pórtico de 4 Pisos.....	255
Anexo 8: Resultado del diseño a flexión de las vigas del pórtico de 8 Pisos.	256
Anexo 9: Resultado del diseño a flexión de las columnas del pórtico de 8 Pisos.....	257
Anexo 10: Resultado del diseño a corte de las vigas y columnas del pórtico de 8 Pisos.....	258
Anexo 11: Resultado del diseño a flexión de las vigas del pórtico de 12 Pisos.	259
Anexo 12: Resultado del diseño a flexión de las vigas del pórtico de 12 Pisos.	260
Anexo 13: Resultado del diseño a flexión de las columnas del pórtico de 12 Pisos.....	261
Anexo 14: Resultado del diseño a corte de las vigas del pórtico de 12 Pisos.	262
Anexo 15: Resultado del diseño a corte de las vigas del pórtico de 12 Pisos.	263
Anexo 16: Propiedades de los disipadores de fluido viscoso de la empresa TAYLOR DEVICES.....	264

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.3.1 Valores del exponente de la velocidad del disipador y sus correspondientes valores de λ . (Pardo 2007).....	80
Tabla 4.8.3.1 Resumen de Resultados del Sistema sin Disipador.	97
Tabla 4.8.4.1 Respuesta del Sistema con Disipador de Fluido Viscoso.	100
Tabla 4.8.5.1 Comparación de las Respuestas del Sistema Sin y Con Disipador.	103
Tabla 5.4.1.1 Cargas muertas adicionales usadas para el análisis de los pórticos.	108
Tabla 5.5.1 Combinaciones de Carga.....	113
Tabla 5.6.2.1 Secciones de Vigas y Columnas del pórtico de 4 pisos.....	114
Tabla 5.6.2.2 Secciones de Vigas y Columnas del pórtico de 8 pisos.....	115
Tabla 5.6.2.3 Secciones de Vigas y Columnas del pórtico de 12 pisos.....	115
Tabla 5.6.5.1 Secciones diseñadas de Columnas y Vigas para el pórtico de 4 pisos.	117
Tabla 5.6.5.2 Deformaciones laterales y derivas inelásticas del pórtico de 4 pisos.	117
Tabla 5.6.5.3 Participación modal de las masas del pórtico de 4 pisos.....	118
Tabla 5.6.5.4 Secciones diseñadas de Columnas y Vigas para el pórtico de 8 pisos.	118
Tabla 5.6.5.5 Deformaciones laterales y derivas inelásticas del pórtico de 8 pisos.	118
Tabla 5.6.5.6 Participación modal de las masas del pórtico de 8 pisos.....	119
Tabla 5.6.5.7 Secciones diseñadas de Columnas y Vigas para el pórtico de 12 pisos.	119

Tabla 5.6.5.8 Deformaciones laterales y derivas inelásticas del pórtico de 12 pisos.	120
Tabla 5.6.5.9 Participación modal de las masas del pórtico de 12 pisos.	120
Tabla 6.4.1 Deformaciones y Derivas de pisos para $t=29.12s$ (momento de la deformación máx. del piso 4).....	129
Tabla 6.4.2 Deformaciones y Derivas máximas de pisos $t=5.36s$ (momento de la deformación máx. del piso 4).....	129
Tabla 6.4.3 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 4 pisos para el registro SCT.....	131
Tabla 6.4.4 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 4 pisos para el registro El Centenario.	132
Tabla 6.4.5 Cortantes Basales máximos en el pórtico de 4 pisos.....	134
Tabla 6.4.6 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 4 pisos, producidas por los registros.....	135
Tabla 6.4.7 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al cuarto piso, producidas por los registros.....	136
Tabla 6.4.8 Deformaciones y Derivas de pisos para $t=32.05s$ (momento de la deformación máx. del piso 8).....	137
Tabla 6.4.9 Deformaciones y Derivas de pisos para $t=4.4s$ (momento de la deformación máx. del piso 8).....	137
Tabla 6.4.10 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 8 pisos para el registro SCT.....	139
Tabla 6.4.11 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 8 pisos para el registro El Centenario.	140
Tabla 6.4.12 Cortantes Basales máximos en el pórtico de 8 pisos.....	142
Tabla 6.4.13 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 8 pisos, producidas por los registros.....	143
Tabla 6.4.14 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al octavo piso, producidas por los registros.	144

Tabla 6.4.15 Deformaciones y Derivas de pisos para $t=34.14s$ (momento de la deformación máx. del piso 12).	146
Tabla 6.4.16 Deformaciones y Derivas máximas de pisos para $t=4.02s$ (momento de la deformación máx. del piso 12).	146
Tabla 6.4.17 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 12 pisos para el registro SCT.	148
Tabla 6.4.18 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 8 pisos para el registro El Centenario.	149
Tabla 6.4.19 Cortantes Basales máximos en el pórtico de 12 pisos.	151
Tabla 6.4.20 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 12 pisos, producidas por los registros.	152
Tabla 6.4.21 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al duodécimo piso, producidas por los registros.	154
Tabla 6.5.1 Masas y Coeficientes de amortiguamiento calculados para los diferentes pisos del pórtico de 4 pisos.	156
Tabla 6.5.2 Masas y Coeficientes de amortiguamiento calculados para los diferentes pisos del pórtico de 8 pisos.	157
Tabla 6.5.3 Masas y Coeficientes de amortiguamiento calculados para los diferentes pisos del pórtico de 12 pisos.	157
Tabla 6.5.3.1 Deformaciones y Derivas de pisos para $t=29.16s$ (momento de la deformación máx. del piso 4).	166
Tabla 6.5.3.2 Deformaciones y Derivas de pisos para $t=5.36s$ (momento de la deformación máx. del piso 4).	166
Tabla 6.5.3.3 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 4 pisos para el registro SCT.	168
Tabla 6.5.3.4 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 4 pisos para el registro El Centenario.	169
Tabla 6.5.3.5 Cortantes Basales máximos en el pórtico de 4 pisos.	171
Tabla 6.5.3.6 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 4 pisos, producidas por los registros.	171

Tabla 6.5.3.7 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al cuarto piso, producidas por los registros.....	172
Tabla 6.5.3.8 Fuerzas Axiales Max. producidas por el registro El Centenario y disipador seleccionado.	174
Tabla 6.5.3.9 Deformaciones y Derivas de pisos para $t=30.98s$ (momento de la deformación máx. del piso 8).	175
Tabla 6.5.3.10 Deformaciones y Derivas de pisos para $t=4.39s$ (momento de la deformación máx. del piso 8).	175
Tabla 6.5.3.11 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 8 pisos para el registro SCT.	177
Tabla 6.5.3.12 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 8 pisos para el registro SCT.	178
Tabla 6.5.3.13 Cortantes Basales máximos en el pórtico de 8 pisos.	180
Tabla 6.5.3.14 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 8 pisos, producidas por los registros.	181
Tabla 6.5.3.15 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al octavo piso, producidas por los registros.	182
Tabla 6.5.3.16 Fuerzas Axiales Max. producidas por los registros y disipador seleccionado.	184
Tabla 6.5.3.17 Deformaciones y Derivas de pisos para $t=30.57s$ (momento de la deformación máx. del piso 12).	185
Tabla 6.5.3.18 Deformaciones y Derivas de pisos para $t=3.99s$ (momento de la deformación máx. del piso 12).	185
Tabla 6.5.3.19 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 12 pisos para el registro SCT.	187
Tabla 6.5.3.20 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 12 pisos para el registro El Centenario.	188
Tabla 6.5.3.21 Cortantes Basales máximos en el pórtico de 12 pisos.	190
Tabla 6.5.3.22 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 12 pisos, producidas por los registros.	191

Tabla 6.5.3.23 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al duodécimo piso, producidas por los registros.	193
Tabla 6.5.3.24 Fuerzas Axiales Max. producidas por los registros y disipador seleccionado.	195
Tabla 6.6.1.1 Comparación entre las Deformaciones obtenidas para el registro SCT.	196
Tabla 6.6.1.2 Comparación entre las Derivas obtenidas para el registro SCT.	196
Tabla 6.6.1.3 Comparación entre las Deformaciones obtenidas para el registro El Centenario.	196
Tabla 6.6.1.4 Comparación entre las Derivas obtenidas para el registro El Centenario.	197
Tabla 6.6.1.5 Comparación entre las Deformaciones obtenidas para el registro SCT.	197
Tabla 6.6.1.6 Comparación entre las Derivas obtenidas para el registro SCT.	198
Tabla 6.6.1.7 Comparación entre las Deformaciones obtenidas para el registro El Centenario.	198
Tabla 6.6.1.8 Comparación entre las Derivas obtenidas para el registro El Centenario.	198
Tabla 6.6.1.9 Comparación entre las Deformaciones obtenidas para el registro SCT.	199
Tabla 6.6.1.10 Comparación entre las Derivas obtenidas para el registro SCT.	199
Tabla 6.6.1.11 Comparación entre las Deformaciones obtenidas para el registro El Centenario.	200
Tabla 6.6.1.12 Comparación entre las Derivas obtenidas para el registro El Centenario.	200
Tabla 6.6.2.1 Comparación entre las Energías máx. obtenidas para el registro SCT.	201
Tabla 6.6.2.2 Comparación entre las Energías máx. obtenidas para el registro El Centenario.	202

Tabla 6.6.2.3 Comparación entre las Energías máx. obtenidas para el registro SCT.....	202
Tabla 6.6.2.4 Comparación entre las Energías máx. obtenidas para el registro El Centenario.	203
Tabla 6.6.2.5 Comparación entre las Energías máx. obtenidas para el registro SCT.....	204
Tabla 6.6.2.6 Comparación entre las Energías máx. obtenidas para el registro El Centenario.	204
Tabla 6.6.3.1 Comparación entre los Cortantes Basales máx. obtenidos.....	205
Tabla 6.6.3.2 Comparación entre los Cortantes Basales máx. obtenidos.....	205
Tabla 6.6.3.3 Comparación entre los Cortantes Basales máx. obtenidos.....	206
Tabla 6.6.4.1 Reducción o Aumento de Fuerzas Internas en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 4 pisos, producidas por los registros.	207
Tabla 6.6.4.2 Reducción de Fuerzas Internas en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al cuarto piso, producidas por los registros.	208
Tabla 6.6.4.3 Reducción o Aumento de Fuerzas Internas en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 8 pisos, producidas por los registros.	209
Tabla 6.6.4.4 Reducción de Fuerzas Internas en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al octavo piso, producidas por los registros.	210
Tabla 6.6.4.5 Reducción o Aumento de Fuerzas Internas en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 12 pisos, producidas por los registros.	212
Tabla 6.6.4.6 Reducción de Fuerzas Internas en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al duodécimo piso, producidas por los registros.	213
Tabla 6.5.1 Secciones y armado de las columnas de las cuales se obtuvo el diagrama momento-curvatura.	223
Tabla 6.5.2 Secciones y armado de las vigas de las cuales se obtuvo el diagrama momento-curvatura.	224
Tabla 6.5.3 Momentos de fluencia (M_y) para las columnas de los pórticos y sus correspondientes momentos actuantes, obtenidos del análisis con y sin disipadores.....	225

Tabla 6.5.4 Momentos de fluencia (M_y) para las vigas de los pórticos y sus correspondientes momentos actuantes, obtenidos del análisis con y sin disipadores..... 225

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1.2.1 Guayaquil subdividida en zonas de acuerdo al depósito de suelo. (Campoverde 2013)	11
Figura 2.2.1 Componentes de un Sistemas de 1 Grado de Libertad Amortiguado. Chopra (2012)	19
Figura 2.2.2 Pórtico sometido a una fuerza estática lateral (f_s) a lo largo de GDL u. Chopra (2012).....	22
Figura 2.2.3. Relación lineal entre el desplazamiento u y la fuerza f_s . Chopra (2012)	22
Figura 2.2.4. Ramas de Carga y Descarga para un ciclo de la curva de Histéresis.	24
Figura 2.2.5. Resultados experimentales para un material sujeto a ciclos de carga. Curva de Histéresis.....	25
Figura 2.3.1. Vibración Libre Sistemas 1GDL Sub-amortiguados,.....	28
Figura 2.3.2 Decremento exponencial de la amplitud del desplazamiento debido al amortiguamiento. Consecuencias del amortiguamiento. (Chopra 2012).....	30
Figura 2.3.3 Sistemas de vibración libre para 4 niveles de amortiguamiento 2, 5, 10 y 20%. (Chopra 2012).....	31
Figura 2.4.1 Respuesta de un sistema con 5% de amortiguamiento crítico a fuerza sinusoidal de frecuencia $\omega = \omega_n$; $u(0) = \dot{u}(0) = 0$. (Chopra 2012).....	35
Figura.2.4.2. Curvas que relacionan R_d y ϕ con $\frac{\omega}{\omega_n}$ para diferentes niveles de amortiguamiento. (Chopra 2012)	36
Figura 2.4.3 Factores Dinámicos de deformación, velocidad y aceleración. (Chopra 2012).....	40
Figura 2.5.1 Carga Periódica. (Chopra 2012)	41
Figura 2.6.1 Respuesta a un pulso rectangular. (Chopra 2012)	44

Figura 2.6.2 Máxima respuesta durante la vibración libre y forzada de un sistema de 1 GDL sometido a pulsos de medio seno. (Chopra 2012)	45
Figura 2.6.3 Máxima respuesta durante la vibración libre o forzada de un sistema de 1 GDL sometido a pulsos triangulares simétricos. (Chopra 2012)..	46
Figura 2.7.1 Sistema 1 GDL Amortiguado sometido a un movimiento inducido en su base. (Chopra 2012)	47
Figura 2.7.2 Espectros de respuesta de deformación, pseudo-velocidad y pseudo-aceleración para el sismo del Centro ($\xi = 2\%$). (Chopra 2012).....	49
Figura 2.7.3 Gráficos respuesta de deformación y fluencia para 4 sistemas diferentes sometidos al sismo de El Centro. $T_n = 0.5s$, $\xi = 5\%$ y $\bar{f}_y = 1, 0.5, 0.25, 0.125$. (Chopra 2012).....	53
Figura 2.7.4 Gráficos que muestran la variación en el tiempo de la energía cinética+elástica y la disipación de la misma, por medio de la energía amortiguamiento e inelástica. En la figura (a) se muestra un sistema lineal elástico con $T_n = 0.5s$ y $\xi = 5\%$. En la figura (b) se muestra un sistema elastoplástico con $T_n = 0.5s$, $\xi = 5\%$ y $\bar{f}_y = 0.25$. (Chopra 2012)	55
Figura 3.3.1.1 Disipador de fricción instalado en un arriostramiento en forma de cruz. (Villarreal y Oviedo 2009).....	60
Figura 3.3.1.2 Relación Fuerza-Desplazamiento de un disipador de fricción. (Kelly 2001).....	60
Figura 3.3.2.1 Disipador ADAS. (Villarreal y Oviedo 2009)	63
Figura 3.3.2.2 Disipador TADAS. (Villarreal y Oviedo 2009)	64
Figura 3.3.2.3 Disipador de Panal (Honeycomb). (Villarreal y Oviedo 2009)	64
Figura 3.3.2.4 Relación Fuerza-Desplazamiento de los disipadores de plastificación de metal. (Kelly 2001)	64
Figura 3.3.3.1 Disipador Viscoelástico. (Villarreal y Oviedo 2009).....	66
Figura 3.3.3.2 Relación Fuerza-Desplazamiento de un disipador Viscoelástico. (Kelly 2001).....	66

Figura 3.3.4.1 Esquema de un disipador Taylor de fluido viscoso. (Bozorgnia y Bertero 2004)	69
Figura 3.3.4.2 Diagrama Fuerza de amortiguamiento-Velocidad. (Pardo 2007)	69
Figura 3.3.4.3 Disipadores de fluido viscoso instalados en los arriostramientos diagonales. (Chopra 2012)	69
Figura 4.2.1 Curva de histéresis para un disipador de fluido viscoso. (Chopra 2012).....	74
Figura 4.2.2 Energía disipada por amortiguamiento viscoso y energía de entrada. (Chopra 2012).....	75
Figura 4.5.1 Esquema hipotético de un disipador de fluido viscoso de orificios. (Soong y Dargush 1997)	84
Figura 4.5.3 Respuesta de un disipador de fluido viscoso de orificios. (Soong y Dargush 1997)	88
Figura 4.7.1 Diagrama de flujo para el diseño. (Pardo 2007)	91
Figura 4.8.1.1 Pórtico considerado en el ejercicio de aplicación.....	93
Figura 4.8.1.2 Sección transversal de la columna y Diagrama Momento-Curvatura.	93
Figura 4.8.3.1 Respuesta del Sistema Sin Disipador a.) Desplazamiento vs. Tiempo, b.) Velocidad vs. Tiempo y c.) Aceleración vs. Tiempo.....	98
Figura 4.8.3.2 Sistema Sin Disipador a.) Balance Energético y b.) Respuesta Energética del Sistema.	99
Figura 4.8.4.1 Respuesta del Sistema con Disipador a.) Desplazamiento vs Tiempo, b.) Velocidad vs. Tiempo, c.) Aceleración vs. Tiempo.	101
Figura 4.8.4.2 Relación Fuerza del Disipador Viscoso-Desplazamiento.....	101
Figura 4.8.4.3 Sistema con Disipador a.) Balance Energético del Sistema y b.) Respuesta Energética del Sistema.	102
Tabla 4.8.5.1 Comparación de las Respuestas del Sistema Sin y Con Disipador.	103
Figura 4.8.5.1 Comparación de las Respuestas del Sistema Sin y Con Disipador a.) Desplazamiento vs. Tiempo, b.) Velocidad vs. Tiempo y c.) Aceleración vs. Tiempo.....	104

Fig. 5.4.1.1 Cargas muertas adicionales asignadas a las vigas del pórtico de 4 pisos.	109
Fig. 5.4.2.1 Cargas vivas asignadas a las vigas del pórtico de 4 pisos.	110
Fig. 5.4.3.1 Espectro elástico e inelástico de aceleraciones para la ciudad de Guayaquil.....	112
Fig. 6.3.1 Acelerograma del Sismo de México (1985)-Componente N90W, Estación: Secretaría Comunicación y Transporte.	123
Fig. 6.3.2 Registro Sísmico de Guayaquil (1993)-Componente N-S, Estación: El Centenario.	124
Fig. 6.4.1 Definición del Load Case para el registro SCT del sismo de México de 1985.....	127
Fig. 6.4.2 Definición del Load Case para el registro de El Centenario del sismo ocurrido en Guayaquil de 1993.....	128
Fig. 6.4.3 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.4.1 y 6.4.2.....	130
Fig. 6.4.4 Gráfico de las derivas de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.4.1 y 6.4.2.	130
Fig. 6.4.5 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 4 pisos sometido al registro SCT.	131
Fig. 6.4.6 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 4 pisos sometido al registro El Centenario.	132
Fig. 6.4.7 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 4 pisos sometido al registro SCT.....	133
Fig. 6.4.8 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 4 pisos sometido al registro El Centenario.	133
Fig. 6.4.8 Columnas seleccionadas para la obtención de las fuerzas internas mostradas en la Tabla 6.4.6.....	135
Fig. 6.4.9 Vigas seleccionadas para la obtención de las fuerzas internas mostradas en la Tabla 6.4.7.....	136

Fig. 6.4.10 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.4.8 y 6.4.9.	138
Fig. 6.4.11 Gráfico de las derivas de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.4.8 y 6.4.9.	138
Fig. 6.4.12 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 8 pisos sometido al registro SCT.	139
Fig. 6.4.13 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 8 pisos sometido al registro El Centenario.	140
Fig. 6.4.14 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 8 pisos sometido al registro SCT.	141
Fig. 6.4.15 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 8 pisos sometido al registro El Centenario.	141
Fig. 6.4.16 Columnas seleccionadas para la obtención de las fuerzas internas mostradas en la Tabla 6.4.13.	143
Fig. 6.4.17 Vigas seleccionadas para la obtención de las fuerzas internas mostradas en la Tabla 6.4.14.	145
Fig. 6.4.18 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basado en las Tablas 6.4.15 y 6.4.16.	147
Fig. 6.4.19 Gráfico de las derivas de piso en la dirección X basado en las Tablas 6.4.15 y 6.4.16.	147
Fig. 6.4.20 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 12 pisos sometido al registro SCT.	148
Fig. 6.4.21 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 12 pisos sometido al registro El Centenario.	149
Fig. 6.4.22 Gráfica que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 12 pisos sometido al registro SCT.	150
Fig. 6.4.23 Gráfica que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 12 pisos sometido al registro El Centenario.	150
Fig. 6.4.24 Columnas seleccionadas para la obtención de las fuerzas internas mostradas en la Tabla 6.4.20.	153

Fig. 6.4.25 Vigas seleccionadas para la obtención de las fuerzas internas mostradas en la Tabla 6.4.21.....	155
Fig. 6.5.1.1 Modelo Viscoelastico de Maxwell considerado por el Programa Sap2000 para modelar un Disipador Viscoso. (Pardo 2007)	159
Fig. 6.5.1.2 Modelo alternativo considerado por el Programa Sap2000 para modelar un Disipador Viscoso con comportamiento lineal. (Pardo 2007)	159
Fig. 6.5.2.1 Pórtico de 4 Pisos con Disipadores.....	160
Fig. 6.5.2.2 a.) y b.) Propiedades del elemento LIN1 del pórtico de 4 Pisos...	161
Fig. 6.5.2.3 Pórtico de 8 Pisos con Disipadores.....	162
Fig. 6.5.2.4 a.) y b.) Propiedades del elemento LIN1 del pórtico de 8 Pisos...	163
Fig. 6.5.2.5 Pórtico de 12 Pisos con Disipadores.....	164
Fig. 6.5.2.6 a.) y b.) Propiedades del elemento LIN1 del pórtico de 8 Pisos...	165
Fig. 6.5.3.1 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.5.3.1 y 6.5.3.2.	167
Fig. 6.5.3.2 Gráfico de las derivas de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.5.3.1 y 6.5.3.2.	167
Fig. 6.5.3.3 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 4 pisos sometido al registro SCT.	168
Fig. 6.5.3.4 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 4 pisos sometido al registro El Centenario.	169
Fig. 6.5.3.5 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 4 pisos sometido al registro SCT.....	170
Fig. 6.5.3.6 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 4 pisos sometido al registro El Centenario.	170
Fig.6.5.3.7 Histéresis elíptica del disipador de fluido viscoso LIN1 sometido al registro SCT.....	173
Fig.6.5.3.8 Histéresis elíptica del disipador de fluido viscoso LIN1 sometido al registro de El Centenario.	173
Fig. 6.5.3.9 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.5.3.9 y 6.5.3.10.	176

Fig. 6.5.3.10 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.5.3.9 y 6.5.3.10.	176
Fig. 6.5.3.11 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 8 pisos sometido al registro SCT.	177
Fig. 6.5.3.12 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 8 pisos sometido al registro de El Centenario.	178
Fig. 6.5.3.13 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 8 pisos sometido al registro SCT.	179
Fig. 6.5.3.14 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 8 pisos sometido al registro El Centenario.	179
Fig.6.5.3.15 Histéresis elíptica del dissipador de fluido viscoso LIN1 sometido al registro SCT.	183
Fig.6.5.3.16 Histéresis elíptica del dissipador de fluido viscoso LIN1 sometido al registro El Centenario.	183
Fig. 6.5.3.17 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.5.3.17 y 6.5.3.18.	186
Fig. 6.5.3.18 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.5.3.17 y 6.5.3.18.	186
Fig. 6.5.3.19 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 12 pisos sometido al registro SCT.	187
Fig. 6.5.3.20 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 12 pisos sometido al registro El Centenario.	188
Fig. 6.5.3.21 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 12 pisos sometido al registro SCT.	189
Fig. 6.5.3.22 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 12 pisos sometido al registro El Centenario.	189
Fig.6.5.3.23 Histéresis elíptica del dissipador de fluido viscoso LIN1 sometido al registro SCT.	193
Fig.6.5.3.24 Histéresis elíptica del dissipador de fluido viscoso LIN1 sometido al registro El Centenario.	194
Fig. 6.6.5.1 Sección de la columna C40x55 creada en el Section Designer...	215

Fig. 6.6.5.2 Sección de la viga V35x65 creada en el Section Designer.	215
Fig. 6.6.5.3 Diagrama Momento-Curvatura para la columna C40x55 del pórtico de 4 pisos.	216
Fig. 6.6.5.4 Diagrama Momento-Curvatura para la viga V35x65 del pórtico de 4 pisos.	217
Fig. 6.6.5.5 Sección de la columna C65x65 creada en el Section Designer...	218
Fig. 6.6.5.6 Sección de la viga V40x75 creada en el Section Designer.	218
Fig. 6.6.5.7 Diagrama Momento-Curvatura para la columna C65x65 del pórtico de 8 pisos.	219
Fig. 6.6.5.8 Diagrama Momento-Curvatura para la viga V40x75 del pórtico de 8 pisos.	220
Fig. 6.6.5.9 Sección de la columna C80x80 creada en el Section Designer...	221
Fig. 6.6.5.10 Sección de la viga V45x80 creada en el Section Designer.	221
Fig. 6.6.5.11 Diagrama Momento-Curvatura para la columna C80x80 del pórtico de 12 pisos.....	222
Fig. 6.6.5.12 Diagrama Momento-Curvatura para la viga V45x80 del pórtico de 12 pisos.	223

RESUMEN (ABSTRACT)

La ciudad de Guayaquil se encuentra en una zona de actividad sísmica considerable, cuya peligrosidad puede verse incrementada por el crecimiento sin control municipal, el desarrollo económico, la falta de preparación de la población frente a desastres y los depósitos de suelo blando en gran parte de la ciudad.

Resulta que el ingeniero civil, para esta zona, está en la obligación de diseñar y construir estructuras que cumplan con las directrices de los códigos sismo-resistentes, dotándolas de resistencia y ductilidad necesaria para que disipen energía por deformación inelástica. Por más de que la estructura no colapse, el daño asociado a la inelasticidad puede ser tal, que no le permita ser funcional. Para combatir lo anterior, los países avanzados han desarrollado los disipadores de energía.

El trabajo se enfoca en los disipadores de fluido viscoso y se usó el programa SAP2000 para observar el comportamiento de 3 pórticos de hormigón armado (4, 8 y 12 pisos), con y sin disipadores, sometidos a registros acelerográficos en suelo blando. Los resultados obtenidos mostraron reducciones considerables en derivas, cortantes basales y fuerzas internas en los elementos, con lo cual podría aspirarse a reducir secciones y posiblemente generar ahorros, relacionados al costo de la estructura.

Palabras Claves: suelo, peligrosidad, energía, daño, disipador, viscoso, fuerzas, reducción, ahorro.

INTRODUCCIÓN

Se decidió realizar la investigación sobre el presente tema debido al interés que despierta en el autor, el comportamiento de las estructuras de hormigón armado, sometidas a cargas dinámicas producidas por los terremotos en el Ecuador.

El trabajo está ambientado en la actualidad de la ciudad de Guayaquil, que se encuentra localizada sobre el río Guayas, al Oeste del territorio Ecuatoriano. La ciudad tiene un desarrollo socio-económico de relevancia, debido a que posee la mayor población en el Ecuador (2 350 915 habitantes de acuerdo al censo del año 2010), el puerto principal y las industrias más importantes.

Aguiar (2008):

“El Ecuador se halla ubicado en una de las zonas de mayor peligrosidad sísmica del mundo, de tal forma que los proyectistas estructurales tienen que diseñar sus edificios considerando que lo más importante es la acción sísmica.” (p.15)

Los sismos en esta región ocurren en su mayoría debido al fenómeno de subducción, en donde la placa de Nazca subduce por debajo de la placa Continental, originando la excitación del terreno por la liberación de energía y como consecuencia, la vibración de las diferentes estructuras.

Según Bertero (1992), citado por Bozzo y Barbat (2004), mientras mayor sea el número de habitantes en la ciudad y el desarrollo económico de la zona; mientras menos sea la preparación de la población frente a terremotos y el epicentro esté más próximo al centro urbano, el potencial destructivo del sismo será mayor. A esto hay que agregar que el crecimiento urbano sin control en áreas sísmicamente peligrosas contribuye al aumento de este potencial destructivo, aun cuando la sismicidad permanezca constante. La existencia de estructuras vulnerables incrementan las pérdidas producidas por los terremotos.

Los sismos en la ciudad de Guayaquil pueden llegar a ser muy destructivos, no sólo por lo mencionado anteriormente, sino también, por la presencia de suelos blandos, los cuales poseen propiedades dinámicas, que tienden a amplificar la onda sísmica y desembocan en el fenómeno de resonancia, en el caso de que alguna de las estructuras vibre con la misma frecuencia que la del suelo.

Como ya se mencionó anteriormente un sismo induce un movimiento a las edificaciones, pero las estructuras no oscilan indefinidamente, gracias al amortiguamiento natural de los materiales y a la disipación de energía por deformación. Mediante el principio de la conservación de la energía, se puede ilustrar lo siguiente:

$$E_{Ingreso} = E_K + E_S + E_Y + E_D$$

El movimiento producido por un terremoto introduce su energía a una estructura, la cual se transforma en energía cinética (EK), energía elástica de deformación (ES), energía inelástica (EY) y energía de amortiguamiento (ED).

El diseño convencional o tradicional que se ha venido realizando hasta ahora, avalado por los diferentes códigos de construcción, consiste en dotar a la estructura con suficiente ductilidad de tal forma que incurse en el rango inelástico (EI) y se dé paso a la formación de rótulas plásticas, lo cual significa daño para la estructura.

Los países desarrollados desde hace algún tiempo vienen promoviendo una nueva filosofía en cuanto al diseño sismo-resistente, la cual busca limitar el daño que la estructura pueda sufrir frente a las sollicitaciones sísmicas, con ayuda de la inclusión de sistemas de disipación de energía, los cuales modifican las propiedades dinámicas de la edificación, disipando y controlando la energía que ingresa a la estructura. Gracias a estos dispositivos se puede llegar a proteger la vida humana y los diferentes contenidos materiales que ésta alberga, reduciendo también las pérdidas económicas.

Cabe mencionar que existe una gran variedad de estos sistemas, como por ejemplo, los disipadores visco-elásticos, de fluido viscoso, de fluencia de metales y de fricción.

El presente trabajo se enfocará principalmente en los disipadores sísmicos de fluido viscoso, y cómo éstos influyen en el comportamiento de los edificios de hormigón armado, cimentados sobre suelos blandos como los de la ciudad de Guayaquil. A su vez se tratarán las ventajas y desventajas de estos dispositivos.

Antecedentes

El estudio de los sismos es una actividad que se viene realizando en el país no desde hace mucho tiempo.

En la ciudad de Guayaquil los sismos de mayor relevancia son el del 13 de Mayo de 1942, con una magnitud de 7.7 en la escala de Richter, donde la principal causa de muerte fue el colapso de 3 edificios de hormigón armado y el del 18 de Agosto de 1980, con una magnitud de 6.1 Ms y con epicentro en Nobol, donde 8 personas fallecieron al sur de la ciudad y otras quedaron heridas por la caída de paredes u objetos.

De los eventos sísmicos más recordados en el país, por su magnitud y poder de destrucción, son los de Esmeraldas (31 de enero de 1906) y el de Bahía de Caráquez (4 de agosto de 1998). Según el IG EPN (2012), la magnitud del sismo de Esmeraldas fue de Mw 8.8, uno de los sismos más fuertes registrados en todo el mundo, sin embargo los resultados de este evento no fueron tan catastróficos, porque; en ese tiempo, no existían grandes centros urbanos. En cambio, según el IG EPN (2011) el sismo de la ciudad de Bahía de Caráquez, registró un evento de magnitud 7.1 el cual llegó a provocar bastantes pérdidas económicas, golpeando especialmente al sector turístico, como consecuencia del colapso y graves daños estructurales en los edificios y hoteles de la zona.

Posterior al sismo de Bahía de Caráquez se realizó una evaluación a las estructuras, colapsadas o dañadas, y se encontraron fallas debido a la mala práctica constructiva de la época y de diseño, las cuales podían augurar un mal

desempeño de las estructuras bajo solicitaciones sísmicas de gran magnitud. Algunas de las fallas que se encontraron fueron: en el nudo Viga-Columna producto de la congestión de varillas de acero que no permitían el paso correcto del agregado grueso que formaba parte de la mezcla de hormigón, también las columnas tenían una sección mucho más pequeña comparada con las vigas, lo que hace pensar que no se respetó el criterio de columna fuerte-viga débil. Toda esta suma de errores hace suponer que en ese tiempo los códigos de construcción no contenían las directrices adecuadas para el correcto diseño de una estructura bajo solicitaciones dinámicas.

Eso vino a cambiar cuando entra en vigencia el Código Ecuatoriano de la Construcción (año 2000), el cual dentro de sus capítulos incluye una filosofía y una metodología para el diseño de estructuras tomando en cuenta las fuerzas sísmicas, separando además los diferentes niveles de desempeño que una estructura debería de tener bajo las distintas categorías de sismos (pequeños o frecuentes, moderados o poco frecuentes y severos). Lo que dicho código propone dentro de sus literales para mitigar la energía que ingresa a la estructura por efecto del terremoto, es disiparla por medio de deformación y limitándola hasta cierto punto, de tal manera que no quede dañada o afecte a edificaciones aledañas. Es de conocimiento general que para que la estructura pueda cumplir con los niveles de desempeño esperados, ésta debe poseer suficiente resistencia, rigidez y ductilidad.

Vale mencionar que mientras el Ecuador en el año 2000 crea un código en el cual se incluye el diseño y detallamiento sismo-resistente, en otros países, como Estados Unidos o Japón, se disponía de un código con anterioridad y además, se estaban promoviendo nuevas tecnologías para mitigar la amenaza de los sismos, como por ejemplo, los disipadores de energía.

NITSCHE (2011)

“Los sistemas de disipación de energía, si bien no evitan el ingreso de energía a la estructura, permiten que la disipación de energía se concentre en dispositivos especialmente diseñados para esos fines, reduciendo sustancialmente la porción de la energía que debe ser disipada por la estructura. El uso de disipadores de energía reduce la respuesta estructural, disminuyendo el daño de componentes estructurales y no estructurales.”(p. 8)

Los disipadores de energía, más específicamente los viscosos, eran muy utilizados en la industria militar y aeroespacial antes de ser empleados como medio de protección sísmica para obras civiles. Su principio físico es en esencia el de un amortiguador de un carro, solo que se debieron realizar ciertas modificaciones al dispositivo y a su vez, hubo la necesidad de buscar un líquido viscoso que cumpliera con ciertas características de estabilidad a altas temperaturas y a bastantes ciclos de carga.

NITSCHE (2011)

“El primer documento para el diseño de estructuras con aislación sísmica fue publicado en 1986 por el SEAOC (Structural Engineering Association of California). Estados Unidos y Japón son los principales precursores del uso de estas tecnologías de protección. Los sistemas de protección sísmica presentaron su mayor auge luego de los terremotos de Northridge (EEUU) en 1994 y Kobe (Japón) en 1995. En ambos terremotos se observó que las construcciones que poseían sistemas de aislación sísmica se comportaron de excelente forma, lo que estimuló la masificación de este tipo de tecnología y sus derivados.

La experiencia internacional muestra que el uso de tecnologías de protección sísmica no solo aplica para estructuras nuevas, sino que también es utilizada como estrategia de refuerzo o rehabilitación de estructuras ya existentes.” (p.11)

En la actualidad existen empresas que se encargan de la fabricación de estos disipadores viscosos, un ejemplo de ellas, es la empresa TAYLOR DEVICES, la cual viene fabricando sistemas de absorción de energía desde 1955 y cuenta con una producción total de estos dispositivos igual a 2 millones de unidades. Sus productos son hechos con acero inoxidable y el fluido viscoso que usan es la silicona, además éstos tienen la capacidad de reducir entre 20% y 50% la energía sísmica.

Objetivos

Objetivo General

- Analizar el funcionamiento de los disipadores viscoso y sus efectos en el desempeño y los esfuerzos que estos dispositivos causan en los edificios de hormigón armado, cimentados sobre los suelos blandos de la ciudad de Guayaquil, al momento de ser sometidos a las cargas dinámicas producidas por un sismo probable.

Objetivos Específicos

- Diferenciar el funcionamiento entre un disipador de energía de fluido viscoso y de fluido visco-elástico.
- Conocer las diversas formas de instalación de los dispositivos disipadores de energía.
- Conocer el comportamiento de los dispositivos disipadores de energía, una vez insertados en las edificaciones de hormigón armado y las diferentes ventajas que éstos aportan a la estructura.

Preguntas de investigación

1. ¿Los disipadores de energía viscosos son una verdadera necesidad para los edificios de hormigón de la ciudad de Guayaquil?
2. ¿Qué tan reducidos se ven los esfuerzos en los diferentes elementos estructurales, que conforman un edificio de hormigón armado, cuando se incluyen los disipadores?
3. ¿Para qué rango de pisos de un edificio de hormigón armado se justifica la inclusión de los disipadores?
4. ¿Es justificable la inversión en estos dispositivos para los edificios de hormigón armado en la ciudad de Guayaquil?

CAPÍTULO 1: EFECTOS DEL SISMO EN LOS SUELOS BLANDOS (GUAYAQUIL)

1.1. Introducción

De acuerdo con la información definida por Argudo et al., en el proyecto RADIUS (1999), en su Volumen I: *“Reporte Final a la Secretaria del IDNDR de las Naciones Unidas”*, la ciudad de Guayaquil se encuentra localizada al margen oeste del río Guayas sobre depósitos de suelo aluvial y roca sedimentaria; a su vez es limítrofe al Este con la cordillera de los Andes y al Oeste, con la cordillera Chongón-Colonche. Entre los años que abarcan desde su fundación y la aparición de los periódicos (1532-1821), a Guayaquil no se la consideraba como una ciudad de alta vulnerabilidad sísmica debido a que no se reportaban sismos con intensidades mayores a Mercalli VII; tal resultado era posible debido a la convergencia de diversos factores, siendo los más destacados para la ingeniería civil, los materiales de construcción y las técnicas constructivas. Por ende, los desastres importantes eran producto de otra índole, como incendios, invasiones de piratas y pestes.

Conforme se va desarrollando la ciudad y el hormigón armado va ganando espacio dentro de la construcción de obras, Guayaquil comienza a verse más desprotegida frente a la actividad de los sismos. Todo eso era resultado de una suma de elementos como: crecimiento descontrolado de la población, diseños inadecuados para zonas sísmicas, códigos de construcción que subestimaban el comportamiento dinámico de la estructura, construcciones mal realizadas y falta de preparación de la población frente a posibles desastres. La ciudad además tenía, y aún tiene, una desventaja inherente en su estratigrafía, la cual es la presencia en gran medida de suelos blandos (arcillas)

que, dejando a un lado la baja capacidad portante y el potencial expansivo, este tipo de suelos tiene la característica de amplificar la onda sísmica.

Como se detallará más adelante, la amplificación de la onda sísmica puede llegar a causar efectos catastróficos, un ejemplo de eso es el sismo de México (19 de Septiembre de 1985). Según los reportes, el epicentro del sismo ocurrió a 400km de la ciudad pero aun así, éste produjo el colapso de muchas edificaciones y la cifra de personas que perdieron la vida es mayor a 10000. La ciudad se encontraba asentada sobre depósitos de suelos blandos saturados, del antiguo lago Texcoco, lo que dio paso al efecto de amplificación de onda. Las ondas llegaron a vibrar con periodos entre 1 y 3 segundos, que fue un rango de valores importante y de preocupación para los edificios debido al fenómeno de resonancia.

1.2. Suelos de Guayaquil

Como ya se mencionó, Guayaquil se encuentra asentado sobre depósitos aluviales. De acuerdo con Das (2006), Lambe y Whitman (1972), un suelo aluvial es de origen sedimentario, en el cual las partículas, en su mayoría finas (arcillas) han sido transportadas por ríos hasta su lugar de disposición. Las arcillas poseen un peso muy pequeño, por lo que para asentarse en un sitio debe producirse el efecto de floculación, que consiste en la atracción (producto de las fuerzas de van der Waals) de más partículas arcillosas, de tal forma que se produzca una partícula lo suficientemente pesada para que se asiente y así sucesivamente, se repite el mecanismo a lo largo de un tiempo determinado, lo cual da origen a los suelos blandos.

Según los trabajos de Vera (2005), citado por Campoverde (2013), Guayaquil se puede subdividir en 7 zonas, de acuerdo al origen del depósito y variación las propiedades geotécnicas del suelo:

Campoverde (2013)

- **“Zona 1: Depósitos Deltaico Estuarinos (Este-Centro)”**
- **Zona 2: Depósitos Deltaico Estuarinos (Sur)**
- **Zona 3: Depósitos Deltaico Estuarinos (Oeste-Norte-Trinitaria)**
- **Zona 4: Depósitos de Llanura Aluvial (Norte)**
- **Zona 5: Depósitos Aluvio-Lacustres (Norte)**
- **Zona 6: Depósitos Coluviales**
- **Zona 7: Depósitos residuales y formaciones Rocosas” (p. 24)**

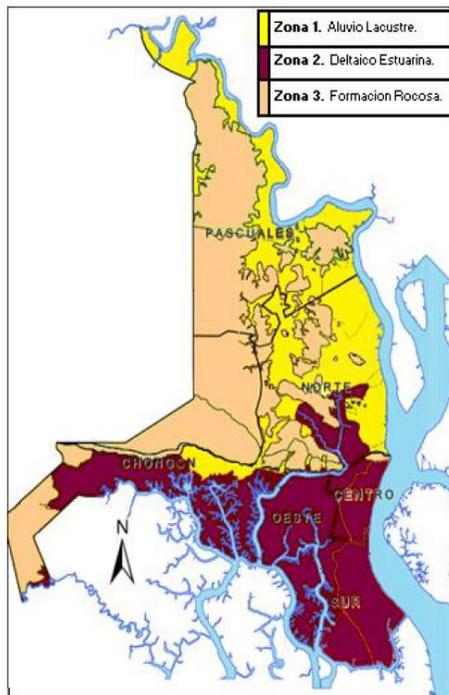


Figura 1.2.1 Guayaquil subdividida en zonas de acuerdo al depósito de suelo.
(Campoverde 2013)

Basándose en los estudios del Laboratorio de mecánica de suelos “Ing. Dr. Arnaldo Ruffilli” de la facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas de la Universidad de Guayaquil, se obtuvieron los siguientes datos, en conformidad con los siguientes espesores de estratos de suelos: 0.00m-4.00m, 4.00m-10.00m y de 10.00m en adelante.

1.2.1. Espesor de Estratos de Suelos de 0.00m a 4.00m

Refiriéndose al nivel del terreno natural, se encuentra un estrato de suelo variable entre 0.50m-1.50m de arcilla gris oscura, la cual posee en su estructura materia vegetal (con cierto grado de descomposición). Suele sufrir cambios de volumen, debido a la variabilidad de la humedad, lo que la hace un material no apto para la construcción y su remoción es obligatoria.

Existe otro tipo de arcilla que predomina en esta zona y se conoce como arcilla amarilla clara. Por lo general, está presente en toda la ciudad, posee altos contenidos de humedad, una resistencia a la compresión no confinada es superior en comparación con otras clases de arcillas y puede llegar alcanzar espesores de estratos de hasta 5.00m-6.00m, encontrándose posteriormente arcilla gris.

A su vez, uno también puede llegar a encontrar arcilla amarilla oscura y café, teniendo esta última la particularidad de poseer una alta resistencia a la compresión no confinada y una relativa expansión.

Cerca de las orillas del río Guayas se han encontrado residuos calcáreos con estrados de hasta 4.00m de espesor.

1.2.2. Espesor de Estratos de Suelos de 4.00m a 10.00m

Usualmente en esta zona se encuentra arcilla gris con pequeños estratos de limo y arena fina. Se puede presentar el caso que sólo se encuentre arcilla gris pura, con material vegetal o con residuos calcáreos.

En ciertos sitios de la ciudad se ha podido encontrar, dentro de esta zona, arcilla amarilla en los primeros 2.00m y en los metros restantes un estrato de arena de 1.00m de espesor. Además, al norte de Guayaquil se ha podido observar estratos de limo de hasta 4.00m de espesor.

1.2.3. Espesor de Estratos de Suelos de 10.00m a 15.00m

El suelo predominante en esta zona es la arcilla gris con pequeñas capas de limo y arena.

1.3. Sismicidad de Guayaquil

Según los estudios realizados por Villacrés et al., expuestos en el proyecto RADIUS (1999), en su Volumen II: *“Evaluación del Peligro Sísmico de Guayaquil, Definición del Sismo Adoptado para el Escenario Sísmico de Radius y Evaluación de Peligros Colaterales”*, los sismos que más han afectado a la ciudad son los siguientes:

- 9 de Julio de 1653
Epicentro cercano a Guayaquil, las intensidades fueron de grado VII (MM) en los cerros El Carmen y Santa Ana. Suceso descrito por Modesto Chávez. Magnitud del terremoto desconocida.
- 13 de Mayo de 1942
Se alcanzaron intensidades entre VII-IX escala de Mercalli Modificada. El efecto de sitio se hizo presente debido a los suelos blandos de la ciudad.
- 30 de Enero de 1943
Epicentro cercano a Santa Elena. La magnitud del evento fue de 6.9Ms y las intensidades en Guayaquil fueron de grado VII (MM).
- 16 de Enero de 1956
Epicentro dentro de la provincia de Manabí. Se presentaron intensidades de grado VI (MM) en Guayaquil, además del efecto de sitio.
- 26 de Julio de 1971
Epicentro en la zona Sur-Oriental del Ecuador. La magnitud del evento fue de 7.5 Ms y en Guayaquil provocó una intensidad máxima de grado VII (MM). También hubo presencia del efecto de sitio durante este sismo.
- 18 de Agosto de 1980
Epicentro en la ciudad de Nobol. La magnitud del evento fue de 6.1Ms y causó intensidades de grado VII-VIII (MM) en Guayaquil.

Con la información obtenida de los eventos previamente mencionados, RADIUS (1999), en su Volumen II, identificó 3 fuentes principales generadores

de sismos de intensidades iguales o mayores a VII en la escala de Mercalli Modificada en Guayaquil:

Costa Noroeste del Ecuador

Esta fuente fue la que causó los sismos del 13 de Mayo de 1942 y del 30 de Enero de 1943. Corresponde a la zona en donde subduce la placa Sudamericana por debajo de la placa Continental; frente a las costas de las provincias de Esmeraldas, Manabí y al norte de la provincia del Guayas. Los terremotos que se originan en esta fuente tienen magnitud de 9.0Ms en su segmento norte y 8.0Ms en su segmento sur.

Zona Sur-Oriental del Ecuador

Esta fuente produjo el sismo del 26 de Julio de 1971. Consiste en un sistema de fallas inversas conocidas como Trans-Cutucú, al pie de la cordillera que lleva el mismo nombre, ubicada en las provincias de Morona-Santiago y Zamora-Chinchipec. Este sistema puede llegar a producir sismos de magnitud igual a 7.2Ms.

Zona Local Próxima a Guayaquil

Esta fuente originó el sismo del 18 de Agosto de 1980 y se cree que también el del 9 de Julio de 1653. Corresponde usualmente a sismos de baja magnitud, muy profundos; pero el factor de mayor relevancia resulta ser su proximidad a la ciudad. Se puede llegar a esperar que los terremotos superen la magnitud de 6.5Ms.

1.4. Efecto de amplificación de onda sísmica

Por lo general, las ondas sísmicas se ven incrementadas por la presencia de ciertos factores relacionados con el lugar de análisis:

- Topografía (Montañosa o valles)
- Geología (Suelos Blandos)

Los ingenieros se refieren a este problema como uno de los diferentes tipos de efectos de sitio que existen. Particularmente, la ciudad de Guayaquil se ve amenazada por la amplificación de ondas sísmicas debido a los suelos blandos, dado que éstos se encargan de filtrar las ondas de periodo corto, dejando las de periodo largo, por lo que se producen amplitudes de movimiento mucho mayores en la superficie del terreno, las cuales conducen a posibles daños en las edificaciones. Para estratos grandes de arcilla, el medio se encarga de desaparecer las ondas que tengan periodos diferentes al fundamental del estrato, convirtiéndose en un peligro; especialmente si se sincronizan los periodos del suelo y la estructura, dando origen a la resonancia. De acuerdo con Nava (1998), el mecanismo de amplificación consiste en que al pasar una onda de un material duro (como roca) a un material menos rígido (como la arcilla), su energía se divide en ondas transmitidas y reflejadas, cuya amplitud depende del ángulo con el cual llegó la onda incidente y de las propiedades mecánicas de los diferentes medios. Esto produce la amplificación por el motivo que cuesta menos trabajo deformar el nuevo medio con la misma energía.

CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE 1 GRADO DE LIBERTAD AMORTIGUADOS

2.1. Introducción

En los países con alto riesgo sísmico, como el Ecuador, el ingeniero civil debe dominar los conceptos de la dinámica estructural, debido a la inminente amenaza de que sus edificaciones se vean sometidas a movimientos bruscos, producto de la aceleración del terreno durante un terremoto. El comportamiento dinámico de las estructuras es de suma importancia para el diseñador, de tal forma que le permite comprender y predecir con cierto nivel de exactitud la respuesta de la edificación frente de las diversas sollicitaciones externas existentes de interés.

Para el estudio de la dinámica de estructuras, se idealiza un pórtico de un piso que se desplaza sólo en su dirección horizontal que recibe el nombre de Sistema de 1 Grado de Libertad. La particularidad de estos sistemas es que idealmente concentran la mayor parte de su masa a nivel del piso mientras que se apoyan en elementos que le aportan prácticamente toda la rigidez, pero su masa es despreciable. Unos ejemplos que podrían ilustrar lo antes dicho son: Puertos, Galpones, Tanques elevados, Cimentaciones sobre Pilotes, entre otros. A su vez, los Sistemas de 1GDL se pueden clasificar de 2 maneras: los no amortiguados y los amortiguados.

El presente capítulo se enfocará sólo en los Sistemas 1GDL Amortiguados, por el hecho de que las edificaciones sometidas a excitaciones externas no vibran indefinidamente debido a la presencia de ciertas fuerzas internas, que paulatinamente disminuyen la amplitud de las oscilaciones hasta

un punto en que la estructura regresa a su posición de equilibrio. Tal propiedad se conoce como amortiguamiento y de ello se hablará más adelante.

A continuación se presentarán ciertos conceptos de la dinámica estructural, así como también, las diferentes situaciones de los Sistemas de 1 GDL Amortiguados, ya sea en vibración libre o vibración forzada.

2.2. Comportamiento Dinámico de las Estructuras

Definición de Grados de Libertad:

Chopra (2012) indica “el número de desplazamientos independientes requeridos para definir las posiciones desplazadas de todas las masas con relación a su posición original es llamado el número de grados de libertad para análisis dinámico.” (p. 7)

Para estudiar las propiedades y el comportamiento dinámico de las estructuras se puede recurrir a una idealización, la cual consiste en asumir un pórtico de un piso que sólo se desplaza en la dirección horizontal. Tal asunción lleva el nombre de Sistema de 1 Grado de Libertad (1GDL). Este capítulo estará enfocado sólo en los Sistemas de 1 Grado de Libertad Amortiguados.

Los Sistemas de un Grado de Libertad Amortiguados están compuestos de una masa concentrada a nivel de piso, soportada por un elemento o elementos que le aportan toda la rigidez al sistema pero cuya masa es despreciable y un amortiguador viscoso que disipa la energía entrante. En la Figura 2.1 se pueden apreciar los componentes antes mencionados.

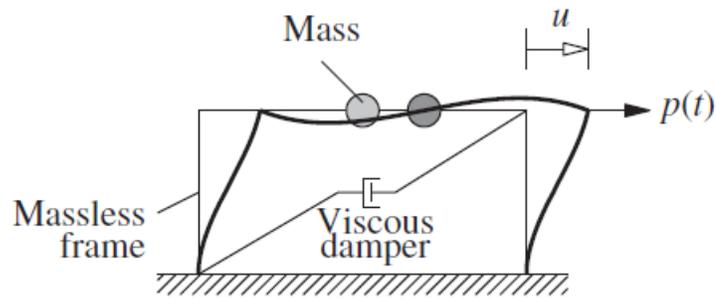


Figura 2.2.1 Componentes de un Sistemas de 1 Grado de Libertad Amortiguado. Chopra (2012)

Basándose en lo dicho anteriormente y aplicando la segunda Ley de Newton ($\sum F = ma$), se puede llegar a formular la Ecuación General de Equilibrio Dinámico para estos sistemas.

Vale mencionar que las estructuras tienen 2 tipos de vibración, libre o forzada, los cuales dependen de las condiciones iniciales del movimiento.

a.) Vibración Libre Amortiguada

Fuerza excitadora $p(t) = 0$

$$\begin{aligned} \sum F &= ma \\ m\ddot{u} + c\dot{u} + ku &= 0 \\ f_I + f_D + f_S &= 0 \end{aligned} \tag{2.2.1}$$

b.) Vibración Forzada Amortiguada

Fuerza excitadora $p(t) \neq 0$

$$\begin{aligned} \sum F &= ma \\ m\ddot{u} + c\dot{u} + ku &= p(t) \end{aligned} \tag{2.2.2}$$

$$f_I + f_D + f_S = p(t)$$

Independientemente del tipo de vibración, se puede observar que en ambos casos, dentro de la formulación de sus ecuaciones, se generan 3 tipos de fuerzas que, sumadas, se oponen al movimiento y que tienen una relación de dependencia directa con ciertas propiedades intrínsecas de la estructura, como la masa (m), la rigidez (k) y el amortiguamiento (c). Dichas fuerzas se describen a continuación:

2.2.1. FI (Fuerza de Inercia)

La fuerza de inercia basa su teoría en la mecánica Newtoniana, específicamente en la segunda Ley de Newton, ya antes mencionada. Ésta indica que la aceleración (\ddot{u}), la cual es la segunda derivada del desplazamiento (u) con respecto al tiempo (t), es proporcional a la fuerza f_I . De acuerdo con la teoría, lo que se acelera son las partículas que poseen una masa (m), por lo se puede llegar a expresar la fuerza inercial de la siguiente manera:

$$f_I = m\ddot{u}$$

Observando la simple fórmula, se puede hacer el comentario que, mientras mayor masa tenga la estructura y mayor sea la aceleración con que se mueve el terreno, más nocivo será el efecto para la edificación.

2.2.2. FD (Fuerza de Amortiguamiento)

CHOPRA (2012)

“El proceso por el cual la vibración disminuye en amplitud se llama amortiguamiento. En sistemas limpios tales como ensayos de modelos de laboratorio, la mayor disipación se produce por el efecto térmico repetitivo de deformación elástica del material y por la fricción interna cuando un sólido es deformado. En estructuras actuales, existen otros mecanismos que contribuyen a la disipación de energía.

El coeficiente de amortiguamiento es seleccionado de tal forma que la energía vibratoria que disipa sea equivalente a la energía disipada por todo los demás mecanismos combinados presentes en la estructura actual.” (p. 13)

La fuerza de amortiguamiento está relacionada con la velocidad por la siguiente expresión:

$$f_D = c\dot{u}$$

donde c es el coeficiente de amortiguamiento, el cual tiene unidades de fuerza x tiempo/longitud.

2.2.3. FS (Fuerza Elástica)

CHOPRA (2012)

“Considerando el sistema sin excitación dinámica, sujeto a una fuerza estática, f_s , aplicada a lo largo del grado de libertad u mostrado. La fuerza interna resistente al desplazamiento u es igual y opuesta a la fuerza externa f_s . Se desea determinar la relación entre la fuerza f_s y el desplazamiento relativo u asociado con las deformaciones en la estructura durante el movimiento oscilatorio. Esta relación fuerza-desplazamiento será lineal para pequeñas deformaciones pero se volverá no-lineal para mayores deformaciones.” (p. 8)

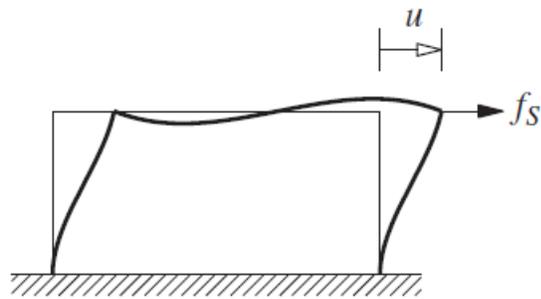


Figura 2.2.2 Pórtico sometido a una fuerza estática lateral (f_s) a lo largo de GDL u . Chopra (2012)

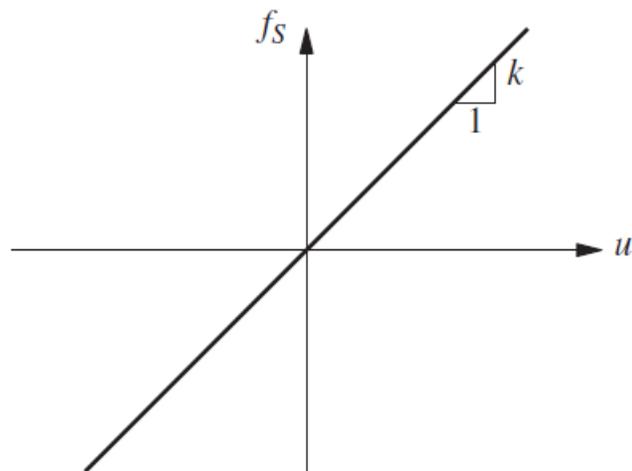


Figura 2.2.3. Relación lineal entre el desplazamiento u y la fuerza f_s . Chopra (2012)

Para el caso de los sistemas lineales, la relación entre la fuerza elástica y el desplazamiento u , se puede expresar de la siguiente forma:

$$f_s = ku$$

donde k es la rigidez lateral del sistema, la cual tiene unidades de Fuerza/longitud.

Lo antes mostrado es válido sólo para pequeñas deformaciones que no sobrepasen el rango elástico. Pero si se da el caso, en que el movimiento causado por una fuerza $p(t)$ resulta ser muy fuerte, de tal forma que la estructura incurre en el rango inelástico, se deben ajustar las ecuaciones tomando en cuenta la no-linealidad, para poder cumplir con el equilibrio, y ser consistente con la teoría de la mecánica de los materiales.

Los ajustes a las ecuaciones son los siguientes:

a.) Vibración Libre Amortiguada

$$f_I + f_D + f_S(u) = 0 \quad (2.2.3)$$

b.) Vibración Forzada Amortiguada

$$f_I + f_D + f_S(u) = p(t) \quad (2.2.4)$$

La presencia de $f_S(u)$ en las ecuaciones anteriores indica que la relación entre la curva fuerza-desplazamiento dejó de ser lineal.

Chopra (2012) expresa que, si la curva inicial de carga es no lineal a grandes amplitudes de deformación, y las curvas de descarga y recarga, difieren de la rama de carga inicial, se puede decir que tal sistema tiene un comportamiento inelástico. Por lo tanto, ésto implica que la relación fuerza-deformación depende de si la deformación aumenta o disminuye, así la fuerza resistente es una función implícita de la deformación $f_S(u)$.

Para entender lo antes mencionado, se puede observar en las Figuras 2.4. y 2.5. las curvas de histéresis, en dónde se muestran los ciclos repetidos de carga-descarga-recarga, a los cuales se somete un espécimen de laboratorio. De manera análoga, en el caso particular que se esté analizando el comportamiento inelástico de un Sistema de 1 GDL Amortiguado sujeto a una carga dinámica cualquiera, se puede llegar a obtener gráficas de histéresis de los elementos estructurales, por el hecho de que el mismo tendrá desplazamientos (u) relativos a ambos lados de su posición de equilibrio durante todo el tiempo (t) que dure el movimiento. Vale definir que en este caso no habrá ciclos de carga-descarga-recarga, sino que el sistema tendrá desplazamientos (u) positivos, negativos e iguales a 0, que serán el instante cuando pase por la posición de equilibrio.

El área que encierra la gráfica de histéresis resulta importante para la estructura, por el hecho de que indica la capacidad que tiene ésta para disipar energía por deformación inelástica. Aunque a mayores ciclos de carga, mayor es la energía disipada, existe como efecto colateral la disminución de rigidez del sistema, debido al daño producido por las deformaciones excesivas.

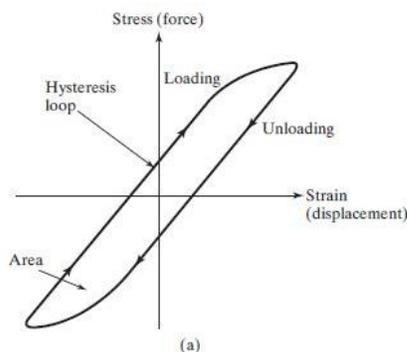


Figura 2.2.4. Ramas de Carga y Descarga para un ciclo de la curva de Histéresis.

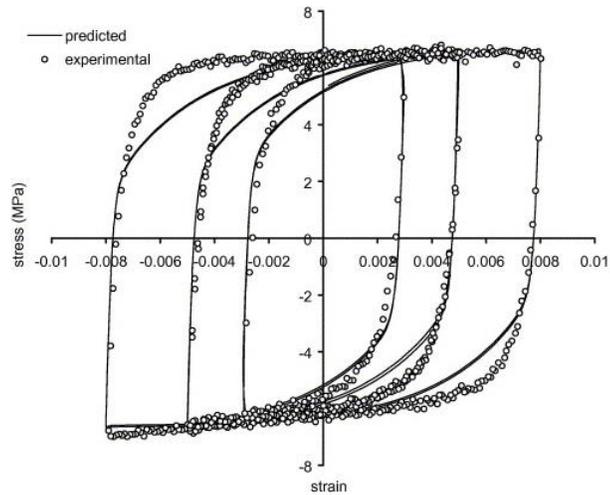


Figura 2.2.5. Resultados experimentales para un material sujeto a ciclos de carga. Curva de Histéresis.

2.3. Sistemas de 1 Grado de Libertad Amortiguados en Vibración libre

De acuerdo con Chopra (2012), se puede decir que una estructura se encuentra en vibración libre, cuando es perturbada desde su posición de equilibrio estático y luego se le permite vibrar sin ninguna fuerza dinámica excitadora.

Existen 2 formas en que se puede perturbar la posición de equilibrio estático de una estructura para hacerla vibrar de manera libre:

1. Asignándole un desplazamiento inicial y soltándola
2. Por medio de un impulso.

En el capítulo anterior, fue hallada la ecuación (2.2.1) para los Sistemas de 1 GDL Amortiguados en vibración libre, la cual tiene la siguiente forma:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (2.3.1)$$

Se trata de una ecuación diferencial ordinaria, de segundo orden, lineal y homogénea, donde la incógnita es el desplazamiento (u).

Previo a la resolución de la ecuación, se procede a dividir para la masa a ambos lados, con lo cual se obtiene la siguiente expresión:

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = 0 \quad (2.3.2)$$

Donde:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \xi = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{c_{cr}}$$

Al reescribir la ecuación (2.3.1) y obtener (2.3.2), se observan nuevos términos que son de suma importancia dentro de la dinámica estructural, como por ejemplo, ω_n se conoce como la frecuencia natural de vibración de la estructura o del sistema que se esté analizando, la cual está en función de la rigidez y la masa de la estructura.

Dada la frecuencia natural de la estructura, se puede hallar el periodo natural de vibración (T_n), el cual se define como el tiempo que le toma al sistema para completar un ciclo de vibración libre y se obtiene mediante la siguiente relación:

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (2.3.3)$$

A partir del periodo natural se puede definir a la frecuencia cíclica natural (f_n) de vibración con la siguiente expresión:

$$f_n = \frac{1}{T_n} \quad (2.3.4)$$

CHOPRA (2012)

“Las propiedades naturales ω_n, T_n y f_n dependen solo de la masa y la rigidez de la estructura. El más rígido de 2 Sistemas de 1 Grado de Libertad que tengan la misma masa, tendrá la frecuencia natural más alta y el periodo más corto. Similarmente, el que tenga una mayor masa de los dos, teniendo la misma rigidez, tendrá la frecuencia natural más baja y el periodo natural más largo. El adjetivo natural es usado en definir T_n, ω_n y f_n para enfatizar que estas son propiedades naturales del sistema cuando se le está permitida vibrar libremente sin excitación externa.” (p. 41)

Regresando a la ec. (2.3.2), aún existen dos términos de importancia por mencionar, el primero que se conoce como la razón de amortiguamiento o fracción de amortiguamiento crítico (ξ) y el segundo es el coeficiente de amortiguamiento crítico (c_{cr}).

Brevemente se puede decir que la fracción de amortiguamiento crítico es un valor que depende de las propiedades de la estructura, como la rigidez y la masa, y es adimensional; en cambio, el coeficiente de amortiguamiento se considera como la línea que divide al movimiento oscilatorio del no-oscilatorio. Además es el menor valor que puede asumir c de tal forma que la oscilación se inhiba en su totalidad.

Según Chopra (2012):

- Si $c < c_{cr}$ o $\xi < 1$, el sistema vibra sobre su posición de equilibrio con una amplitud que va disminuyendo progresivamente. A estos sistemas se los denomina como sub-amortiguados y por lo general son los de mayor importancia dentro de la ingeniería civil, porque las estructuras

como edificios, puentes, entre otras, se pueden considerar dentro de esta categoría debido a que su razón de amortiguamiento es menor al 10%.

- Si $c = c_{cr}$ o $\xi = 1$, el sistema regresa hasta su posición de equilibrio sin vibrar. A estos sistemas se los denomina como críticamente amortiguados.
- Si $c > c_{cr}$ o $\xi > 1$, el sistema no vibra como el caso anterior y regresa a su posición de equilibrio pero de manera más lenta. A estos sistemas se los denomina como sobre-amortiguados.

En la figura siguiente se muestra de forma gráfica lo explicado anteriormente, respecto a los diferentes casos de movimiento.

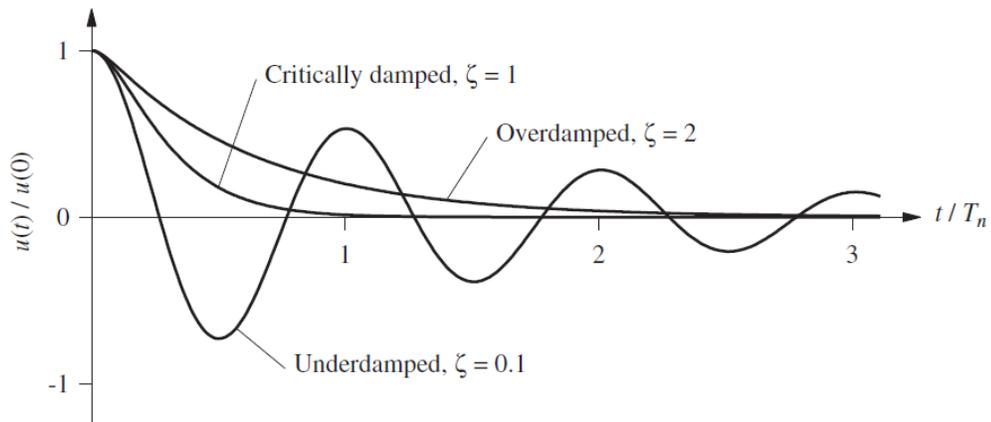


Figura 2.3.1. Vibración Libre Sistemas 1GDL Sub-amortiguados, Críticamente amortiguado y Sobre-amortiguados. (Chopra 2012)

Antes de proceder con la solución de la ecuación (2.3.2), es necesario mencionar que este trabajo hará énfasis sólo en las estructuras o sistemas sub-amortiguados, debido a que las estructuras de interés, caen dentro de esa clasificación. Como acotación a lo antes dicho, de acuerdo con Villarreal y Oviedo (2009), el amortiguamiento viscoso innato equivalente al 2-5% del amortiguamiento crítico ha tenido gran aceptación dentro de la práctica para el análisis de la respuesta lineal de edificios típicos.

La solución de la ecuación, sujeta a condiciones iniciales o de borde, diferentes de cero, u_0 y \dot{u}_0 , permite obtener el desplazamiento (u) en función del tiempo (t) de un Sistema de 1 GDL Amortiguado en Vibración Libre, mediante la siguiente expresión:

$$u(t) = e^{-\xi\omega_n t} \left[u(0)\cos\omega_D t + \frac{\dot{u}(0) + \xi\omega_n u(0)}{\omega_D} \sin\omega_D t \right] \quad (2.3.5)$$

Donde:

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

El término ω_D se denomina frecuencia de vibración amortiguada, el cual está en función de la frecuencia de vibración natural (ω_n) y la fracción de amortiguamiento crítico (ξ). De la misma forma en que el periodo natural de vibración fue definido, ocurre con el periodo de vibración amortiguado:

$$T_D = \frac{2\pi}{\omega_D} \quad (2.3.6)$$

Así mismo, existe una forma en que uno puede relacionar el periodo de vibración amortiguado (T_D) con el periodo natural de vibración (T_n) y la razón de amortiguamiento del sistema (ξ). Tal relación se expresa de la siguiente manera:

$$T_D = \frac{T_n}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2.3.7)$$

Analizando la ecuación (2.3.5), se puede decir que, evaluando para diferentes tiempos (t), la amplitud de los desplazamientos irá decreciendo conforme va completándose cada ciclo de movimiento y que el decremento de esa amplitud es exponencial con el tiempo, como se muestra en la figura a continuación.

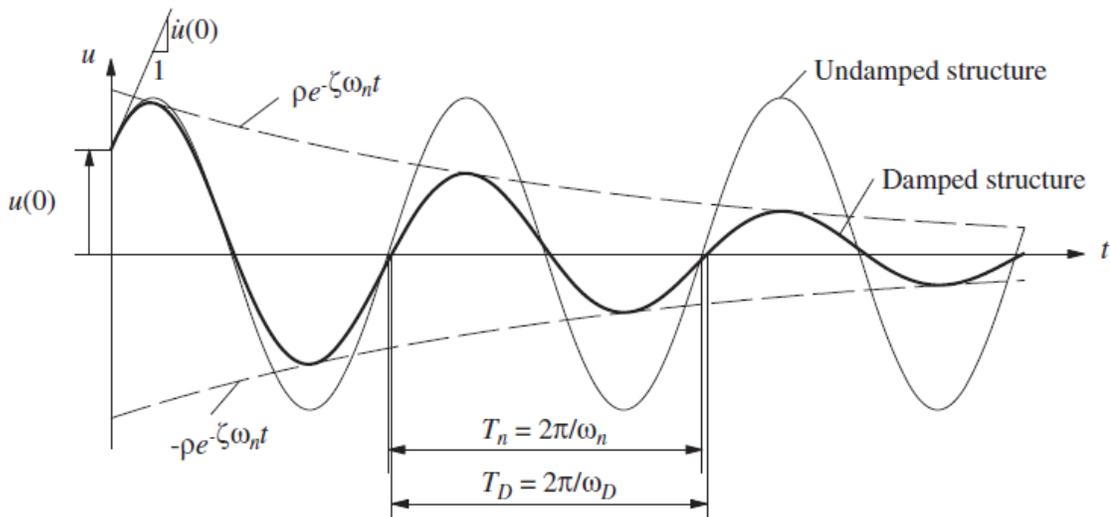


Figura 2.3.2 Decremento exponencial de la amplitud del desplazamiento debido al amortiguamiento. Consecuencias del amortiguamiento. (Chopra 2012)

Como efecto adicional por parte del amortiguamiento, observando la figura 2.7. y la ecuación (2.10) se puede decir que éste alarga el periodo de vibración de T_n a T_D , y por lo tanto, la frecuencia se ve reducida de ω_n a ω_D .

CHOPRA (2012)

“Estos efectos son despreciables siempre y cuando la razón de amortiguamiento crítico (ξ) sea menor que 20%, un rango que incluye a la mayor parte de la estructuras. Para la muchas estructuras las propiedades amortiguadas T_D y ω_D son aproximadamente iguales a las propiedades no amortiguadas ω_n y T_n , respectivamente.” (p. 50)

Dicho lo anterior, queda establecido que el efecto más importante del amortiguamiento, en vibración libre, es un decremento de la amplitud del movimiento. Por lo que en la siguiente figura, a manera de resaltar lo antes mencionado, se ilustran 4 sistemas diferentes en donde la oscilación libre es debido a un desplazamiento inicial $u(0)$, poseen el mismo T_n pero las razones de amortiguamiento crítico (ξ) son distintas y son las siguientes: 2, 5, 10 y 20%.

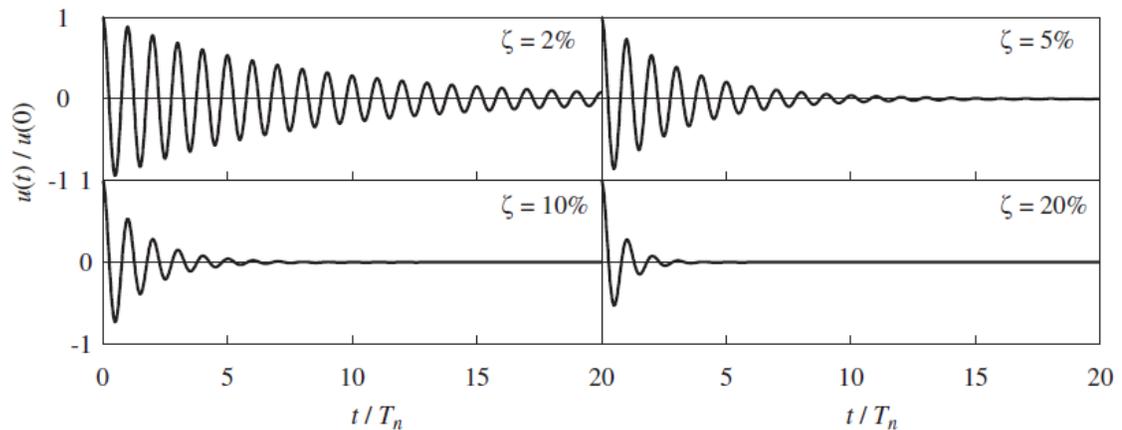


Figura 2.3.3 Sistemas de vibración libre para 4 niveles de amortiguamiento 2, 5, 10 y 20%. (Chopra 2012)

2.4. Sistemas de 1 Grado de Libertad Amortiguados sujetos a Carga armónica y periódica

Un sistema sujeto a una carga armónica es aquel que tiene una fuerza que varía en el tiempo y que puede expresarse matemáticamente de forma sinusoidal. Por lo tanto, la presencia de la fuerza externa hace que el sistema se encuentre en vibración forzada, siempre y cuando dure el movimiento.

La ecuación que gobierna la respuesta para Sistemas de 1 GDL Amortiguados sujetos a una fuerza armónica es:

Fuerza Seno:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p_0 \sin \omega t \quad (2.4.1)$$

Fuerza Coseno:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p_0 \cos \omega t \quad (2.4.2)$$

Estas son ecuaciones diferenciales de segundo orden, ordinarias, lineales, no homogéneas y se resuelven para las siguientes condiciones iniciales:

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

Las soluciones particulares de estas ecuaciones diferenciales son:

$$u_p(t) = C \sin \omega t + D \cos \omega t \quad (2.4.3)$$

Donde, los correspondientes valores de las constantes C y D se obtienen por las siguientes fórmulas:

Fuerza Seno:

$$C = \frac{p_0}{k} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}$$

$$D = \frac{p_0}{k} \frac{-2\xi\frac{\omega}{\omega_n}}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}$$

Fuerza Coseno:

$$C = \frac{p_0}{k} \frac{2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}$$

$$D = \frac{p_0}{k} \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}$$

La solución complementaria para las ec. (2.4.1) y (2.4.2) es la respuesta en vibración libre y está dada por:

$$u_c(t) = e^{-\xi\omega_n t} (A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t) \quad (2.4.4)$$

La solución completa se expresa por la ec. (2.4.5), en dónde se puede observar claramente que se compone de dos tipos de respuesta, la transitoria y la de estado estable. La respuesta transitoria es aquella que aparecerá al inicio del movimiento y estará relacionada con la vibración libre, pero desaparecerá debido a que toma un tiempo para que el efecto de la vibración forzada se imponga y se mantenga, dándole paso al estado estable.

$$u(t) = e^{-\xi\omega_n t} (A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t) + C \sin \omega t + D \cos \omega t \quad (2.4.5)$$

Respuesta Transitoria: $e^{-\xi\omega_n t} (A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t)$

Respuesta Estable: $C \sin \omega t + D \cos \omega t$

Las constantes A y B se pueden obtener con la ayuda de procedimientos matemáticos, considerando las condiciones iniciales del movimiento, tales como $u(0)$ y $\dot{u}(0)$.

Durante la respuesta estable, se puede esperar que se presente la situación que se conoce como resonancia, la cual consiste en la sincronización de la frecuencia natural (ω_n) de vibración de la estructura en cuestión y la frecuencia con la que actúa la fuerza sobre el sistema (ω), dando lugar a un aumento progresivo considerable de los desplazamientos (u) en función del tiempo (t).

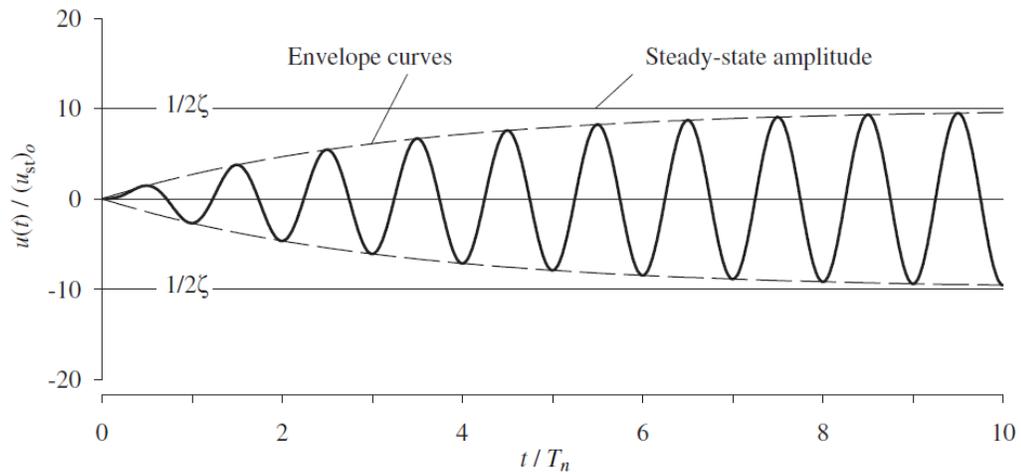


Figura 2.4.1 Respuesta de un sistema con 5% de amortiguamiento crítico a fuerza sinusoidal de frecuencia $\omega = \omega_n$; $u(0) = \dot{u}(0) = 0$. (Chopra 2012)

Existe otra forma de expresar la deformación de la respuesta estable de un sistema sometido a una fuerza armónica, incluyendo los parámetros conocidos como ángulo de fase (ϕ) y factor de respuesta de deformación (R_d), para poder llegar a obtener las siguientes ecuaciones:

$$u(t) = u_0 \sin(\omega t - \phi) = (u_{st})_0 R_d \sin(\omega t - \phi) \quad (2.4.6)$$

$$u(t) = u_0 \cos(\omega t - \phi) = (u_{st})_0 R_d \cos(\omega t - \phi) \quad (2.4.7)$$

Donde

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \right], \quad R_d = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + \left[2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right) \right]^2}}$$

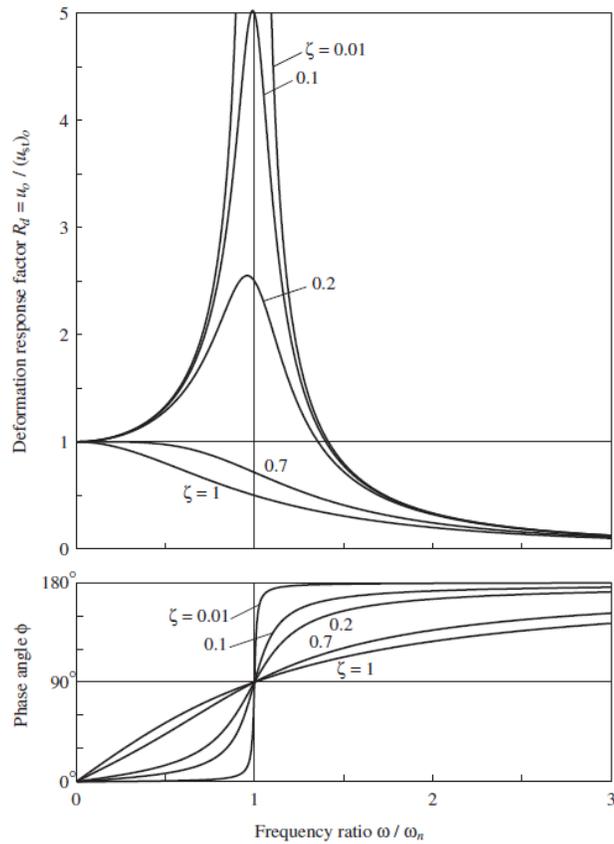


Figura.2.4.2. Curvas que relacionan R_d y ϕ con $\frac{\omega}{\omega_n}$ para diferentes niveles de amortiguamiento. (Chopra 2012)

Según Chopra (2012), con respecto al gráfico que relaciona a R_d vs. $\frac{\omega}{\omega_n}$, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Si se presenta el caso en que $\omega / \omega_n \ll 1$, lo que implica que la fuerza está variando de una manera muy lenta, R_d es solo un poco mayor a 1 y esencialmente es independiente del amortiguamiento. A raíz de lo anterior, $u_0 \cong (u_{st})_0 = \frac{P_0}{k}$, indicando que la amplitud de la respuesta

dinámica es casi la misma que la deformación estática y es controlada por la rigidez del sistema.

- Si se presenta el caso en que $\omega/\omega_n \gg 1$, lo que implica que la fuerza está variando de manera muy rápida, R_d tiende a cero mientras la relación ω/ω_n se incrementa y es inmune al amortiguamiento. Para grandes valores de ω/ω_n , $u_0 \cong (u_{st})_0 \frac{\omega_n^2}{\omega^2} = \frac{P_0}{m\omega^2}$, lo cual implica que la respuesta está controlada por la masa del sistema.
- Si se presenta el caso en que $\omega/\omega_n \cong 1$, R_d es muy sensible al amortiguamiento. Para los valores más bajos de amortiguamiento, R_d puede llegar a ser varias veces mayor que uno, lo que implica que la deformación dinámica para el estado estable será mucho mayor que la deformación estática. Si $\omega/\omega_n = 1$ entonces se obtiene $u_0 = \frac{(u_{st})_0}{2\xi} = \frac{P_0}{c\omega_n}$, lo que indica que el sistema está controlado por el amortiguamiento.

Para el gráfico que relaciona a ϕ vs. ω/ω_n , se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Si se presenta el caso en que $\omega/\omega_n \ll 1$, lo que implica que la fuerza está variando de una manera muy lenta, ϕ tiene un valor muy cercano a cero, por lo que se dice que el sistema se encuentra en fase con la fuerza aplicada, produciéndose el caso a manera de ejemplo, de que si la fuerza se aplica hacia la derecha, la estructura hará lo mismo y viceversa.

- Si se presenta el caso en que $\omega/\omega_n \gg 1$, lo que implica que la fuerza está variando de manera muy rápida, ϕ tiene un valor muy cercano a 180 grados, por lo que se dice que el sistema se encuentra desfasado con respecto a la fuerza aplicada, indicando que si la fuerza se aplica hacia la derecha, el sistema se desplaza hacia la izquierda y viceversa
- Si se presenta el caso en que $\omega/\omega_n = 1$, ϕ tiene un valor muy cercano a 90 grados para todos los valores de ξ y alcanza su máximo desplazamiento cuando la fuerza pasa a través de ceros.

A partir del factor dinámico de respuesta de desplazamiento R_d , se pueden hallar los factores de velocidad y aceleración, R_v y R_a respectivamente. Reescribiendo la ec. (2.4.6), derivando una y dos veces con respecto a (t) se obtienen R_v y R_a en función de R_d , según las siguientes expresiones:

$$R_v = \frac{\omega}{\omega_n} R_d \quad (2.4.8)$$

$$R_a = \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 R_d \quad (2.4.9)$$

Una expresión más simple para expresar estos factores se da de la siguiente forma:

$$\frac{R_a}{\omega/\omega_n} = R_v = \frac{\omega}{\omega_n} R_d \quad (2.4.10)$$

Un momento de interés de dentro del movimiento de la estructura sometida a vibración forzada, es aquel en donde se produce el efecto conocido

como resonancia. Éste, tiene como consecuencia principal producir grandes deformaciones que van incrementándose a un ritmo definido, siempre y cuando dure el evento y la frecuencia natural de vibración sea igual a la frecuencia forzada. La frecuencia forzada, de acuerdo con Chopra (2012), se obtiene igualando a cero la primera derivada de R_d , R_v y R_a con respecto ω/ω_n ; para $\xi < 1/\sqrt{2}$ se tienen los siguientes valores:

Frecuencia resonante de desplazamiento: $\omega_n \sqrt{1-2\xi^2}$

Frecuencia resonante de velocidad: ω_n

Frecuencia resonante de aceleración: $\frac{\omega_n}{\sqrt{1-2\xi^2}}$

Para sistemas amortiguados, se debería usar la frecuencia amortiguada pero, como ya antes se resaltó, $\omega_D \cong \omega_n$ para valores de $\xi < 20\%$, lo cual abarca la gran mayoría de estructuras que se diseñan y construyen en ingeniería civil.

Para concluir, también es posible expresar los factores dinámicos en sus respectivas frecuencias resonantes:

$$R_d = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2.4.11)$$

$$R_v = \frac{1}{2\xi} \quad (2.4.12)$$

$$R_a = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} \quad (2.4.13)$$

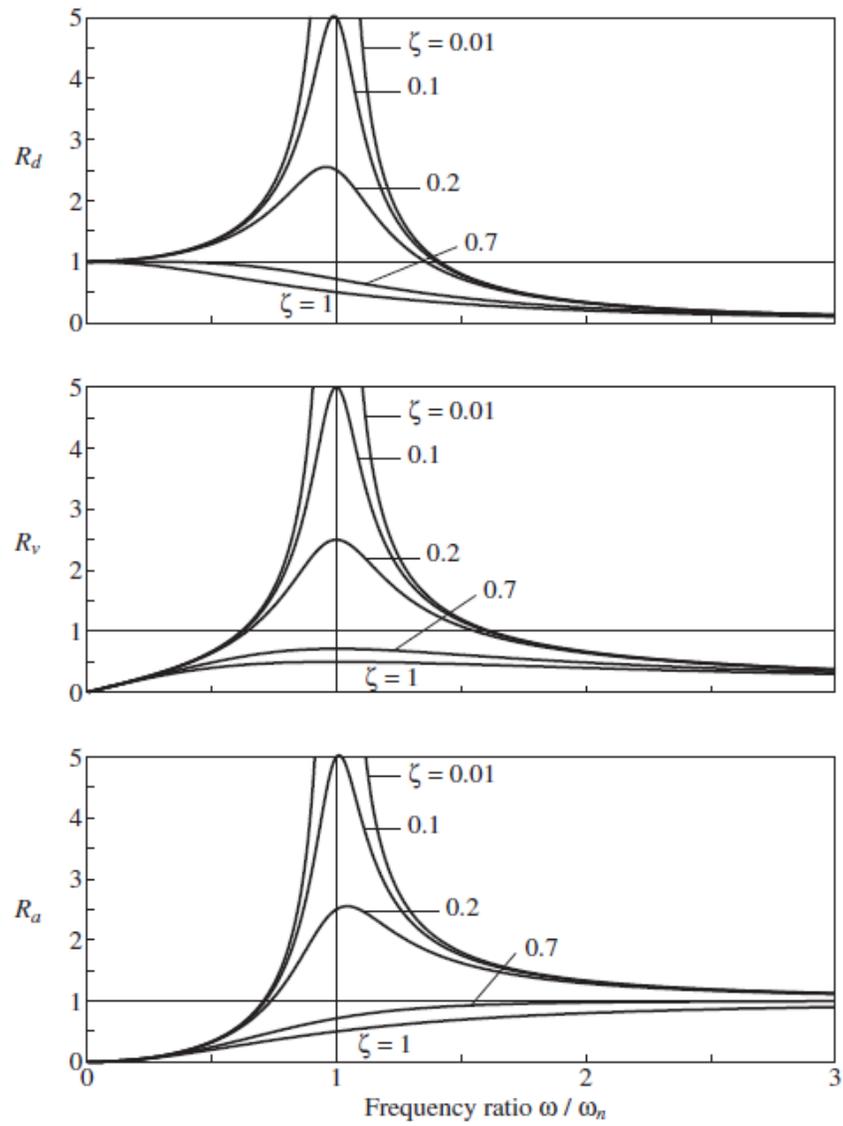


Figura 2.4.3 Factores Dinámicos de deformación, velocidad y aceleración.
(Chopra 2012)

2.5. Sistemas de 1 Grado de Libertad Amortiguados sujetos a Carga Periódica

De acuerdo con Chopra (2012), se define a una carga periódica como aquella cuya porción definida por T_0 se repite indefinidamente a lo largo del tiempo. Un ejemplo de este tipo son las fuerzas de las hélices de un barco, las cargas de las olas en una estructura mar adentro y las fuerzas inducidas por el viento por desprendimiento de vórtices en estructuras altas y esbeltas. Por lo general, las cargas de los terremotos no son del tipo periódica.

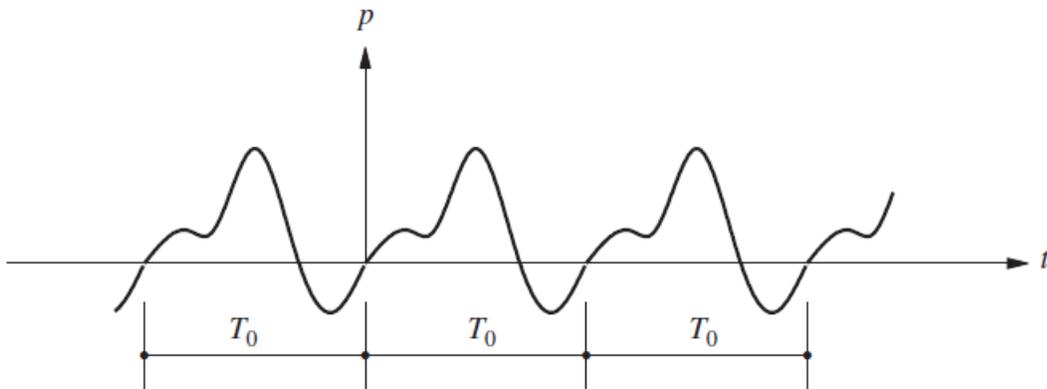


Figura 2.5.1 Carga Periódica. (Chopra 2012)

Matemáticamente, se define que una carga $p(t)$ es periódica, si para cada instante $p(t + jT_0) = p(t)$, donde j puede tomar los siguientes valores: $-\infty, \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$.

Una función como la antes mencionada puede ser separada en sus componentes armónicos usando las series de Fourier:

$$p(t) = a_0 + \sum_{j=1}^{\infty} a_j \cos j\omega_0 t + \sum_{j=1}^{\infty} b_j \sin j\omega_0 t \quad (2.5.1)$$

Donde

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} p(t) dt$$

$$a_j = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} p(t) \cos j\omega_0 t dt \quad j = 1, 2, 3, \dots$$

$$b_j = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} p(t) \sin j\omega_0 t dt \quad j = 1, 2, 3, \dots$$

El coeficiente a_0 es el valor promedio de $p(t)$; los valores de a_j y b_j son las amplitudes de los armónicos número j de frecuencia $j\omega_0$.

CHOPRA (2012)

“Un excitación periódica implica que ésta ha estado en existencia por un buen tiempo, por lo que la respuesta transitoria, asociada con el desplazamiento inicial y la velocidad, ha decaído. Por lo tanto, interesa encontrar la respuesta de estado estable. Solo para una excitación armónica, la respuesta de un sistema lineal a una fuerza periódica puede ser determinada combinando las respuestas con los términos individuales en las series de Fourier.” (p. 114)

Basándose en lo anteriormente dicho, la respuesta de estado estable de un sistema de 1GDL amortiguado sometido a una carga periódica se puede expresar mediante la ec. (2.5.2), que con la ayuda de procedimientos matemáticos se determinan los valores correspondientes de $u_0(t)$, $u_j^c(t)$ y $u_j^s(t)$, y la ec. (2.5.2) adquiere la siguiente forma:

$$u(t) = u_0(t) + \sum_{j=1}^{\infty} u_j^c(t) + \sum_{j=1}^{\infty} u_j^s(t) \quad (2.5.2)$$

$$u(t) = \frac{a_0}{k} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{k} \frac{1}{(1 - \beta_j^2) + (2\xi\beta_j)^2} \left\{ \begin{array}{l} [a_j(2\xi\beta_j) + b_j(1 - \beta_j^2)] \sin j\omega_0 t \\ + [a_j(1 - \beta_j^2) - b_j(2\xi\beta_j)] \cos j\omega_0 t \end{array} \right\} \quad (2.5.3)$$

2.6. Sistemas de 1 Grado de Libertad Amortiguados sujetos a pulsos

Según Chopra (2012), en muchas situaciones prácticas la excitación dinámica no es del tipo periódica ni armónica. Entonces, una forma de poder obtener una respuesta muy aproximada a cargas que varían arbitrariamente en el tiempo, es discretizar la fuerza externa en pequeñas áreas de corta duración, conocidas como pulsos, y luego ir calculando sucesivamente la respuesta de cada pulso, independientemente de los otros. Los pulsos por lo general no se ven afectados por el grado de amortiguamiento que poseen las estructuras.

Existen otros métodos analíticos para este tipo de casos, como la integral de Duhamel y los métodos clásicos de resolución de ecuaciones diferenciales, siendo la integral el método más exacto, pero teniendo grandes limitaciones especialmente cuando la carga es del tipo sísmica.

El capítulo se concentrará sólo en el método que involucra la discretización en pulsos de la fuerza actuante, sobre los Sistemas de 1GDL Amortiguados. Existen varias formas en que el ingeniero estructural puede representar los pulsos y son las siguientes:

Pulso Rectangular

La ecuación que se debe resolver es la siguiente:

$$m\ddot{u} + ku = \begin{cases} p_0 & t \leq t_d \\ 0 & t \geq t_d \end{cases} \quad (2.6.1)$$

Las condiciones iniciales parten del reposo $u(0) = \dot{u}(0) = 0$ y el análisis está dividido en dos partes, considerando la vibración forzada y la libre, teniendo como fin poder llevar a graficar la máxima respuesta general de la

estructura, que se compondrá de aquella que sea la mayor entre los tipos de movimientos antes mencionados (forzada o libre).

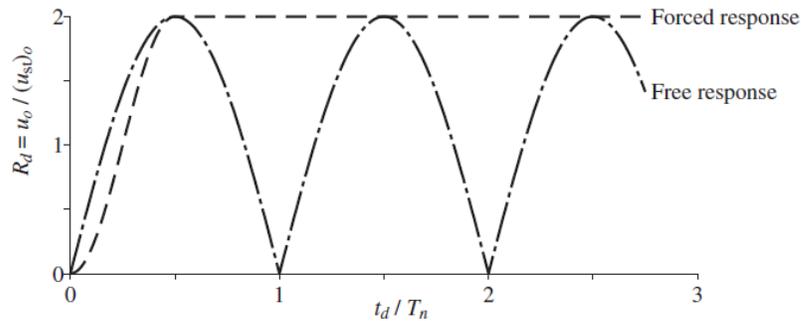


Figura 2.6.1 Respuesta a un pulso rectangular. (Chopra 2012)

Pulso de Medio Seno

Para este caso, la ecuación gobernante adquiere la forma:

$$m\ddot{u} + ku = \begin{cases} p_0 \sin\left(\frac{\pi t}{t_d}\right) & t \leq t_d \\ 0 & t \geq t_d \end{cases} \quad (2.6.2)$$

La solución de la ec. (2.6.2), con condiciones iniciales partiendo del reposo $u(0)=\dot{u}(0)=0$, es presentada de manera separada para cuando $t_d/T_n \neq \frac{1}{2}$ y $t_d/T_n = \frac{1}{2}$. El análisis para las situaciones mencionadas incluirá las dos fases del movimiento, vibración forzada y libre. Así como en el caso anterior, los máximos valores de la respuesta para las dos fases serán obtenidos de manera separada y el mayor de los dos, representará la respuesta general de la estructura.

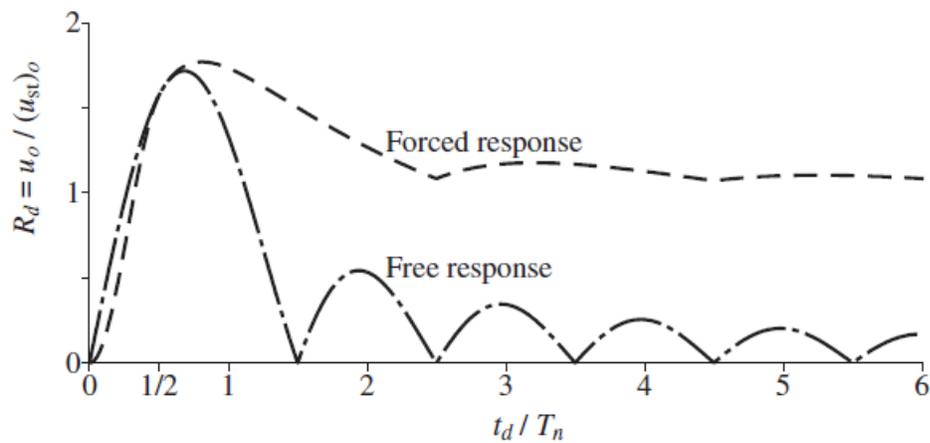


Figura 2.6.2 Máxima respuesta durante la vibración libre y forzada de un sistema de 1 GDL sometido a pulsos de medio seno. (Chopra 2012)

Pulso triangular simétrico

La solución de un sistema de 1 GDL sometido a esta clase de pulsos puede obtenerse de dos maneras. La primera se denomina método clásico, el cual ya fue usado para los casos anteriores, y puede ser implementado en 3 fases: $0 \leq t \leq t_d/2$, $t_d/2 \leq t \leq t_d$ y $t \geq t_d$. Pero la forma más sencilla de resolverlo es mediante la segunda opción, que consiste en considerar a los pulsos triangulares como 3 funciones rampa y sumar las respuestas individuales para obtener la respuesta del pulso triangular simétrico.

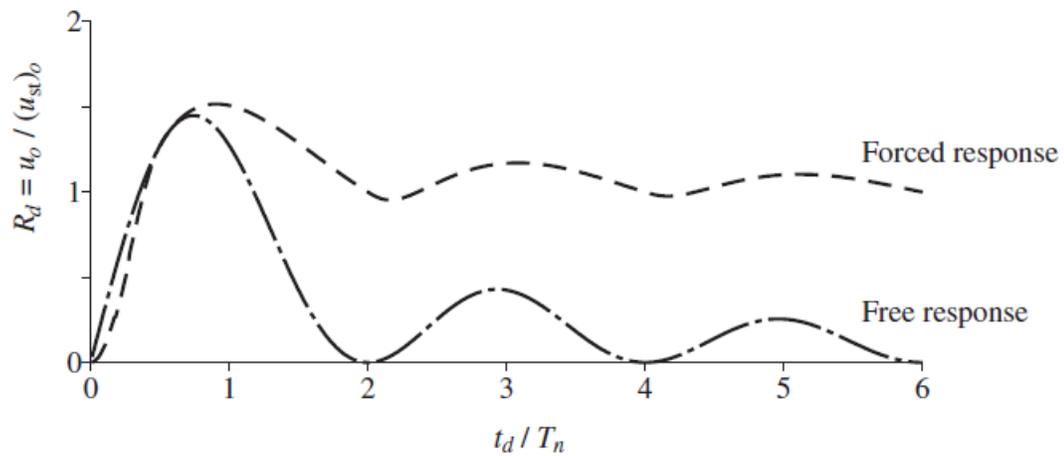


Figura 2.6.3 Máxima respuesta durante la vibración libre o forzada de un sistema de 1 GDL sometido a pulsos triangulares simétricos. (Chopra 2012)

2.7. Sistemas de 1 Grado de Libertad Amortiguados sujetos a Carga de Sismo

En el Ecuador, como en muchos países amenazados por la presencia de los sismos, lo que más le debe preocupar al ingeniero estructural es el comportamiento de su estructura frente movimientos inducidos en la base, producto de la aceleración del terreno. Para esto, se puede denotar a u_g como el desplazamiento del terreno, a u' como el desplazamiento total de la masa y a u como el desplazamiento relativo entre el suelo y la masa, que mediante la siguiente expresión, muestran el desplazamiento total para cada instante de tiempo (t):

$$u'(t) = u_g(t) + u(t) \quad (2.7.1)$$

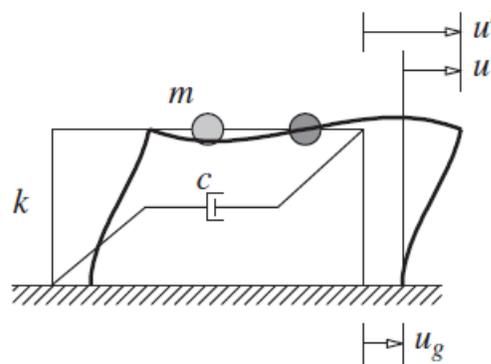


Figura 2.7.1 Sistema 1 GDL Amortiguado sometido a un movimiento inducido en su base. (Chopra 2012)

Por medio del equilibrio dinámico se puede llegar a obtener la ecuación que rige el comportamiento de los Sistemas de 1 GDL Amortiguados, cuando son sometidos a cargas sísmicas. Ésta es válida, siempre y cuando las deformaciones se mantengan dentro del rango lineal:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.7.2)$$

Si se divide en ambos lados de la ecuación para la masa, se obtiene:

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = -\ddot{u}_g(t) \quad (2.7.3)$$

De acuerdo con Chopra (2012), la aceleración durante el sismo varía de manera muy irregular, de tal forma que los métodos analíticos deben ser descartados para la resolución de estructuras, sometidas a esta clase de situaciones. Como alternativa se plantea el uso de métodos numéricos para determinar la respuesta del sistema, la cual consiste en obtener los valores de $u(t)$ y posteriormente, aprovechando la relación lineal, calcular las fuerzas internas en los elementos estructurales como Momentos y Fuerzas Cortantes.

Dentro del rango de los valores que se pueda hallar para $u(t)$, habrá un valor que será el máximo desplazamiento de la estructura para un valor específico de ξ y de T_n .

Lo dicho anteriormente, enuncia lo que se conocería como un punto dentro de una gráfica que se denomina como espectro de respuesta de desplazamiento. Según Crisafulli y Villafañe (2002), el concepto de espectro de respuesta fue introducido por primera vez en 1932, por M. A. Biot y posteriormente desarrollado por Housner, Newmark y otros investigadores. Chopra (2012) expresa que un espectro se puede definir como una forma de resumir gráficamente la máxima respuesta de todos los posibles sistemas lineales de 1 GDL sometidos a la misma componente de movimiento del terreno, en donde la zona de las abscisas se representa el T_n o ω_n y en las ordenadas se encuentran los valores de la respuesta máxima calculados para los diferentes valores de amortiguamiento crítico. Los espectros de respuesta de importancia en la ingeniería son:

Espectro de respuesta de Desplazamiento: Provee la máxima deformación de un sistema.

$$u_0(T_n, \xi) \equiv \max_t |u(t, T_n, \xi)|$$

Espectro de respuesta de Velocidad: Está relacionado directamente con la máxima energía de deformación almacenada en el sistema durante un terremoto.

$$\dot{u}_0(T_n, \xi) \equiv \max_t |\dot{u}(t, T_n, \xi)|$$

Espectro de respuesta de Aceleración: Está relacionado directamente con los valores de la máxima fuerza estática equivalente y el cortante basal.

$$\ddot{u}_0^t(T_n, \xi) \equiv \max_t |\ddot{u}^t(t, T_n, \xi)|$$

Se puede llegar a expresar los demás espectros en función del espectro de desplazamientos. Obviamente, existe una razón en la cual se fundamentan dichas relaciones pero el autor no profundizará en eso y sólo mostrará las expresiones matemáticas resultantes que permiten dicha acción:

$$V = \omega_n u(t) \tag{2.7.4}$$

$$A = \omega_n^2 u(t) \tag{2.7.5}$$

Los valores de V y de A se conocen como espectros de pseudo-velocidad y aceleración respectivamente.

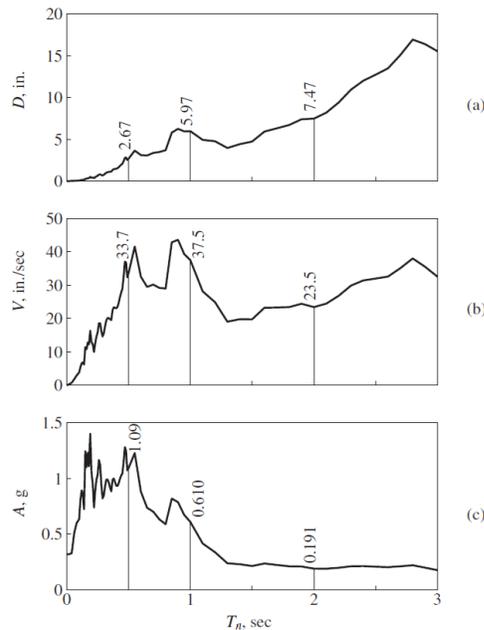


Figura 2.7.2 Espectros de respuesta de deformación, pseudo-velocidad y pseudo-aceleración para el sismo del Centro ($\xi = 2\%$). (Chopra 2012)

Puede que no se haya hecho mucho hincapié hasta ahora, pero el amortiguamiento tiene una influencia importante en el espectro de respuesta de una estructura frente a un evento sísmico.

Chopra (2012)

“En el límite, cuando $T_n \rightarrow 0$, el amortiguamiento no afecta la respuesta porque la estructura se mueve de manera rígida con el suelo. En el otro límite, cuando $T_n \rightarrow \infty$, el amortiguamiento no afecta la respuesta porque la masa se mantiene quieta mientras el suelo se desplaza. Entre las 3 regiones de periodos definidas, el efecto del amortiguamiento es mayor en la zona del espectro sensible a la velocidad. En las regiones espectrales el efecto del amortiguamiento depende de las características del movimiento del terreno. Si el movimiento es casi armónico durante muchos ciclos, el efecto del amortiguamiento será muy grande para sistemas cercanos a la resonancia. Si la excitación es en forma de pulsos, el efecto del amortiguamiento será pequeño.” (p. 229)

A parte de los espectros de respuesta, se introduce un nuevo tipo que se conoce como espectro de diseño elástico. Esta clase de espectro es de suma importancia y debe cumplir con ciertos requerimientos, por el hecho de que es usado para el diseño de nuevas estructuras, permitiendo calcular la fuerza de diseño y deformación, para que un sistema de 1 GDL Amortiguado se mantenga dentro del rango elástico o para la evaluación de seguridad de estructuras existentes. Estos se obtienen mediante análisis estadísticos de unos espectros de respuestas para un conjunto de datos de movimientos del terreno, pero lastimosamente en ciertos casos, no existen tales registros. Como solución a ese problema, Chopra (2012) plantea que el espectro de diseño debería estar basado en registros de otros lugares pero con condiciones similares al sitio en estudio. Los factores que uno busca que coincidan en la selección incluyen: magnitud del sismo, distancia de la falla, mecanismo de la falla, geología de la ruta de viaje de las ondas desde el origen del sismo hasta el sitio en cuestión, suelo y condiciones del sitio.

El diseño tradicional de las estructuras sigue las directrices de los distintos códigos de construcción, en donde se estipula que la fuerza elástica debe verse reducida a una fuerza mucho menor, con el propósito de que la estructura incurra en el rango inelástico para el máximo sismo esperado en la zona, sin producirse el colapso de la misma. El desafío del ingeniero radica en limitar el daño en zonas específicas y a un nivel aceptable.

El valor que permite reducir la fuerza elástica a una fuerza menor se llama factor de reducción (R). Este factor se define como:

$$R = \frac{1}{f_y} = \frac{f_0}{f_y} = \frac{u_0}{u_y} \quad (2.7.6)$$

Donde f_0 es la máxima fuerza para la cual se diseñará el sistema si se desea mantener en el rango elástico durante el evento sísmico y f_y es la fuerza que produce la fluencia y que se mantendrá constante, de acuerdo con el diagrama elastoplástico. Si R es igual a la unidad, el sistema es elástico pero en el caso de que R sea mayor que uno, esto indicará que el sistema no es lo suficientemente fuerte como para permanecer elástico, por lo que, como consecuencia procederá a entrar en fluencia y a incurrir en el rango inelástico. Estructuras diseñadas para el resistir fuerzas en el rango elástico son anti-económicas.

La ductilidad es otro factor que se debe de tener en consideración en el diseño sismo-resistente. Se define como la razón entre la máxima deformación del sistema elastoplástico y la deformación que inicia la fluencia:

$$\mu = \frac{u_m}{u_y} \quad (2.7.7)$$

Donde para valores mayores que la unidad, éste indica la capacidad que tiene la estructura para poder deformarse en el rango inelástico, acompañada de disipación de energía.

La ecuación que gobierna el comportamiento de los sistemas inelásticos de 1 GDL Amortiguados sometidos a una carga sísmica es la siguiente:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.7.8)$$

La solución de la ec. (2.7.8) es a través de métodos numéricos y de acuerdo con Chopra (2012), un sistema inelástico una vez que ha entrado en fluencia, no oscila alrededor de su posición inicial de equilibrio. Este efecto produce que la estructura se desplace hacia otra posición de equilibrio, hasta que se produce la fluencia en otro elemento de la estructura. Por lo tanto, una vez que el movimiento cesa, el sistema retornará a una posición de reposo diferente a la inicial y en el caso de que haya sufrido bastante daño, no necesariamente se encontrará en posición vertical.

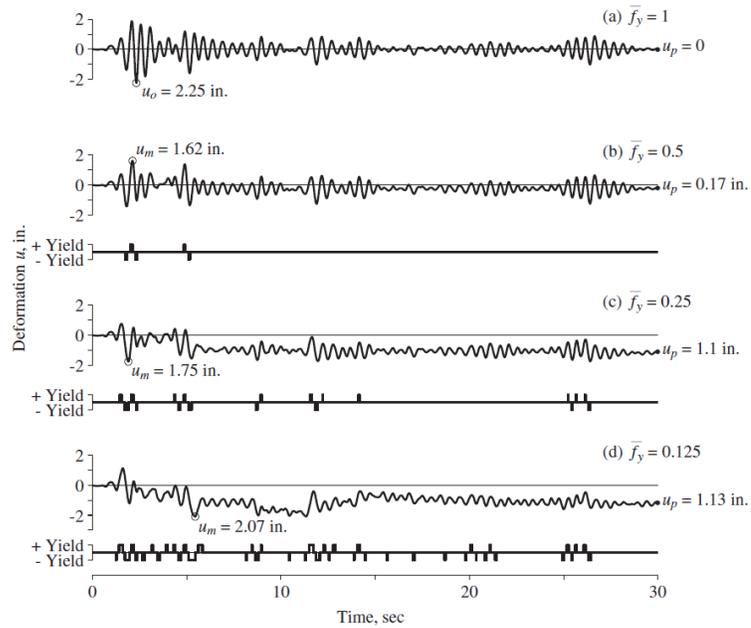


Figura 2.7.3 Gráficos respuesta de deformación y fluencia para 4 sistemas diferentes sometidos al sismo de El Centro. $T_n = 0.5s$, $\xi = 5\%$ y

$$\bar{f}_y = 1, 0.5, 0.25, 0.125 . \text{ (Chopra 2012)}$$

La energía que entra a un sistema inelástico, producto de un sismo, puede llegar a ser disipada por amortiguamiento y fluencia. Según Chopra (2012), los diferentes términos energéticos pueden ser definidos si se integra la ec. (2.7.8):

$$\int_0^u m\ddot{u}(t)du + \int_0^u c\dot{u}(t)du + \int_0^u f_s(u)du = -\int_0^u m\ddot{u}_g(t)du \quad (2.7.9)$$

$$E_I(t) = -\int_0^u m\ddot{u}_g(t)du \quad (2.7.10)$$

$$E_K(t) = \int_0^u m\ddot{u}(t)du = \int_0^{\dot{u}} m\dot{u}(t)d\dot{u} = \frac{m\dot{u}^2}{2} \quad (2.7.11)$$

$$E_D(t) = \int_0^u f_D(t) du = \int_0^u c\dot{u}(t) du \quad (2.7.12)$$

Para el último término del lado izquierdo de la ec. (2.7.9), se considera la suma de la energía disipada por deformación inelástica y la energía elástica de deformación:

$$E_s(t) = \frac{(f_s(t))^2}{2k} \quad (2.7.13)$$

$$E_Y(t) = \int_0^u f_s(u) du - E_s(t) \quad (2.7.14)$$

Expresando ahora la ec. (2.7.9) en función de sus términos energéticos, se obtiene la siguiente ecuación, que resulta ser un ejemplo que ilustra el principio físico de la conservación de la energía:

$$E_I(t) = E_K(t) + E_D(t) + E_s(t) + E_Y(t) \quad (2.7.15)$$

Chopra (2012) indica que para ser más consistente con el análisis de sistemas sometidos a terremotos, resulta mejor reescribir las integrales de $E_D(t)$ y $E_Y(t)$ con respecto al tiempo:

$$E_D(t) = \int_0^t c[\dot{u}(t)]^2 dt$$

$$E_Y(t) = \left[\int_0^t \dot{u} f_s(u) dt \right] - E_s(t) \quad (2.7.16)$$

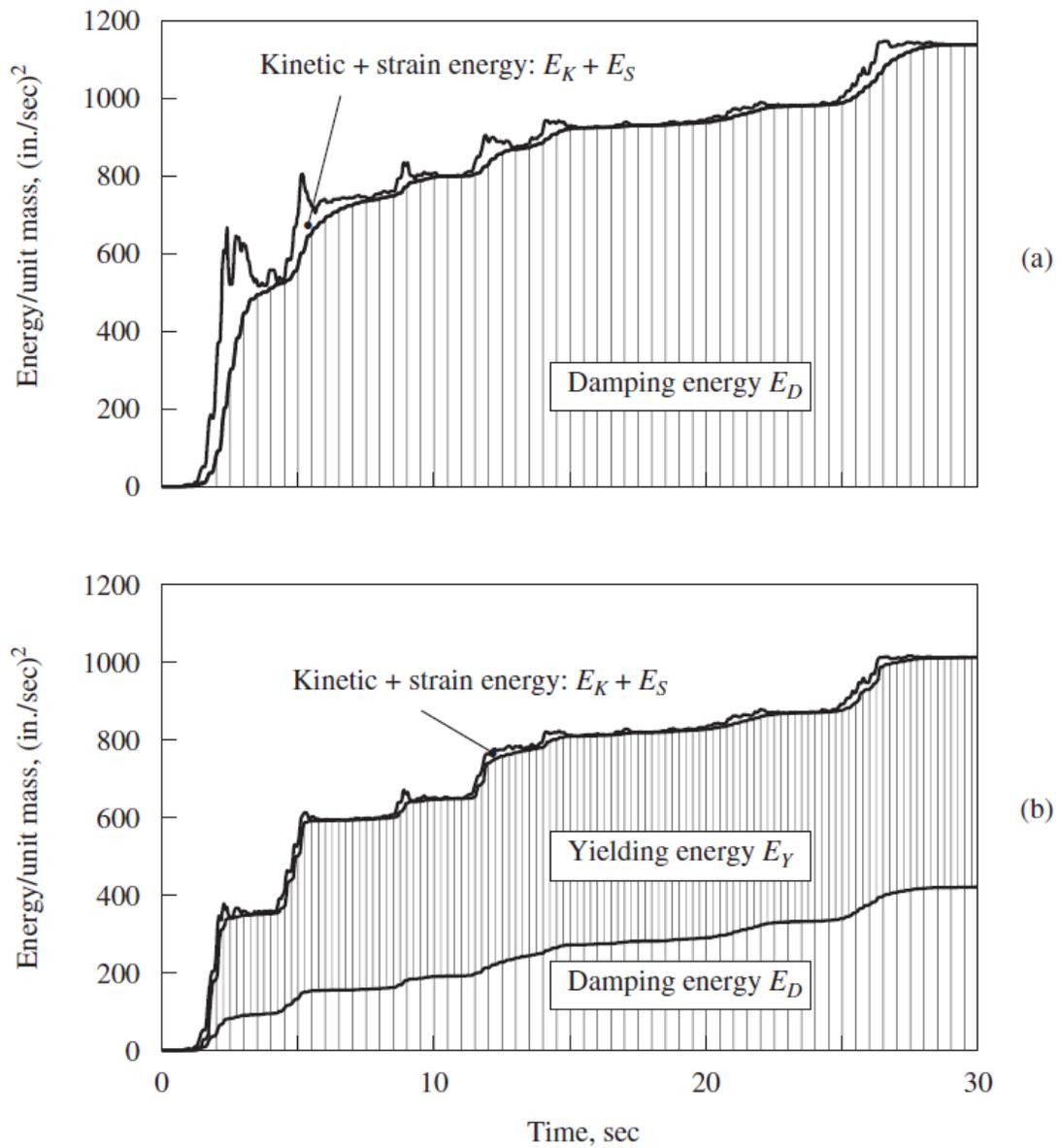


Figura 2.7.4 Gráficos que muestran la variación en el tiempo de la energía cinética+elástica y la disipación de la misma, por medio de la energía amortiguamiento e inelástica. En la figura (a) se muestra un sistema lineal elástico con $T_n = 0.5s$ y $\xi = 5\%$. En la figura (b) se muestra un sistema elastoplástico con $T_n = 0.5s$, $\xi = 5\%$ y $\bar{f}_y = 0.25$. (Chopra 2012)

CAPÍTULO 3: SISTEMAS PASIVOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

3.1. Introducción

Durante muchos años y hasta la actualidad, el diseño de estructuras se ha basado en que hay que dotar a las estructuras de suficientemente rigidez, ductilidad y resistencia; de tal manera que, bajo ciertos niveles de sismos, su comportamiento sea el óptimo y para el caso más extremo, se evite el colapso protegiendo a las personas que alberga en su interior.

Cuando ocurre un terremoto, éste introduce a la edificación una energía que en primer instante se transforma en energía cinética y potencial, pero dado que la estructura posee un amortiguamiento inherente, las oscilaciones se van a ver reducidas hasta el punto en que el movimiento se detiene. Además, si resulta que el sismo es lo suficientemente fuerte, la estructura incursionará en el rango inelástico, lo cual también ayuda a disipar la energía mediante las deformaciones considerables sufridas en sus elementos estructurales durante los ciclos del movimiento. Lo antes mencionado, significa que la edificación ha sufrido daño y en muchos casos ésta puede quedar inútil.

Para prevenir tales daños, existen diferentes sistemas que se incorporan a la estructura para mitigar la energía proveniente del terremoto, los cuales se pueden clasificar como: sistemas de control activo, pasivo o híbrido. De acuerdo con Villarreal y Oviedo (2009), el primero consiste en la participación activa de los dispositivos mecánicos, los cuales tienen propiedades que se van a modificar de acuerdo a la respuesta de la estructura frente al sismo. El segundo engloba los sistemas de disipación de energía y aislación de base. El último consta de la combinación de los dos sistemas previamente mencionados,

manteniendo la seguridad de la estructura a pesar de que pueda presentarse la situación en la que el sistema activo falle.

El presente capítulo tratará los sistemas de protección sísmica pasivos sólo relacionados con los instrumentos para disipar energía, donde los más destacados son: Disipadores de Fricción, de Fluencia de Metales, Viscoelásticos y de Fluido Viscoso.

3.2. Sistema de Protección Sísmica Pasivo con Disipadores de Energía

Según Villaverde (2009); Nitsche (2011); Villarreal y Oviedo (2009), un sistema de protección sísmica pasivo con disipadores de energía consiste en la inclusión a la estructura de dispositivos mecánicos, de carácter reactivo, que modifican las propiedades dinámicas de la estructura. Se fundamentan en la premisa de que el sismo es una carga dinámica, y como tal, se debe aumentar el amortiguamiento mediante de la adición de dispositivos que absorban la energía o la disipen por medio de calor, con la finalidad de que los efectos del terremoto se vean minimizados y tanto los elementos estructurales como no estructurales, se mantengan sin daño. Éstos, a diferencia de los aisladores de base, no limitan la energía entrante y son colocados en posiciones estratégicas dentro de la estructura con el propósito de obtener el mejor desempeño.

3.3. Tipos de Disipadores de Energía

Según Chopra (2012), los dispositivos insertados en la estructura para mitigar el impacto de la energía del sismo pueden llegar a ser rentables en los nuevos diseños y en la protección de estructuras antiguas. Estos deben ser fáciles de reemplazar y se dividen en los siguientes tipos:

3.3.1. Disipador de Fricción

De acuerdo con Villaverde (2009), los disipadores de fricción son aquellos que se encargan de disipar energía mediante el rozamiento y deslizamiento de dos superficies que se encuentran en contacto por presión y que además, poseen un coeficiente de fricción alto. Según Villareal y Oviedo (2009); Bozzo y Barbat (2004), esta clase de disipadores producen curvas histeréticas rectangulares, las cuales indican que, en cada ciclo, la energía disipada es máxima.

Villaverde (2009) indica que en 1977, W.O. Keightley, propuso estos dispositivos para mitigar la amenaza sísmica en edificios. Estaban compuestos por dos placas de acero ranuradas, unidas por medio de pernos con anillos Belleville y lubricadas para evitar el cierre. La fuerza normal era proporcionada por la tensión en los pernos. El proceso de disipación de energía empieza cuando la fuerza proporcionada por el sismo, a lo largo del eje longitudinal del disipador, supera aquella fuerza de fricción entre las dos placas y se produce un movimiento relativo entre las mismas.

En 1993, C.E. Grigorian y sus ayudantes, dieron a conocer otra opción para este tipo de dispositivos, el cual consistía en una conexión ranurada atornillada donde la superficie de deslizamiento ocurría entre una placa de acero sobre una de latón. Esto se basaba en que la fuerza de deslizamiento sobre la interface de acero sobre acero, se degradaba de manera considerable después de unos cuantos ciclos de carga, pero la de acero sobre latón se mantenía prácticamente constante.

La empresa Sumitomo propuso un disipador de fricción que utiliza almohadillas de cobre revestidas con grafito, que se encuentran en contacto

con la envoltura de acero del dispositivo. La fuerza normal de fricción se desarrolla mediante un grupo de cuñas que actúa bajo compresión de resortes. El grafito lubrica la superficie de contacto obteniendo así, una operación silenciosa y manteniendo un valor constante del coeficiente de fricción entre las almohadillas y la superficie interna de la envoltura de acero.

Villaverde (2009) expresa que el amortiguador de fricción propuesto por A. S. Pall (1979) ha sido muy investigado y usado en edificios. Se compone de una serie de placas de acero dulce, y entre ellas, están ubicadas almohadillas revestidas con forro de frenos. Las placas están sujetas mediante pernos de alta resistencia, pero se les permite deslizar bajo cierta carga predeterminada. Su desempeño es independiente de la velocidad, la temperatura y el envejecimiento, lo cual resulta en una ventaja por el hecho de que no necesitan mantenimiento ni ser reemplazadas después de un sismo. Pueden ser instalados en una diagonal simple o en arriostramientos en forma de cruz, incrementando la razón de amortiguamiento crítico hasta un 30%, además ayudan en la reducción de las derivas de piso en un factor de 2-3 y en la reducción moderada de los cortantes de piso.

De acuerdo con Villaverde (2009); Bozzo y Barbat (2004), los disipadores de fricción son una buena forma de reducir la respuesta de la estructura frente a terremotos, minimizando el daño en los elementos estructurales y no estructurales. Los costos iniciales se ven de cierta forma aminorados con la inclusión de estos dispositivos en las nuevas edificaciones y en cuanto al mejoramiento de estructuras existentes, la implementación de éstos resulta más económico que los métodos tradicionales. Pero no todo resulta ser bueno, existen desventajas presentes con estos disipadores y son:

- Las superficies de metal sobre metal aceleran el proceso de corrosión.

- La fuerza normal experimentará cierta relajación por lo que su valor no será constante a lo largo de la vida útil del dispositivo.
- Son efectivos en estructuras flexibles que experimenten grandes deformaciones.
- Encarecen el diseño.
- La selección de la fuerza de deslizamiento es un punto crítico dentro del desempeño de los disipadores de fricción.

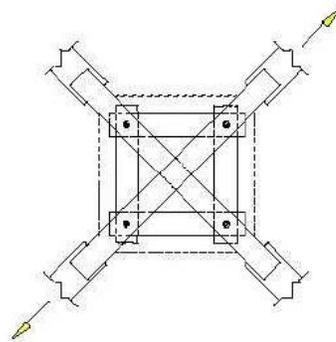


Figura 3.3.1.1 Disipador de fricción instalado en un arriostramiento en forma de cruz. (Villarreal y Oviedo 2009)

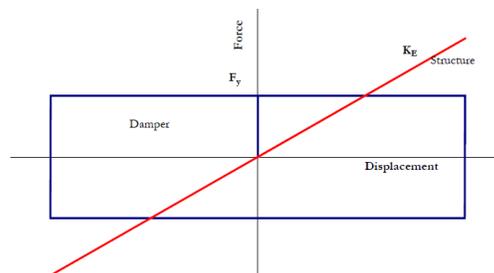


Figura 3.3.1.2 Relación Fuerza-Desplazamiento de un disipador de fricción. (Kelly 2001)

3.3.2. Disipador de Plastificación de Metales

De acuerdo con Villaverde (2009), la idea de usar disipadores de plastificación de metales para mitigar la amenaza sísmica fue propuesta por los investigadores neozelandeses R. Skinner, J. M. Kelly y A. J. Heine en 1973. Éstos se basan en el comportamiento histerético de los metales como un medio para la disipación de energía, usando por lo general el acero dulce. Bozzo y Barbat (2004); Villaverde (2009), indican que estos disipadores son ubicados en sitios estratégicos, por lo general en las diagonales de contraventeo, con lo cual se modifican las características dinámicas del edificio, y a su vez, el desempeño del mismo frente a los terremotos se ve mejorado mediante el incremento de rigidez, resistencia y capacidad de disipar energía. Los disipadores de fluencia de metales muestran un comportamiento estable bajo bastantes ciclos de carga, se muestran pocas variaciones en la resistencia por efecto de la temperatura y el ambiente, además de que se consideran casi inmunes a los efectos del envejecimiento.

VILLAVERDE (2009)

“Bajo sismos moderados (deformaciones pequeñas), un disipador de fluencia de metal actúa como un miembro rigidizador que ayuda a resistir las deformaciones estructurales, mientras que bajo sismos severos (grandes deformaciones), éste actúa como un elemento que absorbe la energía.” (p. 776)

Según Bozzo y Barbat (2004), un sistema muy conocido es el ADAS (Added Damping And Stiffnes) que fue propuesto por Scholl en 1993. Este disipador está constituido por placas metálicas de acero dulce con forma de X conectadas en paralelo y empotradas en sus extremos. Por lo general, se suele ubicar este sistema en la unión de las diagonales de contraventeo, debajo de las vigas de piso. Vale mencionar que la respuesta histerética es muy estable sin degradación considerable después de varios ciclos de carga. Villaverde

(2009) expresa que dichas placas tienen tal forma con el objetivo de que la plastificación se produzca en doble curvatura y esté distribuida de manera uniforme en toda su longitud.

Además del sistema ADAS, está también el sistema conocido como TADAS (Triangular Added Damping And Stiffnes), el cual según Villaverde (2009) consiste de varias placas de acero dulce conectadas en paralelo con forma triangular y que usualmente son instaladas entre los arriostramientos Chevron y las vigas de los pórticos. La base de cada una de estas placas es soldada a una placa rígida de tal forma de que se obtenga un extremo empotrado, mientras que el otro extremo es articulado. Este tipo de disipador se asemeja a una viga en voladizo ya que al momento de resistir la carga lateral impuesta por el sismo, se producirá una deformación con una curvatura simple o uniforme a lo largo de toda la placa.

El sistema de panel, como su nombre lo indica, está conformado por placas de acero que poseen forma de panel. Villaverde (2009) indica que las curvas de histéresis de este tipo de disipador son casi cuadradas, debido a que muestran una capacidad estable de absorción de energía.

Existen también dispositivos de torsión que, según Bozzo y Barbat (2004), tienen la ventaja de plastificar una barra en toda su longitud obteniéndose una disipación de energía óptima.

Otro tipo de disipador de plastificación de metales existente en el medio, es el de pandeo restringido. Villaverde (2009) sostiene que fue desarrollado por la empresa Nippon Steel Corporation en el año 1977 como una solución a los problemas con los contraventeos convencionales. Se componen de un núcleo de acero de sección cruciforme revestido con algún producto (polietileno, grasa

de silicona, entre otros) para prevenir la adherencia, encasillado en perfil hueco rectangular de acero y relleno de hormigón. La ventaja que se obtiene con este tipo de disipadores es que la fluencia se puede producir cuando el elemento se encuentre o en tensión o en compresión.

Como en el caso de los disipadores de fricción, esta clase de dispositivos también poseen desventajas que, de acuerdo con Villaverde (2009) son:

- No son efectivos en estructuras rígidas.
- Complican el diseño, es necesario un análisis no lineal.
- Son capaces de producir movimientos de alta frecuencia debido a un cambio repentino en la rigidez de la estructura una vez que el disipador ha entrado en fluencia.
- Después de un sismo la estructura puede quedar desfasada de su posición inicial.
- Puede ocurrir una falla prematura por fatiga.

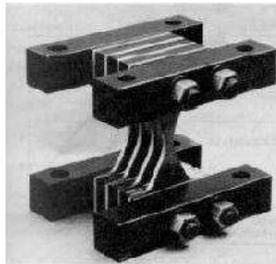


Figura 3.3.2.1 Disipador ADAS. (Villarreal y Oviedo 2009)

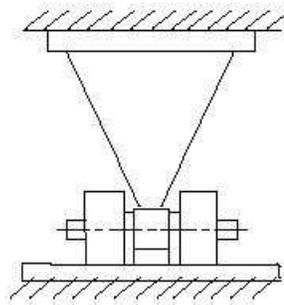


Figura 3.3.2.2 Disipador TADAS. (Villarreal y Oviedo 2009)

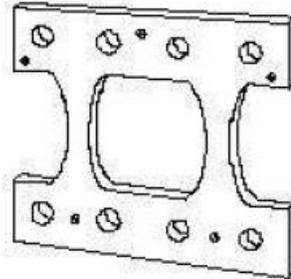


Figura 3.3.2.3 Disipador de Panal (Honeycomb). (Villarreal y Oviedo 2009)

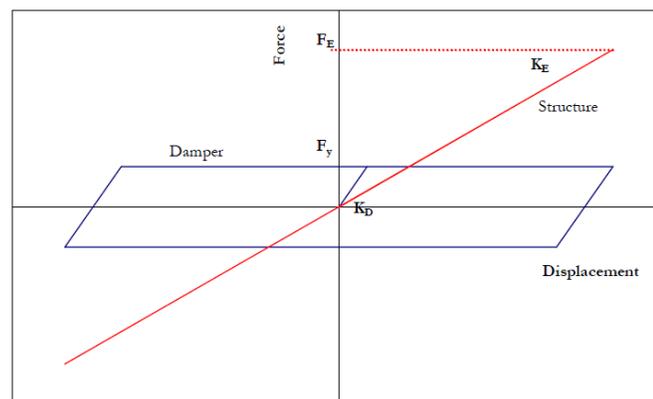


Figura 3.3.2.4 Relación Fuerza-Desplazamiento de los disipadores de plastificación de metal. (Kelly 2001)

3.3.3. Disipador Viscoelástico

Según Villarreal y Oviedo (2009); Kelly (2001); Villaverde (2009), los disipadores viscoelásticos han sido usados con éxito durante los últimos 30 años, en edificaciones de gran altura para control de vibraciones producidas por el viento y, gracias a eso, se ha buscado su aplicación en el campo de la protección sísmica. El más común de estos disipadores está compuesto por 3 placas metálicas (2 extremas y una central) unidas entre sí por medio de un material viscoelástico (polímeros acrílicos). Estos dispositivos tienen la particularidad de disipar energía mediante la deformación por cortante del material viscoelástico y posteriormente, regresar a su posición original con una cantidad de energía elástica y cinética transformada en calor. A diferencia de los disipadores antes mencionados, éste no necesita un nivel de fuerza establecido para empezar a trabajar, por lo que disipa energía a cualquier nivel de excitación.

De acuerdo con Bozzo y Barbat (2004), el ancho de la curva de histéresis define el amortiguamiento equivalente y para reducir las fuerzas sísmicas en la base mediante el aumento del amortiguamiento, se necesitan disipadores con geometrías difíciles de conseguir de manera económica. La característica histerética de mantener una pendiente constante bajo distintos desplazamientos permite plantear un análisis lineal elástico, modificando el amortiguamiento.

Villaverde (2009) expresa que estos disipadores incrementan la rigidez de la estructura y además modifican el periodo natural de la misma, pero a manera de desventaja, las propiedades dependen de la frecuencia, la temperatura del ambiente y de la deformación unitaria de cortante, por lo que el análisis y diseño se complican, además de incrementarse su costo.

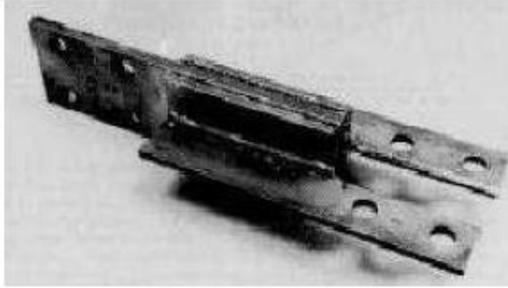


Figura 3.3.3.1 Disipador Viscoelástico. (Villarreal y Oviedo 2009)

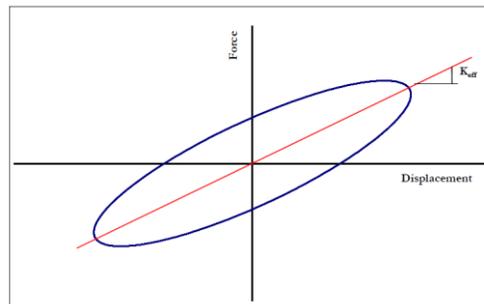


Figura 3.3.3.2 Relación Fuerza-Desplazamiento de un disipador Viscoelástico.
(Kelly 2001)

3.3.4. Disipador Viscoso

Según Villaverde (2009); Villarreal y Oviedo (2009); Kelly (2001); Chopra (2012), los disipadores de fluido viscoso son aquellos en donde la disipación de energía ocurre, cuando dentro de un cilindro cerrado, un pistón obliga a un fluido altamente viscoso a pasar por un orificio pequeño generando fricción entre las paredes del orificio y el fluido. De acuerdo con Taylor citado por Pardo (2007), estos dispositivos se componen de un cilindro resistente de acero inoxidable que en su interior contiene un fluido como las siliconas, debido a que presentan características adecuadas como alta viscosidad, resistentes al fuego, estables frente a los cambios de temperatura y largos periodos de tiempo.

Pardo (2007)

“El cilindro en su interior posee un pistón, que se compone de una vara que en su borde interior tiene una cabeza con orificios. La cabeza del pistón divide el interior del cilindro en 2 cavidades llamadas “cámaras”. Cuando existe un desplazamiento del pistón a altas velocidades dentro del cilindro debido a una excitación, este provoca el paso del fluido de una cámara a otra, lo que produce una presión diferencial y esta a su vez origina la fuerza de amortiguamiento.” (p. 51)

Además de las cámaras previamente mencionadas, Pardo (2007) indica que existe una tercera conocida como la cámara de acumulación, en donde su importancia radica en que permita el desplazamiento de la vara del pistón de tal manera que compense la contracción y expansión térmica del fluido.

La fuerza resistente proporcionada por el disipador viscoso tiene la siguiente expresión:

$$F = c|\dot{x}|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (3.3.4.1)$$

En donde se puede observar que el valor de c se refiere al coeficiente de amortiguamiento; \dot{x} es la velocidad con la que actúa el pistón, sgn es la función signo de la velocidad y α es un parámetro que puede tomar valores entre 0.5 y 2, según Villaverde (2009). Si el valor de α es igual a 1, se considera al dispositivo como un disipador viscoso lineal, lo cual simplifica los cálculos del análisis para encontrar la energía disipada por estos instrumentos.

Villaverde (2009)

“La construcción de disipadores con el exponente α diferente de 2, requiere orificios con forma especial que alcancen diferentes características de flujo. Debido a su gran eficiencia, los amortiguadores con un exponente α igual a 0.5 son útiles en aplicaciones que involucren choques de gran velocidad.” (p. 772)

Una de las ventajas de mayor relevancia al momento de usar este tipo de disipadores en las estructuras es que su funcionamiento depende de la velocidad del movimiento y no del desplazamiento de la estructura. Una columna alcanza su máximo esfuerzo cuando se encuentra en su posición de mayor deflexión con respecto a su posición inicial; en cambio, la máxima fuerza de amortiguamiento se alcanza cuando la velocidad es máxima, siendo el momento en donde ocurren los esfuerzos mínimos en la columna. Lo anterior se resume en que los picos de la velocidad y el desplazamiento no ocurren al mismo tiempo, por lo que se encuentran fuera de fase, dando como resultado que el disipador viscoso, además de aumentar el amortiguamiento, no incrementa los esfuerzos en las columnas ni las derivas.

Villaverde (2009) expresa que estos dispositivos presentan una desventaja que consiste en que no son prácticos en estructuras muy rígidas por el hecho de que la presión, para generar el flujo del fluido, no es lo suficientemente grande bajo desplazamientos pequeños, lo cual tiene como consecuencia una pobre disipación de energía.

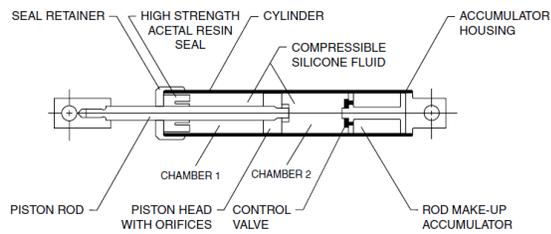


Figura 3.3.4.1 Esquema de un disipador Taylor de fluido viscoso.

(Bozorgnia y Bertero 2004)

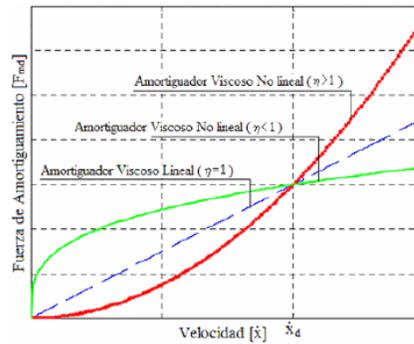


Figura 3.3.4.2 Diagrama Fuerza de amortiguamiento-Velocidad. (Pardo 2007)



Figura 3.3.4.3 Disipadores de fluido viscoso instalados en los arriostramientos diagonales. (Chopra 2012)

Bastantes investigadores se han puesto a desarrollar distintos tipos de disipadores viscosos, los cuales pueden ser: amortiguador viscoso de pared, amortiguador cilíndrico GERB, amortiguador Taylor de fluido viscoso y el amortiguador Jarret con resorte elastómero. El primero de todos fue desarrollado por la empresa Sumitomo y consiste en una pared hueca rellena con un líquido viscoso y mediante un placa de acero, obligada a moverse en su propio plano de manera lateral, corta al fluido favoreciendo la disipación de energía. El amortiguador cilíndrico GERB disipa la energía mecánica en forma de calor por medio de la deformación de un líquido muy viscoso (gel de silicona) y por lo general es usado como un componente de la aislación sísmica. Según Soong y Dargush (1997), gracias a la configuración de simetría axial, el movimiento es permitido por lo que se puede disipar energía en todos los 6 grados de libertad. El disipador Taylor consiste de un envase cilíndrico de acero inoxidable con una subdivisión de cámaras en su interior, en la cual un pistón obliga a pasar un fluido viscoso de una cámara a otra, generándose disipación de energía por medio de la fricción existente entre el fluido y las paredes de los orificios. El disipador Jarret disipa energía por medio del paso de un fluido a través de orificios pero además, implementa un elastómero compresible y presurizado a base de siliconas, lo que le brinda a la estructura rigidez y amortiguamiento.

El presente trabajo está enfocado en el disipador Taylor de fluido viscoso para protección de estructuras de hormigón armado, cimentadas en suelos blandos.

CAPÍTULO 4: TEORÍA Y COMPORTAMIENTO DE LOS DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO

4.1. Introducción

Los disipadores de fluido viscoso, que basan su funcionamiento en el principio de la dinámica de fluidos a través de orificios, fueron implementados en primera instancia en el campo armamentista en Francia (año 1897), como medio de protección de los cañones, según Villaverde (2009). No fue sino hasta años más tarde, en que su aplicación se expandió al campo automovilístico con el fin de encontrar un dispositivo que permitiera a los vehículos, transitar por distintas superficies de pavimentos de manera suave, sin que se produzcan golpes bruscos que pudieran averiar al carro. De acuerdo con Villaverde (2009), con la finalización de la guerra fría, las barreras de seguridad que tenían los gobiernos con respecto a los amortiguadores, debido a su uso dentro del campo militar, fueron eliminadas dándose paso a realizar investigaciones que permitieran aplicar este tipo de tecnología a la protección sísmica de estructuras.

Villaverde (2009) indica que el uso de los disipadores de fluido viscoso para la disipación de energía comenzó a usarse a partir del año 1993, donde se instalaron 186 de estos dispositivos en los apoyos de aislación sísmica del Centro Médico del Condado San Bernardino en California, de tal manera que pudiera reducirse el desplazamiento máximo de los apoyos. También, en México, se instalaron 98 disipadores de fluido visco en las diagonales de contraventeo de un edificio de 57 pisos concluido en el año 2003.

Este disipador se compone de un cilindro de acero inoxidable, el cual en su interior posee una subdivisión de cámaras (Cámara 1, 2 y de acumulación), además tiene un pistón, del mismo material que el cilindro, con una cabeza perforada de bronce que se encarga de forzar al fluido viscoso (generalmente aceite de silicona) a pasar de la cámara 1 a la 2 y viceversa. Villaverde (2009) expresa que el uso del aceite de siliconas resulta apropiado por el hecho de que presenta características adecuadas, como resistencia a altas temperaturas, no se degrada con el tiempo y no es tóxico. El rango de temperaturas en que pueden funcionar estos dispositivos varía entre -40°C y 70°C , gracias a que los orificios de la cabeza del pistón son bimetálicos. La fuerza resistiva que pueda desarrollar el disipador depende de la velocidad del movimiento, lo cual resulta en una ventaja inherente del dispositivo frente a los demás disipadores, por el hecho de que siempre va a estar fuera de fase con los máximos desplazamientos de las columnas, dando como resultado que la máxima fuerza de amortiguamiento se producirá en el instante de menores esfuerzos en las columnas de la edificación y consecuentemente, se puede esperar que los esfuerzos se vean reducidos al igual que las derivas de piso.

Una empresa muy conocida a nivel mundial que se dedica a la manufactura de calidad de estos dispositivos es la empresa TAYLOR DEVICES, la cual viene fabricando sistemas de absorción de energía desde 1955 y que cuenta con una producción total de estos dispositivos igual a 2 millones de unidades. Sus productos son hechos de acero inoxidable y el fluido viscoso que usan es la silicona, además éstos tienen la capacidad de reducir entre 20% y 50% la energía sísmica.

4.2. Energía Disipada por Amortiguamiento

Según Chopra (2012), considerando el estado estable de un sistema de 1 GDL amortiguado sometido a una carga armónica $p(t) = p_0 \sin \omega t$, la energía que se disipa por amortiguamiento en un ciclo de vibración se puede expresar de la siguiente manera:

$$E_D = \int f_D du = \int_0^{2\pi/\omega} c \dot{u}^2 dt = \int_0^{2\pi/\omega} [c \omega u_0 \cos(\omega t - \phi)]^2 dt = 2\pi \xi \frac{\omega}{\omega_0} k u_0^2 \quad (4.2.1)$$

Donde se puede observar que la energía disipada es proporcional al cuadrado del desplazamiento. Se puede obtener una representación gráfica de la energía disipada por amortiguamiento viscoso:

$$\begin{aligned} f_D &= c \dot{u}(t) = c \omega u_0 \cos(\omega t - \phi) \\ f_D &= c \omega \sqrt{u_0^2 - u^2} \sin^2(\omega t - \phi) \\ \left(\frac{f_D}{c \omega} \right)^2 &= u_0^2 - [u(t)]^2 \end{aligned}$$

$$\left(\frac{u(t)}{u_0} \right)^2 + \left(\frac{f_D}{c \omega u_0} \right)^2 = 1 \quad (4.2.2)$$

La ec. (4.2.2) representa la ecuación de una elipse, por lo que la relación $f_D - u$ tiene esta configuración, dando como resultado que el área encerrada por la curva implica la energía disipada por amortiguamiento viscoso.

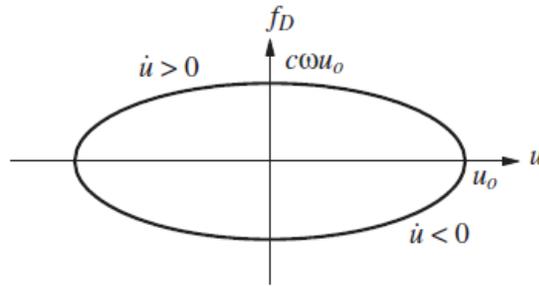


Figura 4.2.1 Curva de histéresis para un disipador de fluido viscoso. (Chopra 2012)

En cambio, la energía que ingresa a la estructura por parte de la fuerza armónica se define como:

$$E_I = \int p(t) du = \int_0^{2\pi/\omega} p(t) \dot{u} dt = \int_0^{2\pi/\omega} [p_0 \sin \omega t][\omega u_0 \cos(\omega t - \phi)] dt = \pi p_0 u_0 \sin \phi \quad (4.2.3)$$

Reescribiendo la ec. (4.2.3) se puede tener otra expresión para energía que entra a la estructura:

$$E_I = 2\pi \xi \frac{\omega}{\omega_0} k u_0^2 \quad (4.2.4)$$

Resulta que la energía disipada es igual a la energía entrante. De acuerdo con Chopra (2012) la energía elástica y cinética serán iguales a 0 por el motivo de que no existen cambios de esas energías durante los ciclos de carga armónica.

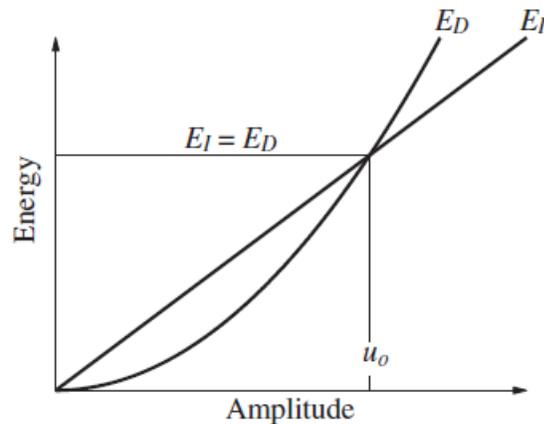


Figura 4.2.2 Energía disipada por amortiguamiento viscoso y energía de entrada. (Chopra 2012)

CHOPRA (2012)

“La energía de entrada varía de manera lineal con el desplazamiento. En cambio, la energía disipada por amortiguamiento viscoso varía con el cuadrado del desplazamiento. Antes de que se alcance el estado estable, la energía de entrada por ciclo es mayor que la energía disipada durante el ciclo, dando lugar a que se produzcan mayores amplitudes del desplazamiento para el siguiente ciclo. Con el crecimiento de los desplazamientos, la energía disipada aumenta más rápido que la energía de entrada hasta un punto en que se cortaran las dos curvas. Tal instante será cuando se alcance la deformación de estado estable.” (p. 100)

4.3. Amortiguamiento Viscoso Efectivo

Las estructuras usan el amortiguamiento viscoso efectivo de tal manera que represente, por facilidad en los cálculos, todos los sistemas de amortiguamiento presentes en las mismas.

Para un sistema de 1GDL que incluye dentro de su configuración a disipadores viscosos lineales se cumple que $\xi_{efectivo} = \xi_{equivalente}$, donde $\xi_{equivalente}$ consiste en el amortiguamiento que se obtiene debido a la inclusión de los disipadores en la estructura y se obtiene midiendo la respuesta de un sistema sometido a una carga armónica que este en resonancia con la estructura ($\omega = \omega_n$). Chopra (2012) indica que la razón de amortiguamiento critico es calculada usando valores medidos de u_0 y $(u_{st})_0$, pero resulta que el método más común de obtener el amortiguamiento efectivo viscoso consiste en igualar la energía disipada por amortiguamiento en un ciclo de vibración de una estructura real a un sistema equivalente viscoso. Para la estructura real, la relación fuerza-desplazamiento es obtenida por ensayos bajo cargas cíclicas con una amplitud de desplazamiento igual a u_0 y la energía disipada es igual al área encerrada por la curva de histéresis.

$$2\pi\xi_{eq} \frac{\omega}{\omega_n} E_{so} = E_D \quad (4.3.1)$$

$$\xi_{eq} = \frac{\omega_n E_D}{2\pi\omega E_{so}} \quad (4.3.2)$$

Donde E_{so} se define como $E_{so} = \frac{1}{2}ku^2_0$, siendo k obtenido a partir de experimentos.

De acuerdo con Chopra (2012), se debe calcular el valor de ξ_{eq} en el instante en que ($\omega = \omega_n$) debido a que la presencia del amortiguamiento es más significativa en tal momento, lo cual modifica la ec. (4.3.2) y se obtiene la siguiente definición para el amortiguamiento equivalente viscoso:

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{2\pi E_{so}} \quad (4.3.3)$$

Vale recordar que este valor está limitado para los sistemas de 1 GDL que se encuentren dentro del rango elástico, que los disipadores tengan un comportamiento lineal y aunque solo fue calculado para el instante en que ($\omega = \omega_n$), este valor puede ser una buen aproximación para momento en que ($\omega \neq \omega_n$).

Para el caso de un sistema con múltiples grados de libertad la razón de amortiguamiento viscoso equivalente, se calcula de la siguiente manera:

$$\xi_{efectivo} = \xi_0 + \xi_{equivalente} \quad (4.3.4)$$

ξ_0 : Consiste en el amortiguamiento propio de la estructura.

$\xi_{equivalente}$: Consiste en el amortiguamiento que se obtiene debido a la inclusión de los disipadores en la estructura.

De acuerdo con FEMA 273, la razón de amortiguamiento equivalente se calcula de la siguiente manera:

$$\xi_{eq} = \frac{\sum W_n}{2\pi W_K} \quad (4.3.5)$$

Donde $\sum W_n = \frac{2\pi^2}{T} \sum_n C_n u_n^2$ que representa la suma de la energía disipada por el n-ésimo disipador instalado en la estructura en un ciclo. C y u_n son el coeficiente de amortiguamiento del disipador y la deformación axial

relativa entre los dos extremos del n-ésimo disipador. W_K es igual a $\sum F_i * \Delta_i$, siendo F_i y Δ_i los cortantes y derivas de piso correspondientes.

HWANG (2002)

“Evidencia experimental ha demostrado que si se incrementa la razón de amortiguamiento, los modos más altos de respuesta serán suprimidos. Como consecuencia, sólo el primer modo de un sistema de múltiples grados de libertad es considerado para el procedimiento simplificado para aplicaciones prácticas. Usando el método de energía de deformación modal, la energía disipada por los amortiguadores y la energía elástica de deformación proporcionada por el pórtico primario pueden ser reescritas:” (p. 6)

$$\sum_n W_n = \frac{2\pi^2}{T} \sum_n C_n \phi_m^2 \cos^2 \theta_n \quad (4.3.6)$$

$$W_K = [\Phi_1^T] [K] [\Phi_1] \quad (4.3.7)$$

$$W_K = \Phi_1^T \omega^2 [m] \Phi_1$$

$$W_K = \sum_i \omega^2 m_i \phi_i^2$$

$$W_K = \frac{4\pi^2}{T^2} \sum_i m_i \phi_i^2 \quad (4.3.8)$$

$[K]$, $[m]$, Φ_1 : son la matriz de rigidez, la matriz de masas y el primer modo de vibración de la estructura respectivamente.

ϕ_m : es el desplazamiento horizontal relativo del n-ésimo disipador correspondiente al primer modo de vibración.

ϕ_i : es el desplazamiento del piso i correspondiente al primer modo de vibración.

m_i : es la masa correspondiente al piso i .

θ_n : el ángulo de inclinación del n-ésimo disipador.

Reemplazando las ecuaciones (4.3.6) y (4.3.8) en la ecuación (4.3.4), se obtiene la razón de amortiguamiento efectivo para un sistema de múltiples grados de libertad que incurse en el rango elástico y que además, posee disipadores viscosos de comportamiento lineal.

$$\xi_{efectivo} = \xi_0 + \frac{T \sum_n C_n \phi_m \cos^2 \theta_n}{\pi \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (4.3.8)$$

Según Hwang (2002), el valor del coeficiente C , al momento de diseñar los disipadores, se debe distribuir de manera equitativa en cada piso. Sin embargo, muchos estudios experimentales han demostrado que la eficiencia de los disipadores en los pisos superiores es menor, en comparación con la de los pisos inferiores. Por lo que, para obtener una distribución más eficiente de los valores de C , se puede realizar mediante la calibración de las fuerzas horizontales del disipador en proporción a los cortantes de piso.

De acuerdo con Hwang (2002), para el caso en que el disipador viscoso tenga un comportamiento no lineal, la razón de amortiguamiento crítico efectiva para sistemas de 1GDL actuando dentro del rango elástico, se puede llegar a obtener mediante el siguiente procedimiento:

$$F_D = C\dot{u}^\alpha \quad (4.3.9)$$

$$\dot{u} = \omega u_0 \sin \omega t \quad (4.3.10)$$

$$W_D = \int_0^{2\pi/\omega} F_D \dot{u} dt = C(\omega u_0)^{1+\alpha} \int_0^{2\pi/\omega} |\sin^{1+\alpha} \omega t| dt \quad (4.3.11)$$

La ec. (4.3.11) puede ser reescrita si se dice que $\omega t = 2\theta$, $dt = \frac{2}{\omega} d\theta$

$$W_D = 2^{2+\alpha} C \omega^\alpha u_0^{1+\alpha} \frac{\Gamma^2\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)}{\Gamma(2 + \alpha)} \quad (4.3.12)$$

Γ : es la función gama

$$\xi_{efectivo} = \frac{\lambda C \omega^{\alpha-2} u^{\alpha-1}_0}{2\pi m} \quad (4.3.13)$$

$$\lambda = 2^{2+\alpha} \frac{\Gamma^2\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)}{\Gamma(2 + \alpha)} \quad (4.3.14)$$

EXPONENTE "η"	PARÁMETRO "λ"
0.25	3.7
0.50	3.5
0.75	3.3
1.00	3.1
1.25	3.0
1.50	2.9
1.75	2.8
2.00	2.7

Fuente: FEMA 274.

Tabla 4.3.1 Valores del exponente de la velocidad del disipador y sus correspondientes valores de λ . (Pardo 2007)

Si se trata de un sistema con múltiples grados de libertad, la razón de amortiguamiento efectivo se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$\xi_{eq} = \frac{\sum \lambda C_n u_m^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_n}{2\pi \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i u_i^2} \quad (4.3.15)$$

$$u_i = A \phi_i \quad (4.3.16)$$

$$\xi_{efectivo} = \xi_0 + \frac{\sum_n \lambda C_n \phi^{1+\alpha} \cos^{1+\alpha} \theta_n}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2} \quad (4.3.17)$$

Donde A es la amplitud y ϕ_i es el primer desplazamiento modal del i -ésimo grado de libertad.

4.4. Principios Básicos de la Dinámica de Fluidos

4.4.1. Las leyes de Equilibrio

Según Soong y Dargush (1997), se considera un flujo isotérmico de un fluido en términos de la densidad (ρ), vector de velocidad (v_i) y tensor de esfuerzos (σ_{ij}) en cada punto fijo x_i en el espacio para cada tiempo (t). Mediante este criterio se pueden formular las ecuaciones diferenciales gobernantes:

$$\dot{\rho} + v_j \rho_{,j} + \rho v_{j,j} = 0 \quad (4.4.1.1)$$

$$\rho \dot{v}_i + \rho v_j v_{i,j} - \sigma_{ij,j} = 0 \quad (4.4.1.2)$$

La ec. (4.4.1.1) representa la conservación de la masa y la ec. (4.4.1.2) representa la conservación del momentum. Los puntos sobre las letras indican una derivada parcial con respecto al tiempo, los índices a la derecha de la coma indican derivadas parciales con respecto a una coordenada espacial e índices repetidos indican suma.

SOONG Y DARGUSH (1997)

“En un espacio tridimensional, el campo general de flujo está determinado por 13 incógnitas (ρ, v_i, σ_{ij}). Las ec. (4.4.11) y (4.4.1.2) representan un conjunto de 4 ecuaciones diferenciales parciales. La conservación angular del momentum proporciona 3 ecuaciones adicionales que reducen a la exigencia de simetría tensor de esfuerzos ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$). Por lo tanto, seis relaciones adicionales deben ser planteadas para cerrar este sistema.” (p. 175)

Para el caso de disipadores que estén sometidos a variaciones importantes de temperatura durante su funcionamiento, el flujo se convierte en no-isotérmico y se deben prestar consideraciones a la conservación de la masa, de acuerdo con Soong y Dargush (1997).

4.4.2. Fluido Newtoniano

Un fluido Newtoniano es aquel que posee viscosidad que es constante en el tiempo. El tensor de esfuerzos puede ser expresado en términos de la presión más un tensor de esfuerzos del fluido (τ_{ij}) que es función del campo de deformaciones, según Soong y Dargush (1997):

$$\sigma_{ij} = -\delta_{ij}p + \tau_{ij} \quad (4.4.3.1)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(v_{i,j} + v_{j,i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} v_{k,k} \right) \quad (4.4.3.2)$$

La ec. (4.4.3.2) se simplifica si el fluido resulta ser incompresible llegándose a obtener la siguiente expresión:

$$\tau_{ij} = \mu (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (4.4.3.3)$$

Reemplazando las ecuaciones (4.4.3.1) y (4.4.3.2) en la ec. (4.4.1.2) se obtiene la ecuación de Navier-Stokes que rige el comportamiento de un fluido viscoso e incompresible:

$$\rho \dot{v}_i + \rho v_j v_{i,j} - \mu w_{i,jj} + p_{,i} = 0 \quad (4.4.3.4)$$

Como siguiente paso, se considera la respuesta del fluido expuesto a una sollicitación armónica infinitesimal:

$$v_i = \bar{v}_i \exp(i\omega t) \quad (4.4.3.5)$$

Donde (\bar{v}_i) y (ω) representa la amplitud de la velocidad y la frecuencia angular, respectivamente.

De acuerdo con Soong y Dargush (1997), el término no lineal convectivo de la ec. (4.4.3.4) se puede llegar a despreciar dando lugar a una ecuación en función de la amplitud de la velocidad y de la presión:

$$i\omega \rho \bar{v}_i - \mu \bar{v}_{i,jj} + \bar{p}_{,i} = 0 \quad (4.4.3.6)$$

SOONG y DARGUSH (1997)

“Para pequeñas frecuencias, el término restante inercial es también despreciado. Lo que da lugar a una respuesta cuasi-estática con el equilibrio satisfecho en cada instante de tiempo (t). Uno puede darse cuenta que la respuesta cuasi-estática es independiente de la frecuencia como consecuencia de haber adoptado el modelo clásico de Newton.” (p. 177)

El módulo complejo de corte para un fluido Newtoniano se define como:

$$G^*(\omega) = i\omega\mu \quad (4.4.3.7)$$

$$G' = 0 \quad (4.4.3.8)$$

$$G'' = \omega\mu \quad (4.4.3.9)$$

G' y G'' se conocen como el módulo de almacenamiento de corte y módulo de pérdida de cortante respectivamente.

4.4.3. Fluido No-Newtoniano

Según Soong y Dargush (1997), este es un fluido que presenta una viscosidad dependiente de la frecuencia de la excitación y son los utilizados en los sistemas de protección sísmica. De acuerdo con Makris y Constantinou (1993), citado por Soong y Dargush (1997), la modelación del comportamiento de este tipo de fluidos es complicada y lo que se hace es basarse en el modelo de Maxwell con derivadas fraccionales y derivadas de orden complejo. En algunos casos basta asumir que el fluido será Newtoniano durante la frecuencia de interés.

4.5. Disipadores Viscosos de orificios

Soong y Dargush (1997) indican que los disipadores viscosos de orificios resultan tener mayor capacidad de disipación de energía que los disipadores de pared y el GERB, debido a la configuración interna que poseen, quedando definido que su respuesta fuerza-desplazamiento va a depender de la geometría de lo antes mencionado y del tipo de fluido viscoso que se utilice.

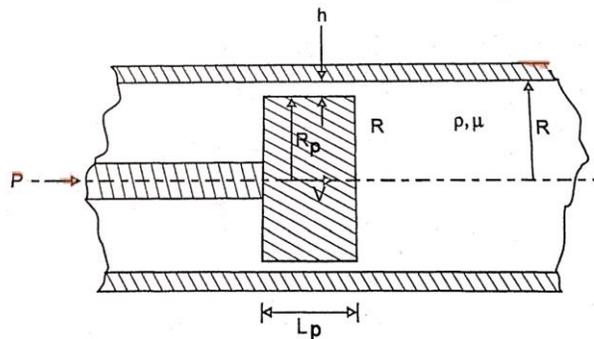


Figura 4.5.1 Esquema hipotético de un disipador de fluido viscoso de orificios.

(Soong y Dargush 1997)

El problema se puede minimizar si sólo se considera el espacio que delimita h siendo h mucho menor a R , lo que da lugar a un flujo planar uniaxial. Con lo antes dicho la ec. (4.4.3.4) se ve modificada a:

$$\rho \dot{v} + \rho v v_{,z} - \mu v_{,rr} - \mu v_{,zz} + p_{,z} = 0 \quad (4.5.1)$$

Donde v es la velocidad del flujo en la zona ubicada entre el borde de la cabeza pistón y el lado interno de la pared del disipador.

Soong y Dargush (1997) consideran 2 casos:

1. Un fluido de baja viscosidad con h más o menos grande y con una distancia L_p pequeña o un flujo de alta velocidad. Basándose en esas condiciones, la ec. (4.5.1) obtiene la siguiente forma:

$$\rho \dot{v} + \rho v v_{,z} = -p_{,z} \quad (4.5.2)$$

Si se presentan frecuencias bajas, el término dependiente del tiempo se vuelve despreciable

$$\rho v v_{,z} = -p_{,z} \quad (4.5.3)$$

Ahora, integrando a ambos lados a lo largo de L_p :

$$\Delta p = -\frac{\rho v_1^2}{2} \quad (4.5.4)$$

Δp y v representan respectivamente la variación de presión a través de la cabeza del pistón y la velocidad de salida. La velocidad de entrada se ha asumido igual a 0. Aplicando el criterio de la conservación de la masa se obtiene una ecuación que la relaciona de la fuerza del disipador y la velocidad:

$$P_I = C_I V^2 \quad (4.5.5)$$

$$C_I = \frac{\pi}{8} \rho R_p^2 \left(\frac{R_p}{h} \right)^2 \quad (4.5.6)$$

Para esta situación no existe la disipación de energía por lo que resulta inadecuado su implementación en las estructuras.

2. Un fluido de alta viscosidad, h pequeño y valores grandes de L_p o bajas velocidades de flujo. Con estas condiciones, la ec. (4.5.1) se reduce a la siguiente expresión:

$$\mu v_{,rr} = p_{,z} \quad (4.5.7)$$

Usando el criterio de la conservación de la masa y aplicando condiciones de borde de no-desplazamiento, la respuesta de un disipador viscoso lineal queda definido como:

$$P_V = C_V V \quad (4.5.8)$$

$$C_V = 3\pi\mu L_p \left(\frac{R_p}{h} \right)^3 \quad (4.5.9)$$

Según Constantinou et. al. (1993), citado por Soong y Dargush (1997), para el caso de un disipador Taylor, el fluido que se utiliza es aceite de silicona, el cual fluye por pasajes especialmente diseñados dentro y alrededor de la cabeza del pistón, dando como resultado una respuesta, por parte del disipador, dependiente de la velocidad elevada a una potencia:

$$P \propto \text{sgn}(\dot{x}) |\dot{x}|^\alpha \quad (4.5.10)$$

Siendo $\alpha = 1$ en la mayoría de las aplicaciones de protección sísmica, lo cual permite obtener una respuesta lineal por parte del disipador viscoso. Para

este disipador en especial, la dependencia de la temperatura no es tan significativa, por lo que se puede aplicar un modelo clásico de Maxwell para capturar la dependencia de la frecuencia a lo largo del rango de frecuencias de interés.

$$P(t) + \lambda \frac{dP(t)}{dt} = C_0 \frac{dx(t)}{dt} \quad (4.5.11)$$

λ y C_0 son parámetros reales que representan respectivamente el tiempo de relajación y el coeficiente de amortiguamiento a la frecuencia cero.

SOONG y DARGUSH (1997)

“Comparaciones del modelo con la rigidez almacenada, el coeficiente de amortiguamiento y el ángulo de fase experimentalmente determinados se muestran en la Fig. 4.5.3. El tiempo de relajación $\lambda = 0.006 \text{seg}$ es pequeño. Esto indica que por debajo de una frecuencia igual a 4Hz, se puede simplificar el segundo término de la izquierda de la ec. (4.5.11). Uno obtiene un modelo del disipador puramente viscoso y lineal.” (p. 193)

$$P(t) = C_0 \frac{dx(t)}{dt} \quad (4.5.12)$$

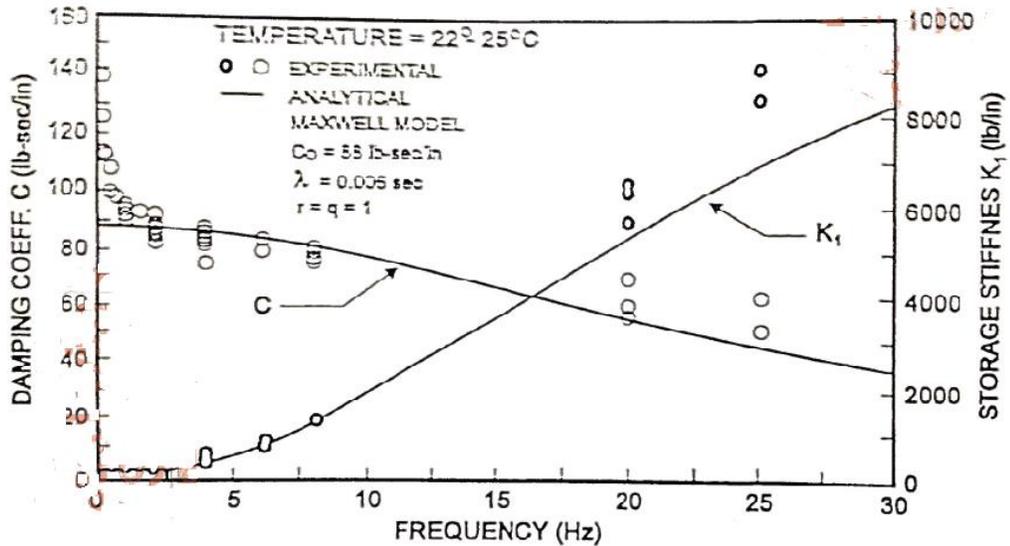


Figura 4.5.3 Respuesta de un disipador de fluido viscoso de orificios. (Soong y Dargush 1997)

4.6. Análisis Estructural incluyendo Disipadores de Fluido Viscoso

4.6.1. Sistemas de 1 GDL

Según Villaverde (2009), la ecuación de movimiento que rige para sistemas de 1 GDL que tienen instalados disipadores de fluido viscoso y están sometidos a una excitación basal, tiene la siguiente expresión:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + \text{sgn}[\dot{u}(t)]c_d|\dot{u}(t)|^\alpha \cos^{\alpha+1} \theta + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (4.6.1.1)$$

Se trata de una ecuación diferencial no lineal por lo que para ser resuelta es necesario la utilización de la integración numérica paso a paso, la cual

permite discretizar la ecuación mediante selección del intervalo de tiempo Δt . Para el instante de tiempo $t_{i+1} = (i+1)\Delta t$, la ec. (4.6.1.1) adquiere la forma a continuación:

$$m\ddot{u}_{i+1} + c\dot{u}_{i+1} + ku_{i+1} = -m(\ddot{u}_g)_{i+1} - \text{sgn}(\dot{u}_{i+1})c_d|\dot{u}_{i+1}|^\alpha \cos^{\alpha+1} \theta \quad (4.6.1.2)$$

4.6.2. Sistemas de Múltiples Grados de Libertad

De acuerdo con Villaverde (2009), un sistema lineal de varios pisos con disipadores viscosos incluidos y sometidos a una excitación basal, tiene la siguiente expresión:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} + [I_d]\{F_a(t)\} = -[M][J]\ddot{u}_g(t) \quad (4.6.2.1)$$

Donde $[M]$, $[C]$, $[K]$ son las matrices de masa, de amortiguamiento y de rigidez respectivamente. $[J]$ es un vector de influencia que contiene los desplazamientos en el sistema cuando éste es sometido a un desplazamiento unitario estático en la base. $[I_d]$ y $\{F_a(t)\}$ son definidos a continuación:

$$[I_d] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6.2.2)$$

$$\{F_a(t)\} = \begin{bmatrix} F_{d1}(t)\cos\theta_1 \\ F_{d2}(t)\cos\theta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ F_{dp}(t)\cos\theta_p \end{bmatrix} \quad (4.6.2.3)$$

$$F_{dn} = c_{dn} [|\dot{u}_n(t) - \dot{u}_{n-1}(t)| \cos\theta_n]^{\alpha_n} \operatorname{sgn}[\dot{u}_n(t) - \dot{u}_{n-1}(t)] \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4.6.2.4)$$

$$\{F_a(t)\} = \left\{ \begin{array}{l} c_{d1} |\dot{u}_1(t)|^{\alpha_1} \cos^{\alpha_1+1} \theta_1 \operatorname{sgn}[\dot{u}_1(t)] \\ c_{d2} |\dot{u}_2(t) - \dot{u}_1(t)|^{\alpha_2} \cos^{\alpha_2+1} \theta_2 \operatorname{sgn}[\dot{u}_2(t) - \dot{u}_1(t)] \\ \cdot \\ \cdot \\ c_{dn} |\dot{u}_n(t) - \dot{u}_{n-1}(t)|^{\alpha_n} \cos^{\alpha_n+1} \theta_n \operatorname{sgn}[\dot{u}_n(t) - \dot{u}_{n-1}(t)] \end{array} \right\} \quad (4.6.2.5)$$

Para resolver la ec. (4.6.2.1) es necesario la utilización de la integración numérica paso a paso, la cual permite discretizar la ecuación mediante selección del intervalo de tiempo Δt . Para el instante de tiempo $t_{i+1} = (i+1)\Delta t$, la ec. (4.6.1.1) adquiere la forma a continuación:

$$[M]\{\ddot{u}\}_{i+1} + [C]\{\dot{u}\}_{i+1} + [K]\{u\}_{i+1} = -[M]\{J\}(\ddot{u}_g)_{i+1} - [I_d]\{F_a\}_{i+1} \quad (4.6.2.6)$$

$$\{F_a(t)\} = \left\{ \begin{array}{l} c_{d1} |\dot{u}_1|_{i+1}^{\alpha_1} \cos^{\alpha_1+1} \theta_1 \operatorname{sgn}(\dot{u}_1)_{i+1} \\ c_{d2} |\dot{u}_2 - \dot{u}_1|_{i+1}^{\alpha_2} \cos^{\alpha_2+1} \theta_2 \operatorname{sgn}(\dot{u}_2 - \dot{u}_1)_{i+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ c_{dn} |\dot{u}_n - \dot{u}_{n-1}|_{i+1}^{\alpha_n} \cos^{\alpha_n+1} \theta_n \operatorname{sgn}(\dot{u}_n - \dot{u}_{n-1})_{i+1} \end{array} \right\} \quad (4.6.2.7)$$

4.7. Diagrama de Flujo para Control de la Respuesta del Sistema

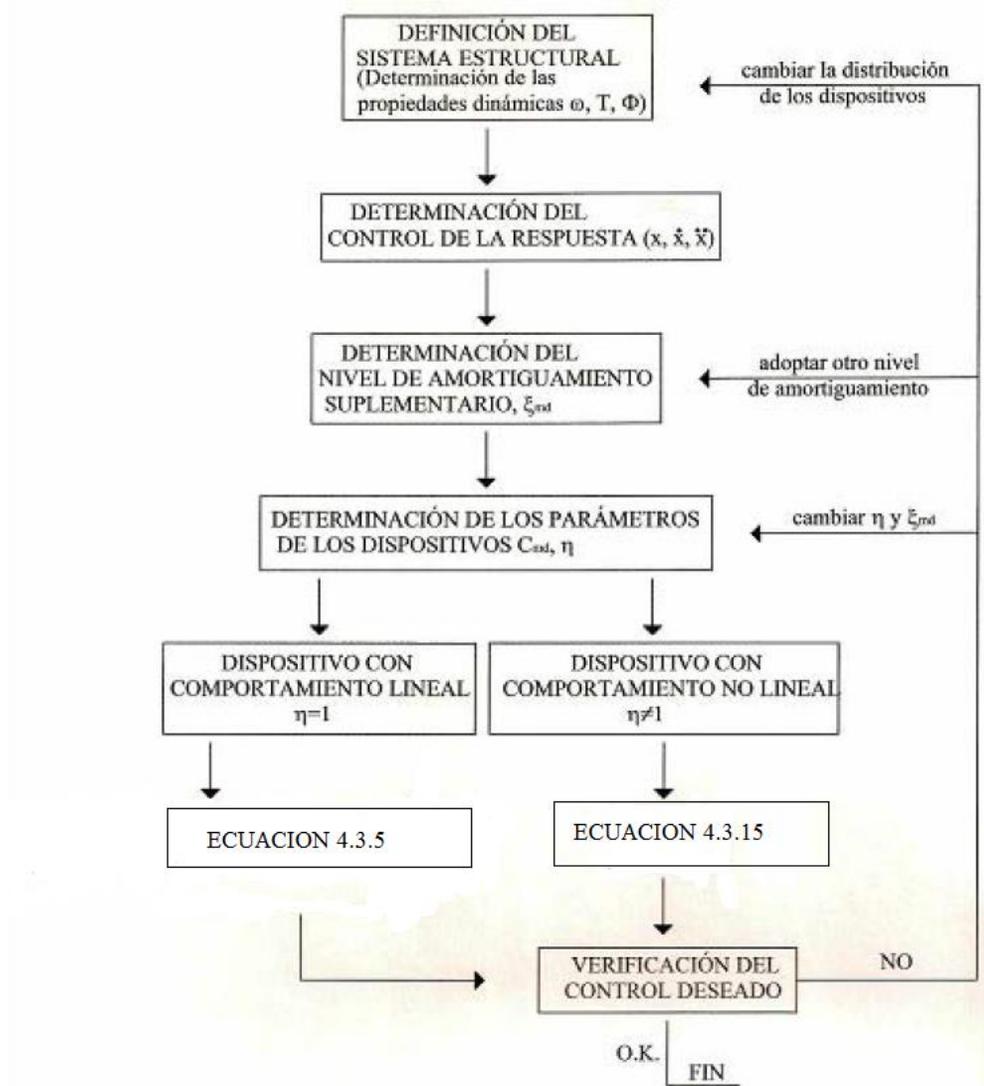


Figura 4.7.1 Diagrama de flujo para el diseño. (Pardo 2007)

4.8. Ejemplo de Aplicación

4.8.1. Generalidades

A continuación se presenta un ejemplo que permite visualizar el efecto de la incorporación de disipadores de fluido viscoso en un modelo estructural. El sistema principal consiste en un pórtico de un nivel con una luz $B=6\text{m}$ y una altura $H=3\text{m}$ tal como se ilustra en la Figura 4.8.1.1., el cual se idealiza como un sistema de 1GDL con su masa concentrada en la parte superior del mismo, la rigidez se obtiene a partir de las columnas asumiendo que el elemento estructural horizontal es infinitamente rígido, además se considera una respuesta no lineal del sistema utilizando un elasto-plástico perfecto de fuerza-desplazamiento. La fuerza de cedencia del sistema se halla de acuerdo a los resultados obtenidos mediante un análisis simple del pórtico estudiado de donde $P_y = \frac{4M_y}{H}$, siendo M_y el momento de fluencia obtenido de las columnas a partir del diagrama momento-curvatura de su sección y cuyo valor es $M_y = 4.54\text{Ton} - \text{m}$ considerando una idealización bilineal de la curva como se muestra en la Figura 4.8.1.2., por lo tanto, el valor de la fuerza de cedencia es $P_y = 6.05\text{Ton}$.

Posteriormente el pórtico será reforzado mediante la incorporación de disipadores de fluido viscoso tipo Taylor.

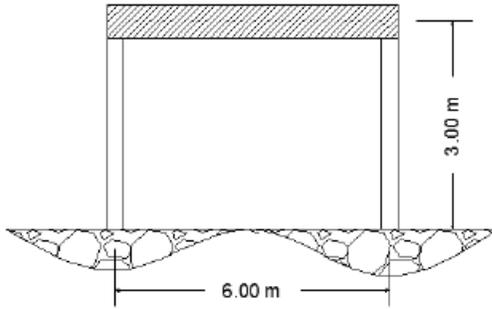


Figura 4.8.1.1 Pórtico considerado en el ejercicio de aplicación.

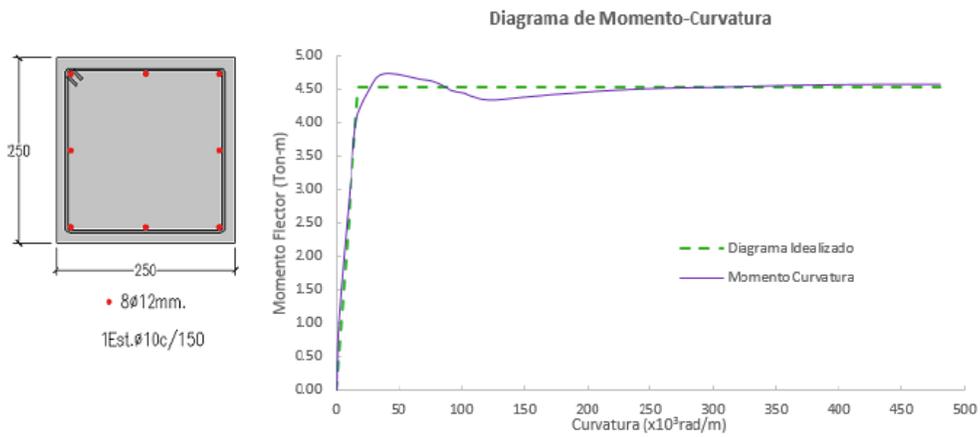


Figura 4.8.1.2 Sección transversal de la columna y Diagrama Momento-Curvatura.

Las características del pórtico y el dissipador son las siguientes:

Pórtico

Carga:

q= 4 Ton/m

Carga Uniformemente Distribuida

P= 24 Ton

Peso Total del Sistema (P=q*B)

Propiedades de las columnas:

b= 25cm

Dimensión de la Sección Transversal (Columna Cuadrada)

I= 32552,08 cm⁴

Inercia de la Sección ($I = \frac{bh^3}{12}$)

E= 250000 kg/cm²

Módulo Elástico del Hormigón que conforma las Columnas

Propiedades Dinámicas del Sistema:

m= 2.45 Ton*s²/m

Masa del Sistema (m=P/g)

k= 723.38 Ton/m

Rigidez del Sistema ($k = 2 * \frac{12EI}{h^3}$)

c= 4.21 Ton*s/m

Amortiguamiento Viscoso del Sistema ($\xi=0.05$) ($c = 2\xi * \sqrt{km}$)

ω_n = 17.20 rad/s

Frecuencia Natural del Sistema ($\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$)

T_n= 0.3654 s

Periodo Natural del Sistema ($T_n = \frac{2\pi}{\omega_n}$)

P_y= 6.05 Ton

Carga de Cedencia del Sistema

Disipador de Fluido Viscoso (Tipo Taylor)

Propiedades del Arriostramiento:

$$\theta = 0.464 \text{ rad} \quad \text{Ángulo de Inclinación del disipador } \left(\theta = \tan^{-1} \left(\frac{H}{B} \right) \right)$$

Propiedades del Disipador:

$$\xi = 20\% \quad \text{Razón de Amortiguamiento Crítico del Disipador}$$

$$c_d = 16.83 \text{ Ton}^* \text{s/m} \quad \text{Amortiguamiento del Disipador}$$

$$\alpha = 1 \quad \text{Exponente de la Velocidad}$$

El ejercicio de aplicación consiste en el análisis dinámico del sistema sometido a una excitación externa correspondiente a la componente Norte-Sur del sismo de Imperial Valley, registro de El Centro, 1940. La respuesta se obtiene utilizando el método de la diferencia central. El proceso a seguir es el siguiente:

1. Se analiza el modelo estructural sin la aplicación de los disipadores.
2. Se hace un nuevo análisis de la respuesta del sistema con los disipadores.
3. Se presentan los resultados de las respuestas en cada caso.
4. Se establecen comparaciones entre las dos respuestas.

4.8.2. Método de la Diferencia Central

Este método se basa en la aproximación de diferencias alrededor del punto evaluado de las derivadas del desplazamiento con respecto al tiempo utilizando la notación de la serie de Taylor. Estableciendo una variación de

tiempo (Δt) constante se puede expresar las velocidades y aceleraciones \dot{u}_i , \ddot{u}_i en el paso i del análisis de esta manera:

$$\dot{u}_i = \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t} \quad (4.8.2.1)$$

$$\ddot{u}_i = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{(\Delta t)^2} \quad (4.8.2.2)$$

Si se reemplazan las expresiones previamente determinadas en la ecuación general de movimiento, se puede despejar u_{i+1} que es la única variable desconocida, ya que se supone que los valores de desplazamiento u_i y u_{i-1} se obtuvieron en pasos anteriores, de esta manera se puede obtener la respuesta de cualquier sistema no lineal, además, es posible considerar el efecto de dispositivos disipadores de energía simplemente reemplazando las expresiones y despejando u_{i+1} . Para el caso general de un sistema no lineal con una fuerza elástica-inelástica (f_s), la expresión para determinar la respuesta queda definida a continuación:

$$\hat{k}u_{i+1} = \hat{p}_i \quad (4.8.2.3)$$

Donde:

$$\hat{k} = \frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t} \quad (4.8.2.4)$$

$$\hat{p}_i = p_i - \left[\frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t} \right] u_{i-1} + \frac{2m}{(\Delta t)^2} u_i - f_{si} \quad (4.8.2.5)$$

En el caso particular del método de la diferencia central se especifica que el requerimiento para lograr que el método sea estable y brinde resultados confiables es utilizar un salto de tiempo Δt lo suficientemente pequeño para satisfacer la siguiente desigualdad:

$$\Delta t < \frac{T_n}{\pi} \quad (4.8.2.6)$$

4.8.3. Respuesta del Sistema Sin Disipador

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el análisis del modelo estructural sin disipadores. Se elaboró una hoja de cálculo para el efecto. Se presentan gráficas que describen la respuesta del sistema de desplazamiento, velocidad y aceleración en el tiempo, también la relación fuerza-desplazamiento de cada componente dinámico del sistema y finalmente se presentan diagramas que representan la respuesta del sistema desde el punto de vista energético.

Parámetro	Sin Disipadores
Desplazamiento Máximo	2,86 cm
Velocidad Máxima	25,58 cm/s
Aceleración Máxima	4,56 m/s ²
Deformación Permanente	1,99 cm
E_ymax	0,5553 Ton-m
EDV_{max}	-
EY/EI	54,54%
EDV/EI	-

Tabla 4.8.3.1 Resumen de Resultados del Sistema sin Disipador.

Se puede observar que un 54.54% de la energía que ingresó al sistema, producto del sismo, es disipada por el comportamiento inelástico de la estructura, lo cual deja a la misma con una deformación permanente de 1.99 cm al final de la excitación.

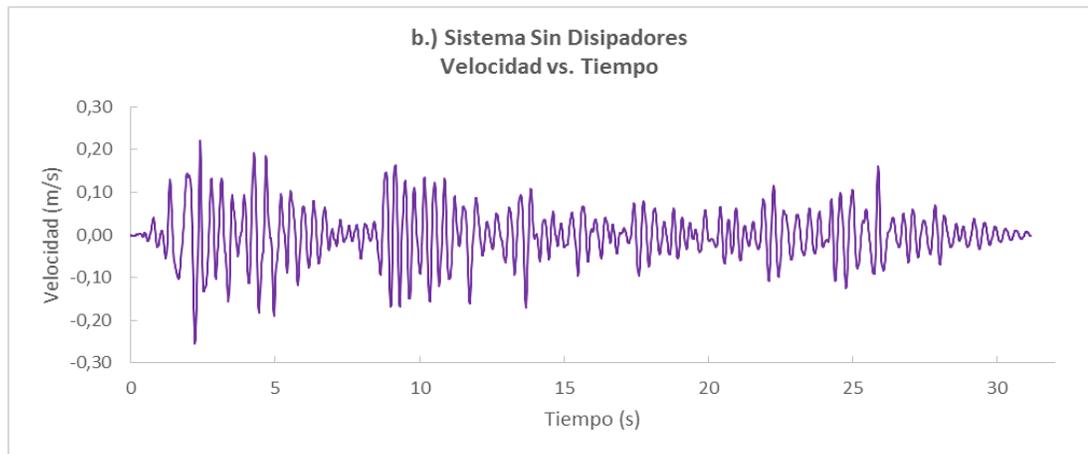


Figura 4.8.3.1 Respuesta del Sistema Sin Disipador a.) Desplazamiento vs. Tiempo, b.) Velocidad vs. Tiempo y c.) Aceleración vs. Tiempo.

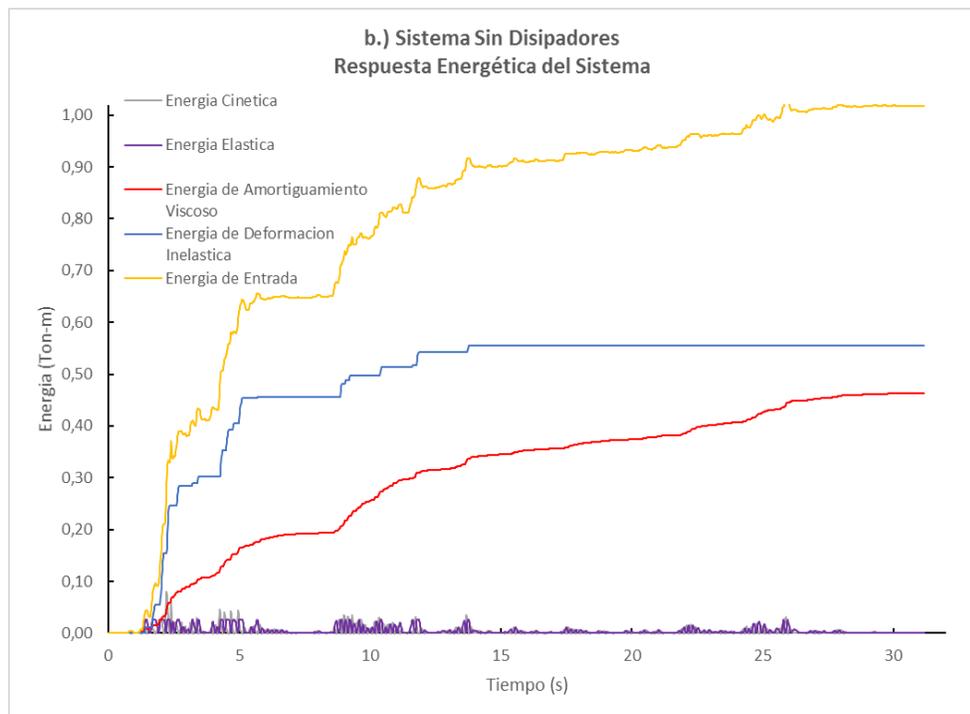
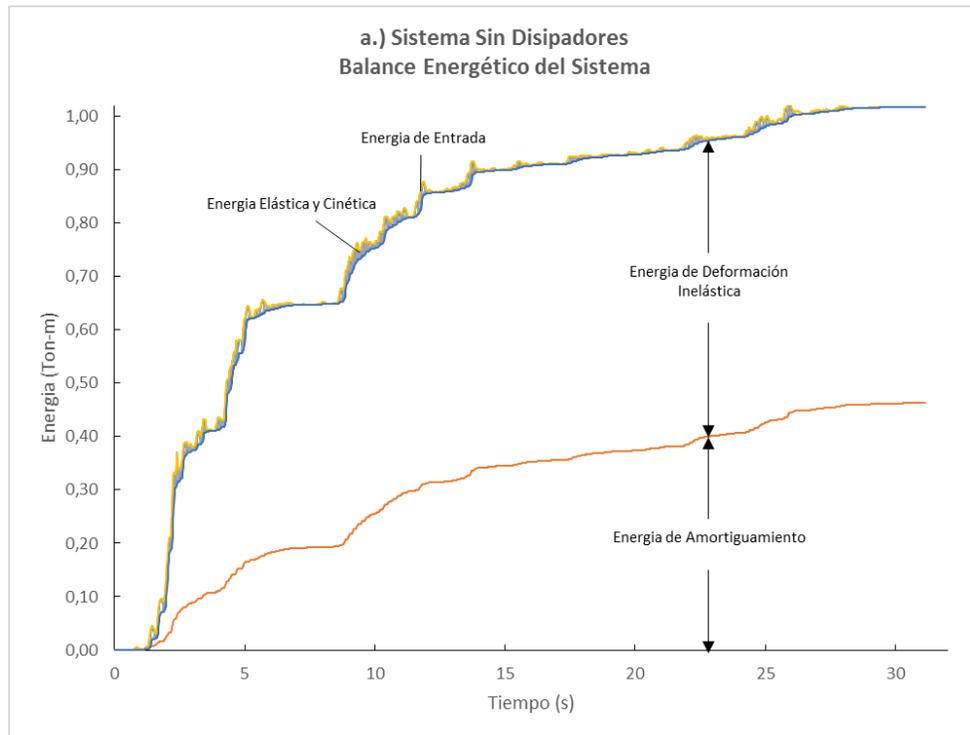


Figura 4.8.3.2 Sistema Sin Disipador a.) Balance Energético y b.) Respuesta Energética del Sistema.

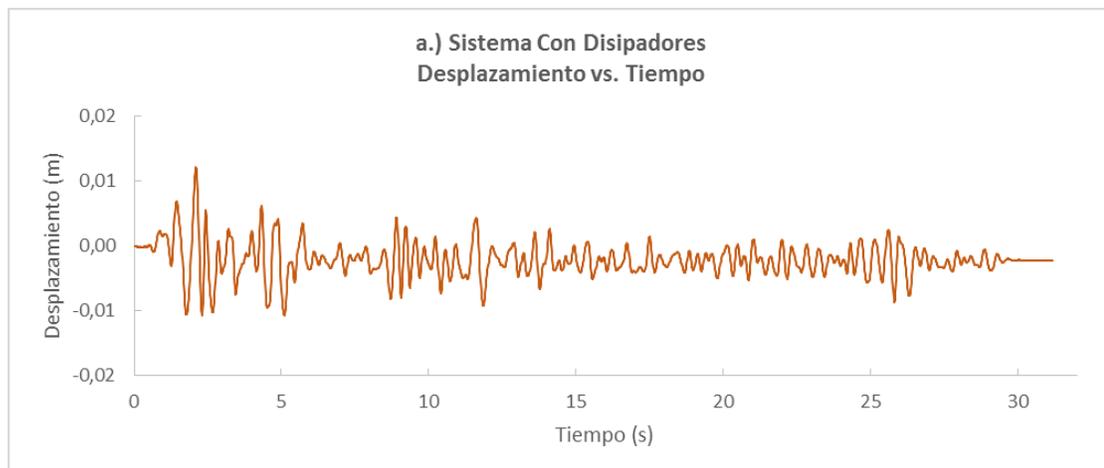
4.8.4. Respuesta del Sistema Con Disipador

A continuación se presenta la tabla que incluye los resultados para el sistema con un disipador de fluido viscoso. Además, posteriormente se presentan las gráficas correspondientes.

Parámetro	Con Disipadores
Desplazamiento Máximo	1,21 cm
Velocidad Máxima	19,11 cm/s
Aceleración Máxima	5,72 m/s ²
Deformación Permanente	0,24 cm
$E_{y_{max}}$	0,0881 Ton-m
EDV_{max}	0,6101 Ton-m
EY/EI	10,14%
EDV/EI	70,23%

Tabla 4.8.4.1 Respuesta del Sistema con Disipador de Fluido Viscoso.

Se puede observar que el 70.23% de la energía que ingresa al sistema producto del sismo es disipada por el amortiguador viscoso, mientras que un 10.14% es disipado por el comportamiento inelástico del pórtico dando como resultado una deformación permanente de 0.24 cm una vez finalizada la excitación.



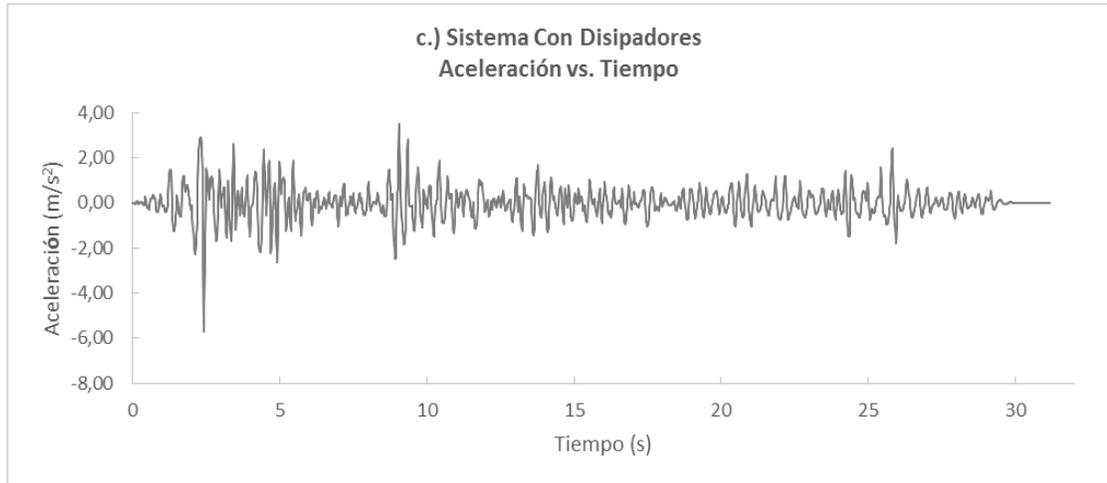
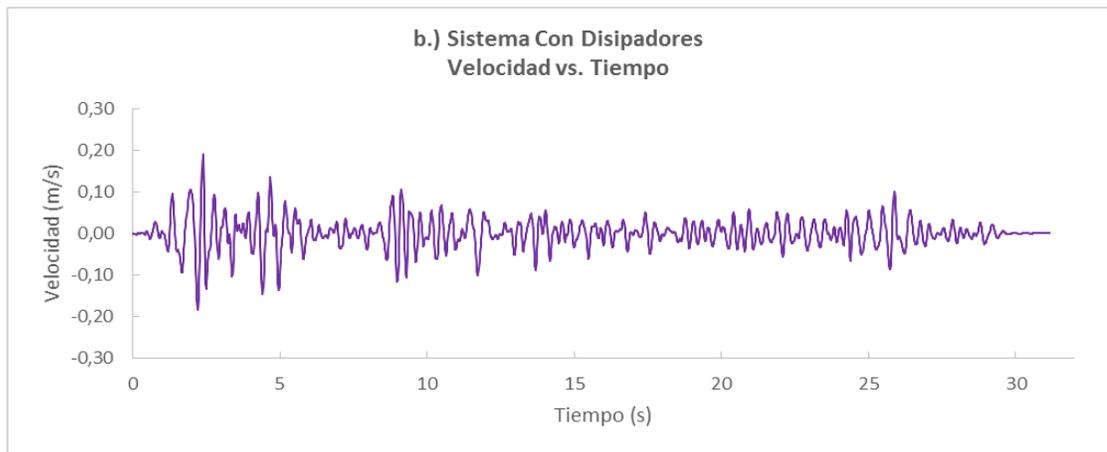


Figura 4.8.4.1 Respuesta del Sistema con Disipador a.) Desplazamiento vs Tiempo, b.) Velocidad vs. Tiempo, c.) Aceleración vs. Tiempo.

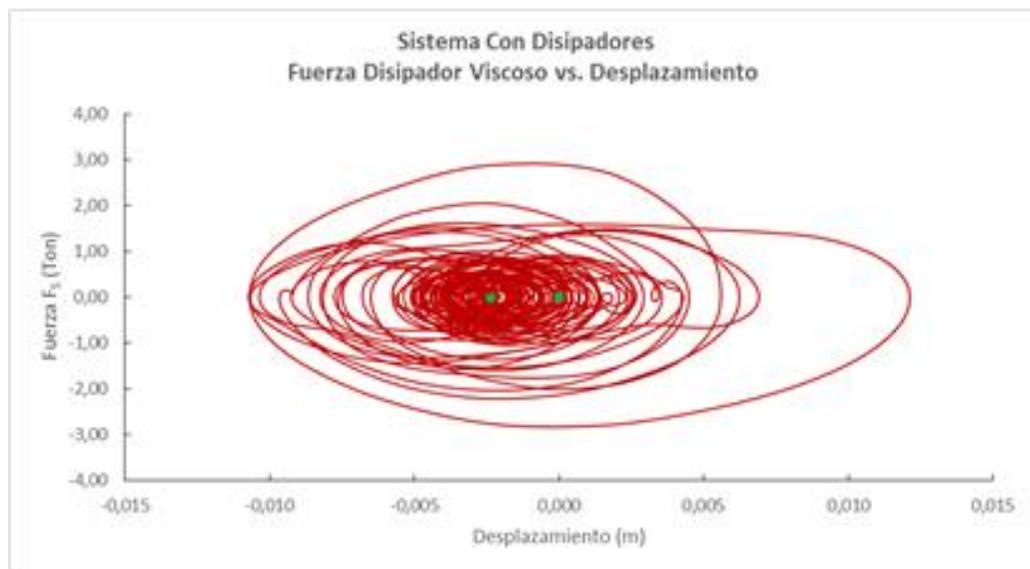


Figura 4.8.4.2 Relación Fuerza del Disipador Viscoso-Desplazamiento.

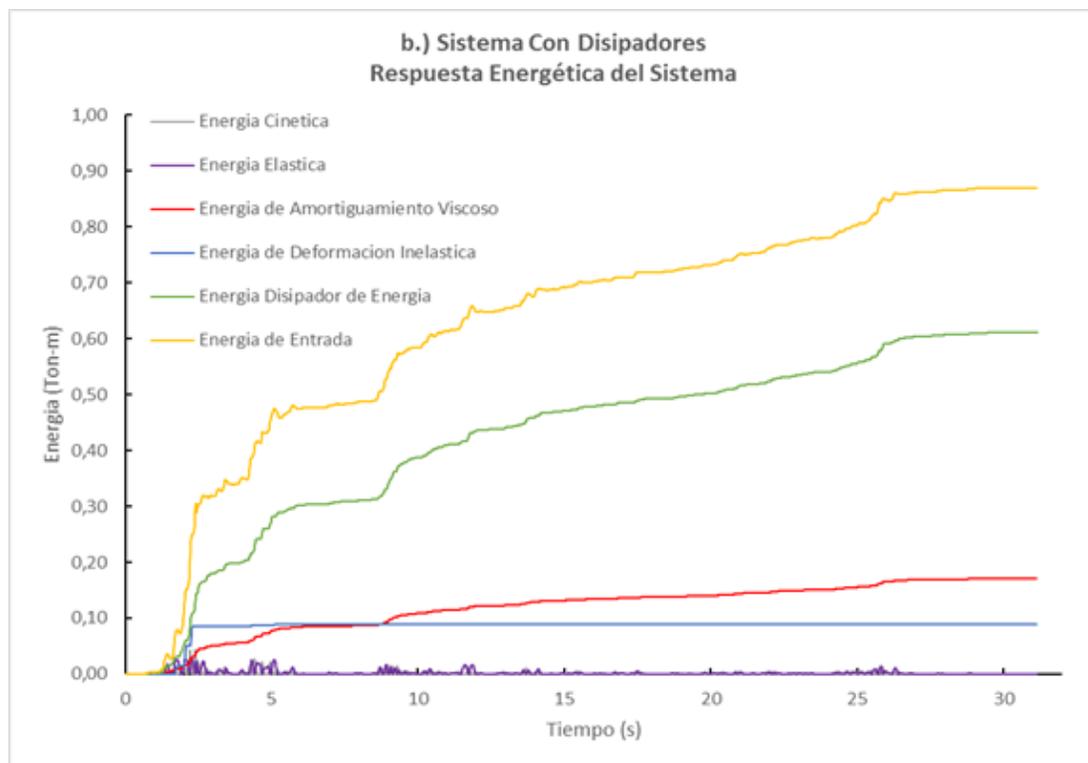
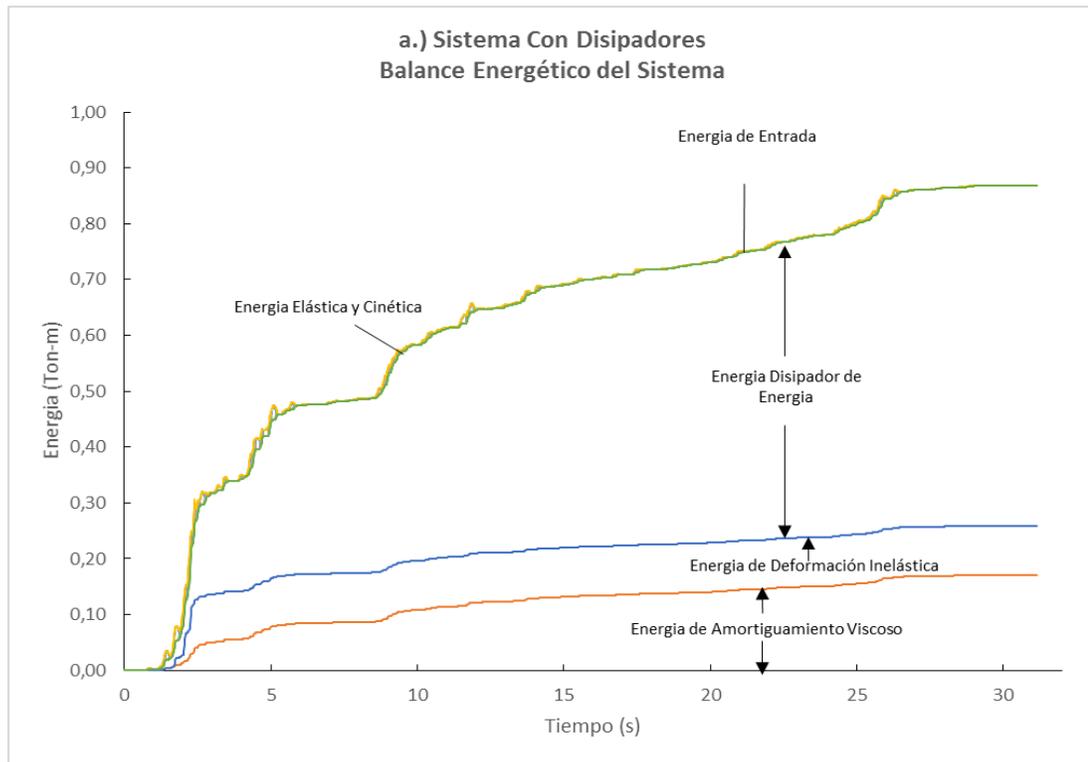


Figura 4.8.4.3 Sistema con Disipador a.) Balance Energético del Sistema y b.) Respuesta Energética del Sistema.

4.8.5. Comparación entre la Respuesta del Sistema Sin y Con Disipador

La tabla siguiente es del tipo comparativa entre las respuestas del sistema sin y con disipador. Se ha agregado una columna en la cual se incluyen los porcentajes de reducción que se obtienen al incorporar un disipador de fluido viscoso.

Parámetro	Sin Disipadores	Con Disipadores	Porcentaje de Reducción
Desplazamiento Máximo	2,86 cm	1,21 cm	57,61%
Velocidad Máxima	25,58 cm/s	19,11 cm/s	25,27%
Aceleración Máxima	4,56 m/s ²	5,72 m/s ²	-25,55%
Deformación Permanente	1,99 cm	0,24 cm	88,15%
E_ymax	0,5553 Ton-m	0,0881 Ton-m	84,14%
EDV_{max}	-	0,6101 Ton-m	-
EY/EI	54,54%	10,14%	81,41%
EDV/EI	-	70,23%	-

*INCREMENTO

Tabla 4.8.5.1 Comparación de las Respuestas del Sistema Sin y Con Disipador.

De acuerdo con la tabla, el desplazamiento máximo del sistema se reduce en un 57.61%, la velocidad máxima también presenta un grado de reducción del 25.27%, aunque la aceleración máxima se incrementa de 4.56 m/s² a 5.72 m/s² con la inclusión de los disipador de fluido viscoso. La cantidad de energía disipada por inelasticidad en el sistema principal se redujo considerablemente de 0.5553 Ton-m a 0.0881 Ton-m. La deformación permanente sufre una reducción importante del 84.14%, una vez finalizada la excitación. Observando los resultados obtenidos se puede concluir que el grado de daño en los elementos estructurales, debido a la incursión de la estructura en el rango inelástico, es mucho menor cuando se utiliza el dispositivo.

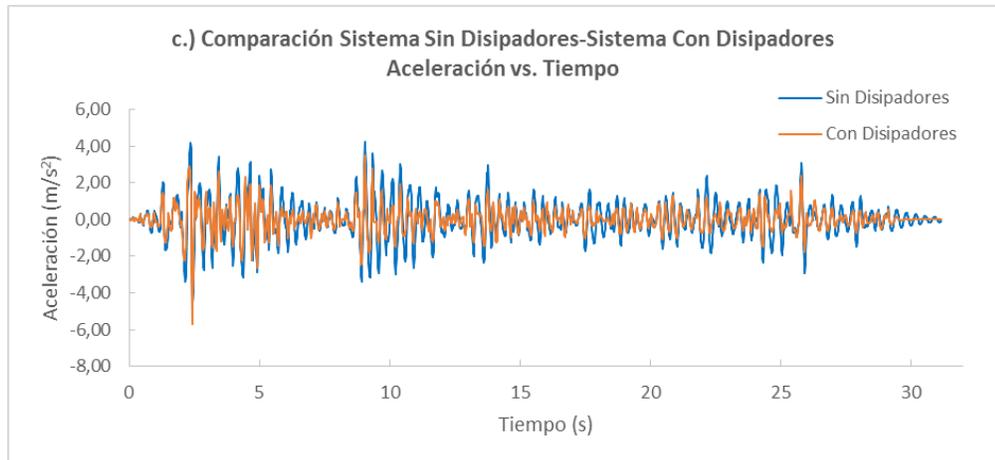
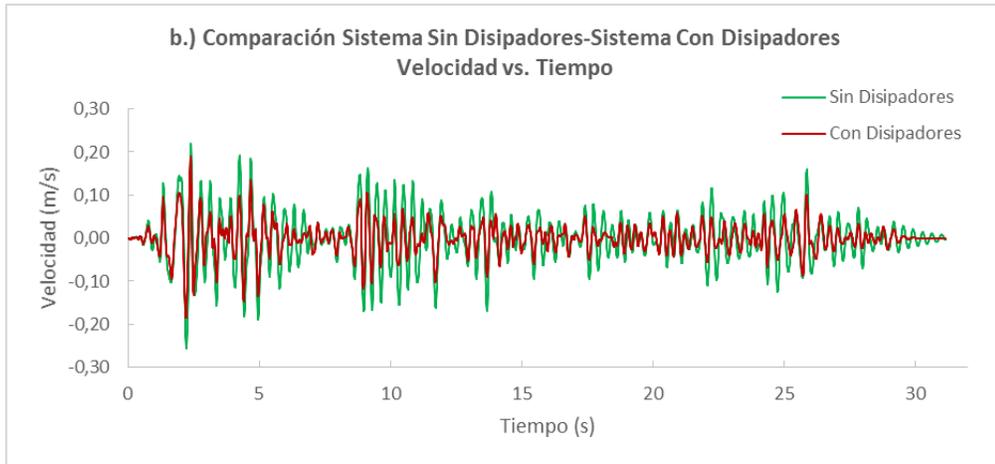
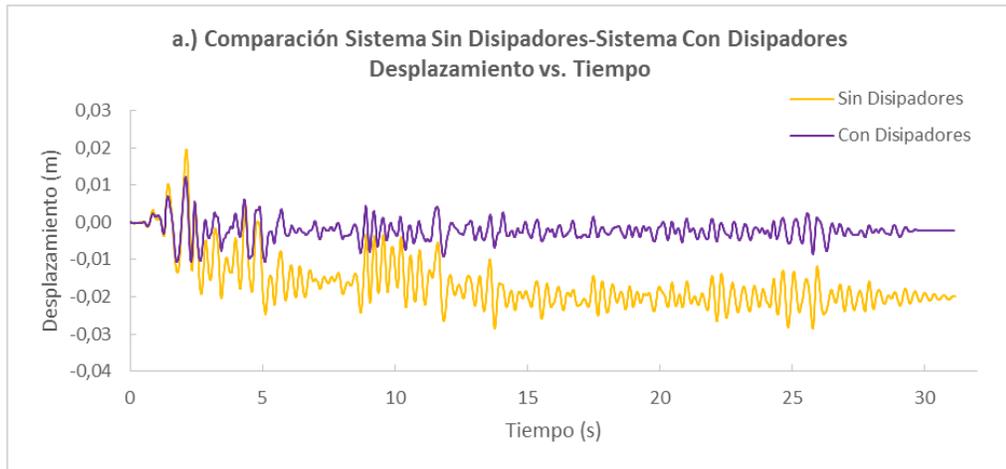


Figura 4.8.5.1 Comparación de las Respuestas del Sistema Sin y Con Disipador
 a.) Desplazamiento vs. Tiempo, b.) Velocidad vs. Tiempo y c.) Aceleración vs.
 Tiempo.

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y DISEÑO DE PÓRTICOS DE HORMIGÓN ARMADO DE 4, 8 Y 12 PISOS

5.1. Introducción

Las estructuras a estudiar a continuación serán pórticos bidimensionales de hormigón armado, de 4, 8 y 12 pisos, a los cuales se les realizará un análisis lineal con la ayuda del programa de elementos finitos SAP2000 V16.1.0, para poder determinar las fuerzas internas en los elementos, deformaciones y derivas entre pisos, con los cuales se basará el diseño.

5.2. Normas y Códigos a utilizar

El diseño de los pórticos de hormigón armado, antes mencionados, estará basado en los siguientes códigos:

- Código ACI 318-08: Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentarios.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11), Cap. 4: Estructuras de Hormigón Armado.

Para la aplicación de las cargas incluyendo las sísmicas se utilizó:

- Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11), Cap. 1: Cargas y Materiales.

- Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11), Cap. 2: Peligro Sísmico y Requisitos de Diseño Sismo Resistente.
- ASCE 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures

5.3. Características de los Pórticos

5.3.1. Geometría en elevación

Los pórticos a estudiar son bidimensionales de hormigón armado, poseen 5 luces de 6m y son de 4, 8 y 12 pisos. El primer piso de cada pórtico tiene una altura mayor con relación a los demás, la cual es de 4.5m, mientras que el resto de pisos posee una altura de 3.6m.

- Pórtico de 4 pisos
Longitud total: 30m
Altura total: 15.7m
- Pórtico de 8 pisos
Longitud total: 30m
Altura total: 29.7m
- Pórtico de 12 pisos
Longitud total: 30m
Altura total: 44.1m

5.3.2. Materiales

Los elementos estructurales (vigas, columnas), que forman los pórticos, fueron modelados considerando que estaban compuestos de hormigón armado, con una resistencia a la compresión no confinada ($f'c$) igual a 280 kg/cm² y un módulo elástico, definido a partir del criterio propuesto por el ACI 318-08 (Sección 8.5.1), igual a 252671.33 kg/cm². Para las varillas de acero se les asignó el material ASTM 615 Grado 60, el cual consiste en un acero con un esfuerzo de fluencia igual a 4200 kg/cm², un esfuerzo último de 6300 kg/cm² y un módulo elástico de 2100000 kg/cm².

5.4. Estados de Carga

5.4.1. Carga Muerta

La carga muerta asignada a los pórticos se puede subdividir en 2:

- 1. Carga muerta producto del peso propio de los elementos estructurales:** Esta carga es calculada automáticamente por el programa a partir de la configuración geométrica de los pórticos, la definición de las secciones de los elementos y los materiales que los conforman.
- 2. Carga muerta adicional:** Esta carga es aquella que uno ingresa al programa, basado en un cálculo previo de los diferentes pesos de ciertos elementos, de los cuales se cree que estarán permanentemente a lo largo de la vida útil de la estructura y que no se modelan en el programa.

Para el presente trabajo, las cargas muertas adicionales son calculadas asumiendo que las vigas del pórtico reciben una losa nervada en una dirección, compuesta de viguetas prefabricadas de 20cm de altura, espaciadas 60cm cara a cara y una loseta de compresión de 5cm. El ancho de influencia de las vigas es igual a 6m. A continuación, por medio de una tabla se muestran las cargas muertas adicionales consideradas para el análisis de los pórticos.

Ultimo Piso	Valor	Unidad
Losa	0,193	Ton/m2
Instlaciones Electricas y Sanitarias	0,05	Ton/m2
Tumbado	0,02	Ton/m2
Otros Pisos	Valor	Unidad
Losa	0,193	Ton/m2
Baldosa de Ceramica + Mortero	0,11	Ton/m2
Paredes de Mampoteria	0,15	Ton/m2
Instalaciones Eletricas y Sanitarias	0,05	Ton/m2
Tumbado	0,02	Ton/m2

Tabla 5.4.1.1 Cargas muertas adicionales usadas para el análisis de los pórticos.

En el programa SAP2000, primero se define el patrón de carga (DL Adicional), para posteriormente, ingresar la carga muerta adicional en forma de carga uniformemente distribuida sobre las vigas de los pórticos. Se debe multiplicar la carga muerta adicional del piso por el ancho de influencia de la viga.

- Último Piso:

$$DL_{Adicional} = 0.263 \text{Ton/m}^2 * 6\text{m} = 1.578 \text{Ton/m}$$

- Otros Pisos:

$$DL_{Adicional} = 0.523 \text{Ton/m}^2 * 6\text{m} = 3.138 \text{Ton/m}$$

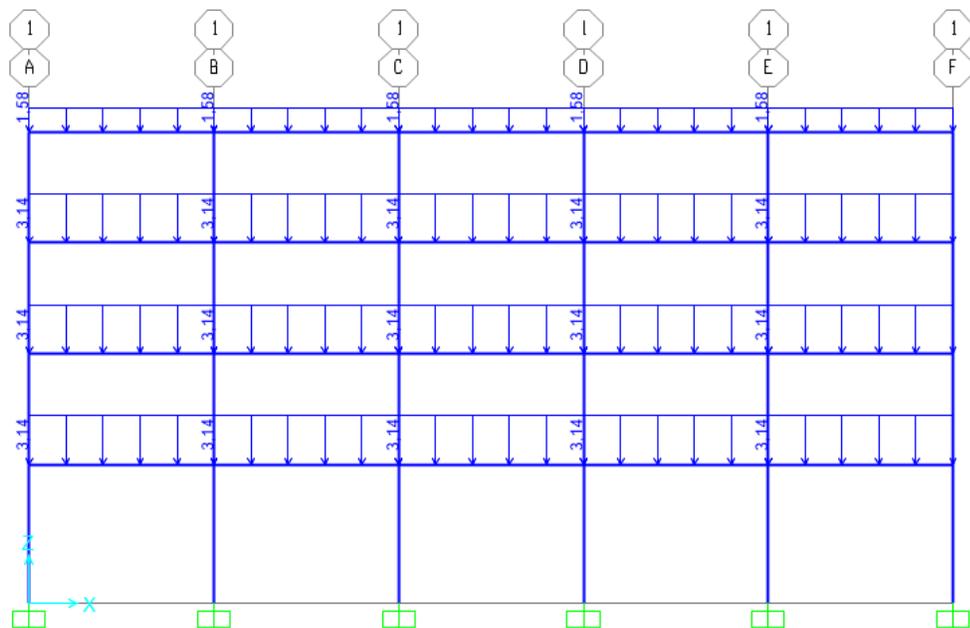


Fig. 5.4.1.1 Cargas muertas adicionales asignadas a las vigas del pórtico de 4 pisos.

5.4.2. Carga Viva

Se consideró que los pórticos eran para uso de oficinas por lo que, de acuerdo con las cargas estipuladas en el NEC-11 (Cap. 1), se les asignó la carga viva correspondiente a tal tipo de ocupación: 0.245 Ton/m². Igual que para las cargas muertas adicionales, en el programa se creó un patrón de carga

viva (Viva). Posteriormente, la carga viva debe ser multiplicada por el ancho de influencia de las vigas, de tal manera que pueda ser asignada a éstas y considerada en el análisis de los pórticos.

Se destaca que para el último piso de cada pórtico se colocó una carga viva reducida igual a 0.1 Ton/m².

- Último Piso:

$$Viva = 0.1 \text{Ton/m}^2 * 6m = 0.6 \text{Ton/m}$$

- Otros Pisos:

$$Viva = 0.245 \text{Ton/m}^2 * 6m = 1.47 \text{Ton/m}$$

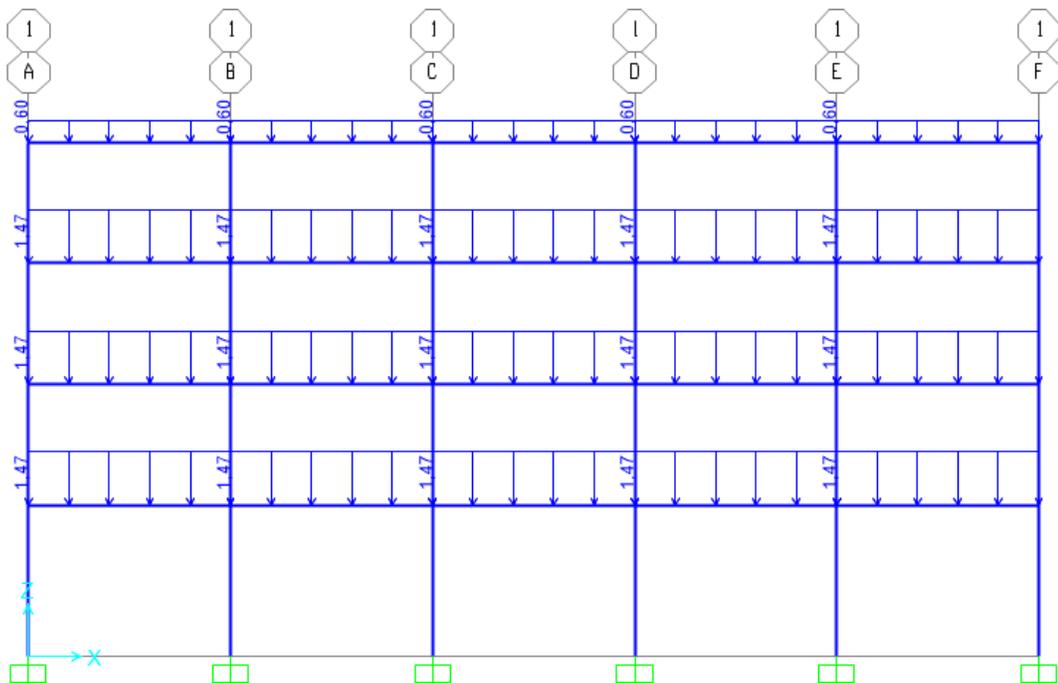


Fig. 5.4.2.1 Cargas vivas asignadas a las vigas del pórtico de 4 pisos.

5.4.3. Carga Sísmica

A partir del NEC-11 se elaboró un espectro de diseño de aceleraciones para la ciudad de Guayaquil, lo que permite realizar un análisis lineal dinámico a los pórticos y poder diseñarlos considerando los efectos de un evento sísmico. El espectro fue construido considerando los siguientes parámetros:

- **Z=0.4:** Este es el factor de zonificación, el cual tiene un valor de 0.4g para la ciudad de Guayaquil e indica la máxima aceleración esperada en roca en esa localidad.
- Se consideró un perfil de suelo tipo E que representa un suelo blando, el cual es muy común encontrar en gran parte de la ciudad y resulta en una amenaza frente a un evento sísmico debido a su posibilidad de amplificar la onda de un terremoto. El perfil de suelo tipo E presenta las siguientes características:

Fa= 1.14: De acuerdo con el NEC-11 (Cap.2), este valor aumenta las ordenadas del espectro de respuesta elástico y considera los efectos de sitio.

Fd= 1.6: De acuerdo con el NEC-11 (Cap.2), este valor aumenta las ordenadas del espectro de respuesta elástico y considera los efectos de sitio.

Fs= 1.9: De acuerdo con el NEC-11 (Cap.2), considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del periodo y los desplazamientos relativos del suelo.

r= 1.5

- **$\eta=1.8$** : Factor de amplificación espectral para la región Costa a excepción de la provincia de Esmeraldas.
- **R=5**: Corresponde al factor de reducción, el cual reduce las ordenadas del espectro elástico en función de la ductilidad del pórtico y su capacidad para incurrir en el rango inelástico. Con un R=5, se considerará a los pórticos como pórticos intermedios resistentes a momento.

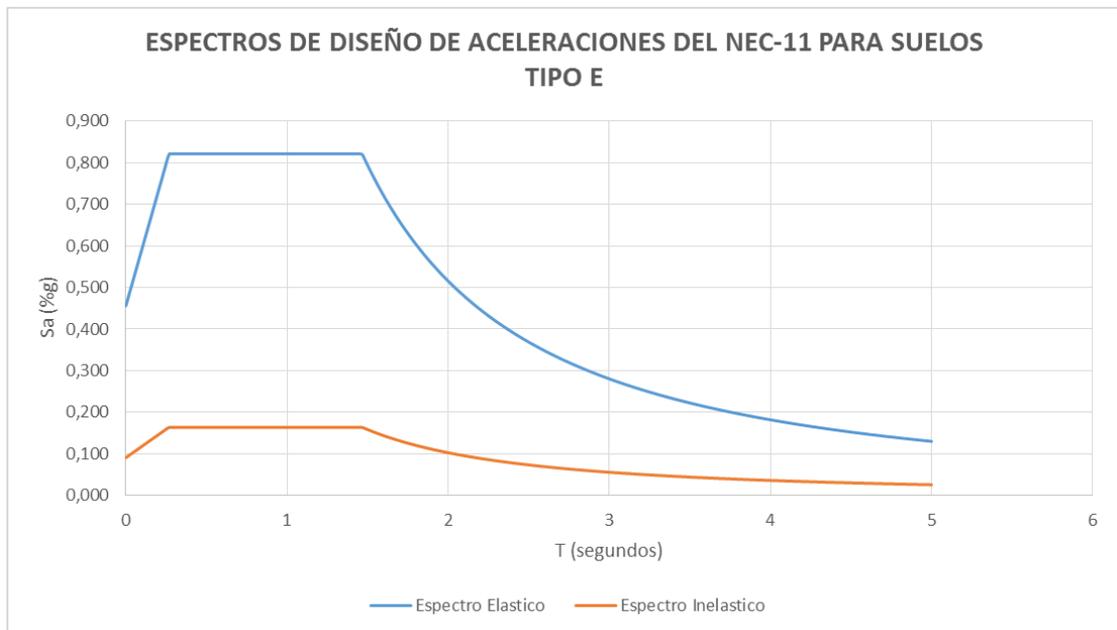


Fig. 5.4.3.1 Espectro elástico e inelástico de aceleraciones para la ciudad de Guayaquil.

5.5. Combinaciones de Carga

Dado que el diseño en hormigón armado es basado en resistencia última, uno debe recurrir a los códigos ACI 318-08 y el ASCE 7-10, en los cuales se establecen las distintas combinaciones a utilizar, con sus correspondientes factores de mayoración. Las combinaciones a utilizar dependerán de las cargas que uno prevea que afectarán a su estructura durante la vida útil. A continuación se muestra las combinaciones de carga usadas para el análisis de los pórticos:

		DL	LL	EX
Diseño	Combo 1	1,4		
	Combo 2	1,2	1,6	
	Combo 3	1,2	0,5	1
	Combo 4	0,9		1
	Envolvente	Combo 1, Combo 2, Combo 3 y Combo 4		

Tabla 5.5.1 Combinaciones de Carga.

5.6. Análisis y Diseño de los Pórticos en el Programa SAP2000

5.6.1. Consideraciones en los modelos de los Pórticos

- Debido a que se tratan de estructuras de hormigón armado se considera una razón de amortiguamiento crítico igual a 5%.
- Los elementos estructurales, vigas y columnas, fueron modelados como elementos FRAME. En conformidad con el NEC-11 (Cap.2), se consideró

la inercia agrietada de dichos elementos, por lo que se debió modificar por un factor de 0.8, la inercia alrededor del eje 3-3 en las columnas.

- Se consideran rígidas las uniones viga-columnas. Las columnas en su base se encuentran empotradas.
- A cada nivel de los pórticos se le asignó un diafragma rígido en el plano horizontal.

5.6.2. Prediseño

Se realizó un prediseño de los 3 pórticos por carga gravitacional. A continuación se muestran las secciones ingresadas al programa:

- Pórtico de 4 Pisos:

Piso	Col. Central	Col. Lateral	Vigas
4	30x50	30x30	25x45
3	30x55	30x35	30x80
2	35x60	30x40	30x80
1	35x65	30x40	30x80

Tabla 5.6.2.1 Secciones de Vigas y Columnas del pórtico de 4 pisos.

- Pórtico de 8 Pisos:

Piso	Col. Central	Col. Lateral	Vigas
8	30x50	30x40	25x45
7	30x55	30x45	30x80
6	30x60	30x50	30x80
5	35x65	30x55	30x80

4	40x70	30x60	30x80
3	45x75	35x65	30x80
2	50x80	40x70	30x80
1	50x80	40x70	30x80

Tabla 5.6.2.2 Secciones de Vigas y Columnas del pórtico de 8 pisos.

- Pórtico de 12 Pisos:

Piso	Col. Central	Col. Lateral	Vigas
12	30x50	30x30	25x45
11	30x55	30x35	30x80
10	30x60	30x40	30x80
9	30x65	30x45	30x80
8	35x70	30x50	30x80
7	40x75	30x55	30x80
6	45x80	30x60	30x80
5	50x85	35x65	30x80
4	55x90	40x70	30x80
3	60x95	45x75	30x80
2	65x100	50x80	30x80
1	65x100	50x80	30x80

Tabla 5.6.2.3 Secciones de Vigas y Columnas del pórtico de 12 pisos.

5.6.3. Análisis Modal

De acuerdo con el NEC-11 (Cap.2), se define como masa participativa a la suma de:

- 100% de la Carga Muerta
- 25% de la Carga Viva

Además, este código indica que se debe considerar en el análisis todos los modos de vibración que contribuyan significativamente a la respuesta total de la estructura, lo cual se satisface al usar todos los modos que involucren la participación de una masa modal acumulada de al menos el 90% de la masa total de la estructura en cada una de las direcciones horizontales consideradas. Para este trabajo se considera solo la masa acumulada en la dirección horizontal X.

5.6.4. Deformaciones laterales y Derivas

Las deformaciones laterales son obtenidas por medio de la carga sísmica EX y de acuerdo con el NEC-11 (Cap.2), para pórticos de hormigón armado las derivas inelásticas entre pisos no deben exceder 0.02 (2%), calculadas con la fórmula (2-29).

$$\Delta_M = 0.75 * R * \Delta_E$$

Donde Δ_M es la deriva inelástica máxima, R es el factor de reducción antes mencionado y Δ_E es la deriva elástica, que se define como la razón del desplazamiento relativo entre piso (piso en cuestión y el inmediatamente inferior) y la altura entre piso.

5.6.5. Diseño Estructural de los Pórticos

Se llevó a cabo el análisis de los pórticos mediante el uso del programa SAP2000, con el cual se obtuvieron las fuerzas internas en los elementos (Fuerzas Axiales, Cortantes y Momentos) para la combinación de carga más crítica, después de un proceso iterativo en el cual se pudo determinar las

secciones definitivas, tanto para columnas como para vigas. Se realizó el diseño sismo resistente de los elementos de acuerdo con las directrices planteadas en el código ACI 318-08 Cap. 21 y el NEC-11 Cap. 4.

En las tablas siguientes se muestran las secciones obtenidas, las derivas inelásticas y los modos considerados para los 3 pórticos:

- Pórtico de 4 Pisos:

Piso	Secciones		
	Col. Centrales	Col. Laterales	Vigas
4	35x45	30x30	30x50
3	35x50	35x35	35x55
2	35x50	35x40	35x60
1	40x55	35x45	35x65

Tabla 5.6.5.1 Secciones diseñadas de Columnas y Vigas para el pórtico de 4 pisos.

Pisos	h (m)	Dato del Programa		R	0,75 *R*Δ	< ΔM	
		δ (m)	Δ (Obtenido)				
4	3,6	0,0299	0,0011	5	0,41%	2,00%	Ok
3	3,6	0,026	0,0018	5	0,68%	2,00%	Ok
2	3,6	0,0195	0,0024	5	0,89%	2,00%	Ok
1	4,5	0,011	0,0024	5	0,92%	2,00%	Ok

Tabla 5.6.5.2 Deformaciones laterales y derivas inelásticas del pórtico de 4 pisos.

Modo	T (seg)	Masa en la dirección X	Masa Acumulada en la dirección X
1	0,7465	0,895773	0,895773
2	0,2660	0,08142	0,977193
3	0,1647	0,017801	0,994993
4	0,1211	0,005004	0,999997
5	0,0741	0	0,999997
6	0,0732	4,858E-08	0,999997
7	0,0714	0	0,999997

8	0,0692	4,183E-08	0,999998
9	0,0607	0	0,999998
10	0,0607	0,000002082	1,000000
11	0,0265	0	1,000000
12	0,0265	5,595E-10	1,000000

Tabla 5.6.5.3 Participación modal de las masas del pórtico de 4 pisos.

- Pórtico de 8 Pisos:

Piso	Secciones		
	Col. Centrales	Col. Laterales	Vigas
8	45x45	40x40	30x55
7	50x50	45x45	30x60
6	50x50	45x45	35x60
5	55x55	50x50	35x65
4	55x55	50x50	35x70
3	60x60	55x55	35x75
2	60x60	55x55	35x75
1	65x65	60x60	40x75

Tabla 5.6.5.4 Secciones diseñadas de Columnas y Vigas para el pórtico de 8 pisos.

Pisos	h (m)	Dato del Programa		R	0,75 *R*Δ	< ΔM	
		δ (m)	Δ (Obtenido)				
8	3,6	0,0624	0,0010	5	0,36%	2,00%	Ok
7	3,6	0,0589	0,0017	5	0,65%	2,00%	Ok
6	3,6	0,0527	0,0024	5	0,89%	2,00%	Ok
5	3,6	0,0442	0,0023	5	0,85%	2,00%	Ok
4	3,6	0,036	0,0024	5	0,92%	2,00%	Ok
3	3,6	0,0272	0,0022	5	0,82%	2,00%	Ok
2	3,6	0,0193	0,0023	5	0,88%	2,00%	Ok
1	4,5	0,0109	0,0024	5	0,91%	2,00%	Ok

Tabla 5.6.5.5 Deformaciones laterales y derivas inelásticas del pórtico de 8 pisos.

Modo	T (seg)	Masa en la dirección X	Masa Acumulada en la dirección X
1	1,0480	0,81895	0,8190
2	0,3974	0,122182	0,9411
3	0,2321	0,033537	0,9747
4	0,1651	0,012286	0,9870
5	0,1260	0,007302	0,9943
6	0,1109	0	0,9943
7	0,1066	0,000002833	0,9943
8	0,1037	0,002988	0,9972
9	0,1000	0	0,9972
10	0,0931	2,146E-09	0,9972
11	0,0857	0,001657	0,9989
12	0,0822	0	0,9989

Tabla 5.6.5.6 Participación modal de las masas del pórtico de 8 pisos.

- Pórtico de 12 Pisos:

Piso	Secciones		
	Col.Centrales	Col. Laterales	Vigas
12	65x65	60x60	30x60
11	65x65	60x60	35x65
10	65x65	60x60	35x65
9	70x70	65x65	40x70
8	70x70	65x65	40x70
7	70x70	65x65	45x75
6	75x75	70x70	45x75
5	75x75	70x70	45x75
4	75x75	70x70	45x80
3	80x80	75x75	45x80
2	80x80	75x75	45x80
1	80x80	75x75	45x80

Tabla 5.6.5.7 Secciones diseñadas de Columnas y Vigas para el pórtico de 12 pisos.

Pisos	h (m)	Dato del Programa		R	0,75 *R*Δ	< ΔM	
		δ (m)	Δ (Obtenido)				
12	3,6	0,0848	0,0007	5	0,27%	2,00%	Ok
11	3,6	0,0822	0,0013	5	0,48%	2,00%	Ok
10	3,6	0,0776	0,0018	5	0,66%	2,00%	Ok
9	3,6	0,0713	0,0019	5	0,71%	2,00%	Ok
8	3,6	0,0645	0,0021	5	0,79%	2,00%	Ok
7	3,6	0,0569	0,0023	5	0,84%	2,00%	Ok
6	3,6	0,0488	0,0022	5	0,83%	2,00%	Ok
5	3,6	0,0408	0,0023	5	0,85%	2,00%	Ok
4	3,6	0,0326	0,0023	5	0,86%	2,00%	Ok
3	3,6	0,0243	0,0022	5	0,82%	2,00%	Ok
2	3,6	0,0164	0,0023	5	0,84%	2,00%	Ok
1	4,5	0,0083	0,0018	5	0,69%	2,00%	Ok

Tabla 5.6.5.8 Deformaciones laterales y derivas inelásticas del pórtico de 12 pisos.

Modo	T (seg)	Masa en la direccion X	Masa Acumulada en la direccion X
1	1,221347	0,788302	0,788302
2	0,451268	0,123061	0,911363
3	0,2655	0,041942	0,953304
4	0,184256	0,01998	0,973284
5	0,138043	0,010378	0,983662
6	0,129596	4,025E-07	0,983663
7	0,12091	0,000078	0,983741
8	0,110389	0,005966	0,989707
9	0,109163	0,000001222	0,989708
10	0,098251	0,000088	0,989796
11	0,091569	0,00356	0,993357
12	0,090604	0,000113	0,993469

Tabla 5.6.5.9 Participación modal de las masas del pórtico de 12 pisos.

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA DE LOS PÓRTICOS SIN Y CON DISIPADORES DE FLUIDO VISCOSO

6.1. Introducción

El presente capítulo mostrará los diferentes resultados obtenidos de los análisis realizados a los pórticos con y sin disipadores en el programa SAP2000, en el cual existe la posibilidad de realizar un análisis FNA (Fast Non-Linear Analysis), que es un análisis dinámico no lineal basado en registros acelerográficos y que además, permite obtener de manera gráfica la distribución de las energías en los pórticos, así como también la variación del cortante basal y fuerza en los elementos.

Para la realización del trabajo fueron utilizados 2 registros acelerográficos, uno fue proporcionado por la empresa consultora guayaquileña Sísmica-Ingenieros Consultores, la cual pudo facilitar 1 registro del sismo de México de 1985, tomado en suelo blando, siendo esto oportuno y adecuado, dado que la ciudad de Guayaquil posee suelos similares. El otro registro fue proporcionado por el Dr. Walter Mera Ortiz, el cual es un registro tomado en el suelo blando de la ciudad.

6.2. Análisis FNA (Fast Non-Linear Analysis)

De acuerdo con el Knowledge Base, de la empresa CSI, este método consiste en un análisis modal que puede ser aplicado para la evaluación, estática o dinámica, de sistemas estructurales con comportamiento lineal y no lineal. Resulta muy adecuado para los análisis tiempo-historia.

Como condición para aplicar este tipo de análisis, los modelos realizados en el programa deben cumplir con lo siguiente:

- La estructura debe ser lineal y elástica.
- Tener un número determinado de elementos no-lineales.
- El comportamiento no lineal estará asignado solo a los elementos tipo “Link”.

Los elementos tipo “Link” pueden ser usados para modelar aisladores, disipadores, a los cuales se les pueda asignar una relación no-lineal fuerza-desplazamiento al material, amortiguadores y otros tipos de elementos necesarios para producir una disipación de energía.

La eficiencia del método se debe a la separación del vector de fuerza no-lineal $R_{NL}(t)$ de la matriz elástica de rigidez y las ecuaciones amortiguadas del movimiento, por lo que la ecuación de equilibrio dinámico puede ser expresada de la siguiente manera:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) + R_{NL}(t) = R(t) \quad (6.2.1)$$

Vectores Ritz de rigidez y masa ortogonal, dependientes de la carga, condensan las relaciones de equilibrio dentro del sistema estructural elástico. Para cada incremento de tiempo, ecuaciones modales desacopladas son resueltas de manera exacta, mientras que las fuerzas dentro de los GDL no-lineales, definidos en $R_{NL}(t)$, son resueltas de manera iterativa por un proceso de convergencia para satisfacer el equilibrio.

6.3. Registros Acelerográficos, Sismo de México de 1985 y Sismo de “El Centenario”

El sismo de México ocurrió el 19 de Septiembre de 1985, teniendo el epicentro, de acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional, en las costas del océano pacífico frente a la desembocadura del Río Balsas. Tuvo una magnitud de 7.8Ms o de 8.1Mw y produjo graves daños a las estructuras especialmente en la ciudad del México de D.F., debido en gran parte al efecto de resonancia. Los datos que se muestran a continuación son del registro acelerográfico en suelo blando:

- Registro 1

Estación: Secretaría Comunicación y Transporte

Componente: N90W (Horizontal)

Suelo: Arcilla Blanda

Duración: 164 seg.

Δt : 0.02seg.



Fig. 6.3.1 Acelerograma del Sismo de México (1985)-Componente N90W, Estación: Secretaría Comunicación y Transporte.

El registro sísmico del El Centenario fue tomado de un sismo que ocurrió el 26 de Abril de 1993 cerca de la ciudad. Fue un sismo de baja magnitud, presentando una aceleración máxima del suelo de 0.10994g para la componente horizontal Norte-Sur. A continuación se presentan ciertas características del registro:

- Registro 2:
Estación: El Centenario
Componente: Norte-Sur (Horizontal)
Suelo: Arcilla Blanda
Duración: 30,24 seg.
 Δt : 0.01 seg.

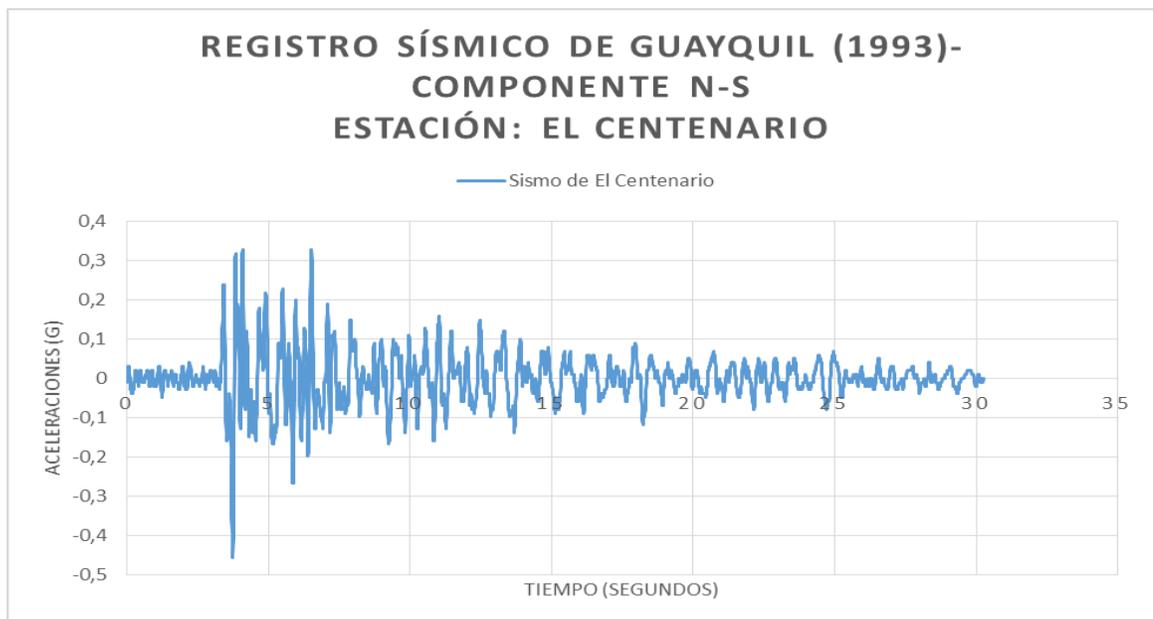


Fig. 6.3.2 Registro Sísmico de Guayaquil (1993)-Componente N-S,
Estación: El Centenario.

Previo a la realización del análisis tiempo-historia para los pórticos, se definieron en el programa SAP2000 los diferentes “Time-Histoy Functions”, en el cual se debió realizar una modificación al Δt del registro del sismo de México, con el objetivo de lograr que el acelerograma tuviera un periodo de aproximadamente 1 segundo. Este ajuste resulta necesario por las siguientes razones:

- A pesar de ser una ciudad con una alta sismicidad, de acuerdo la zonificación sísmica propuesta por el NEC-11, no se dispone un vasto historial de registros acelerograficos en suelo blando de magnitud considerable. Frente a la escasez, uno se ve forzado a buscar registros de otros lugares con condiciones similares al sitio de estudio.
- El periodo del acelerograma usado está alrededor de 2 segundos, mientras que el periodo de los suelos blandos de Guayaquil es aproximadamente 1 segundo, con lo que se propone dividir el Δt a la mitad, dando lugar a una reducción del tiempo total del registro, un aumento de la frecuencia y como consecuencia una reducción del periodo.

Para el caso del registro de El Centenario, debido a la baja magnitud de la aceleración obtenida, se escaló las ordenadas del mismo a un valor de 0.456g, el equivalente a la aceleración máxima del suelo de Guayaquil, tal como se encuentra especificado en el NEC-11, de tal manera que se considere la situación más crítica en el análisis de los pórticos.

$$S_a = Z * F_a = 0.4g * 1.14 = 0.456g$$

6.4. Análisis Dinámico No-Lineal Tiempo-Historia de los pórticos sin disipadores

Una vez ingresadas las funciones, se deben establecer los “Load Cases”. Es en esta parte donde se le indica al programa que se realizará un análisis FNA, usando los registros previamente definidos. Para el registro del sismo de México se procedió a definir el “Load Case” bajo el nombre de TH-SCT-0,01, indicando, el primer término, que es una función Tiempo-Historia; el segundo, indica la estación donde fue tomado el registro y el último término es el Δt , seleccionado de tal manera que el periodo del registro sea de aproximadamente 1 segundo. Posterior a eso, en el casillero que dice “Load Case Type” se coloca Time-History y se define que se realizará un análisis modal no lineal (FNA), además se indica el sentido de la aceleración, el cual es la dirección U1, y el factor de escala será igual a 0,01, dado que se ingresó los datos en cm/seg^2 y las unidades establecidas en el programa son: Tonf-m-seg. El archivo del registro cuenta con un total de 8201 valores, por lo que se le indicó al programa que tome en consideración 9000 pasos, basado en el criterio de que se busca revisar el comportamiento de los pórticos una vez finalizado el sismo.

Para el registro de El Centenario, se creó un Load Case bajo el nombre de TH-EC-0,01, de la misma manera como se definió anteriormente, el primer término indica que es una función Tiempo-Historia, el segundo indica la estación donde se obtuvo el registro y el último término indica el Δt . En este caso es un registro tomado en la ciudad de Guayaquil y no hace falta hacer la modificación realizada al registro anterior. Así mismo, se definió el “Load Case Type” como Time-History y se establecieron las condiciones para un análisis modal no-lineal. La dirección de la aceleración será U1 y el factor de escala del registro va a ser igual a la aceleración de la gravedad (9,81), debido a que los datos de El Centenario se encuentran en porcentaje de la gravedad. El archivo

del registro cuenta con 3024 valores, pero para el análisis se usaron 4000 pasos por la misma razón previamente mencionada.

Load Case Data - Nonlinear Modal History (FNA)

Load Case Name: TH-SCT-0,01 [Set Def Name] Notes: [Modify/Show...]

Load Case Type: Time History [Design...]

Initial Conditions:
 Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
 Continue from State at End of Modal History []
Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type:
 Linear
 Nonlinear

Solution Type:
 Modal
 Direct Integration

History Type:
 Transient
 Periodic

Modal Load Case:
Use Modes from Case: MODAL []

Mass Source: Previous (MSSSRC1)

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	sct-0,01	0,01
Accel	U1	sct-0,01	0,01

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:
Number of Output Time Steps: 9000
Output Time Step Size: 0,01

Other Parameters:
Modal Damping: Constant at 0,05 [Modify/Show...]
Nonlinear Parameters: Default [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Fig. 6.4.1 Definición del Load Case para el registro SCT del sismo de México de 1985.

Load Case Data - Nonlinear Modal History (FNA)

Load Case Name:

Notes:

Load Case Type:

Initial Conditions

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Modal History

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type

Linear

Nonlinear

Solution Type

Modal

Direct Integration

Modal Load Case

Use Modes from Case:

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	El Centenaric	9.81
Accel	U1	El Centenario	9.81

Show Advanced Load Parameters

Mass Source

Time Step Data

Number of Output Time Steps:

Output Time Step Size:

Other Parameters

Modal Damping:

Nonlinear Parameters:

Fig. 6.4.2 Definición del Load Case para el registro de El Centenario del sismo ocurrido en Guayaquil de 1993.

Una vez determinados los “Load Cases”, se procedió a correr los pórticos y se obtuvieron los siguientes resultados:

- Pórtico de 4 Pisos

Registro SCT

Pisos	Dato del Programa				
	h (m)	δ (m)	Δ (Obtenido)	$< \Delta M$	
4	3,6	0,0726	0,24%	2,00%	Ok
3	3,6	0,0638	0,43%	2,00%	Ok
2	3,6	0,0484	0,57%	2,00%	Ok
1	4,5	0,028	0,62%	2,00%	Ok

Tabla 6.4.1 Deformaciones y Derivas de pisos para $t=29.12s$ (momento de la deformación máx. del piso 4).

Registro El Centenario

Pisos	Dato del Programa				
	h (m)	δ (m)	Δ (Obtenido)	$< \Delta M$	
4	3,6	0,1486	0,50%	2,00%	Ok
3	3,6	0,1307	0,87%	2,00%	Ok
2	3,6	0,0994	1,18%	2,00%	Ok
1	4,5	0,0571	1,27%	2,00%	Ok

Tabla 6.4.2 Deformaciones y Derivas máximas de pisos $t=5.36s$ (momento de la deformación máx. del piso 4).

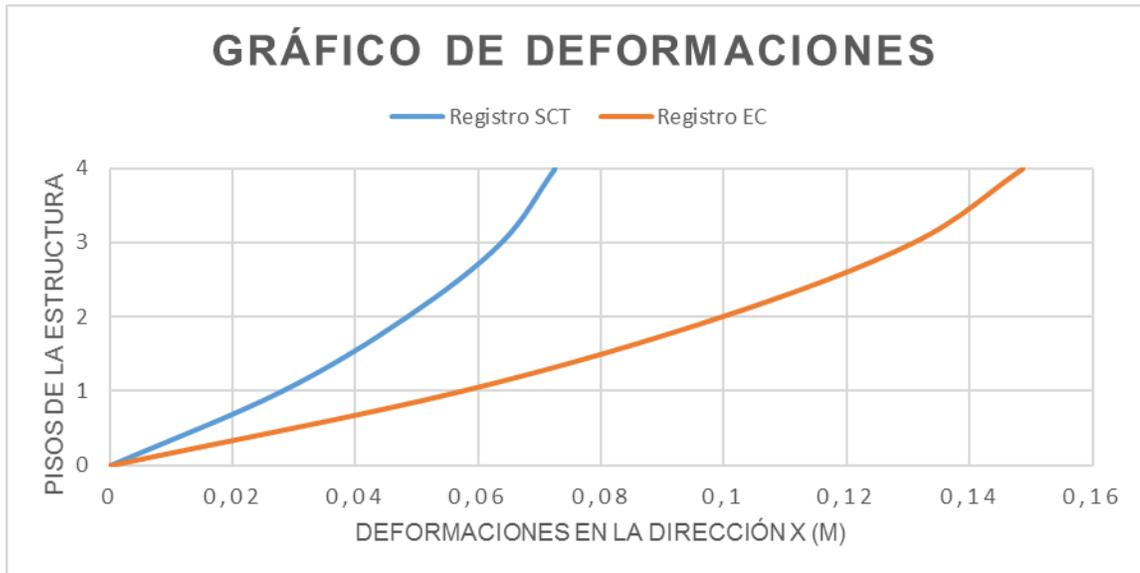


Fig. 6.4.3 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.4.1 y 6.4.2.

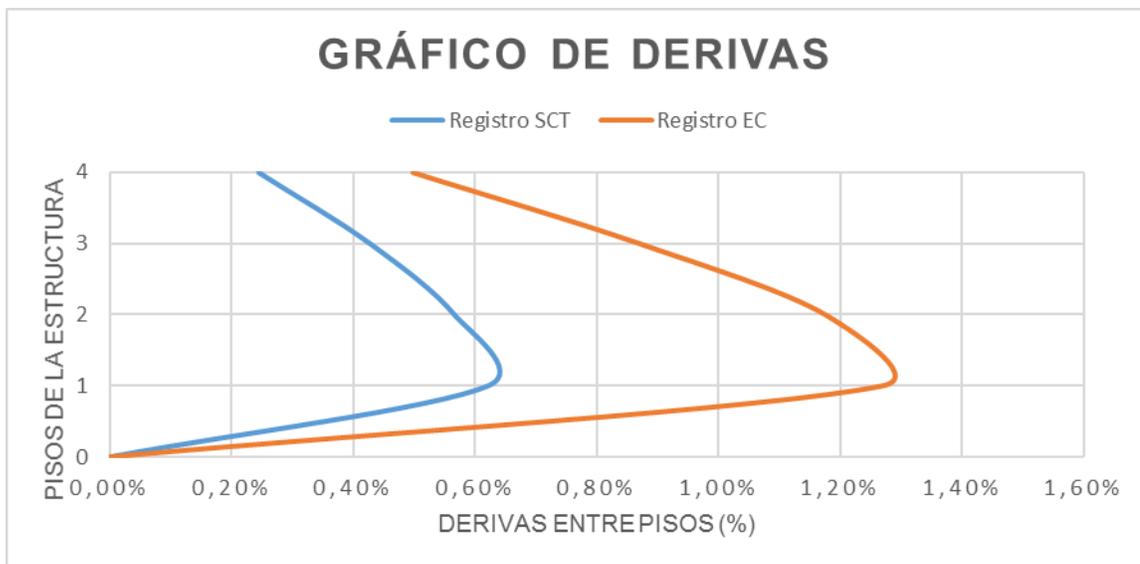


Fig. 6.4.4 Gráfico de las derivas de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.4.1 y 6.4.2.

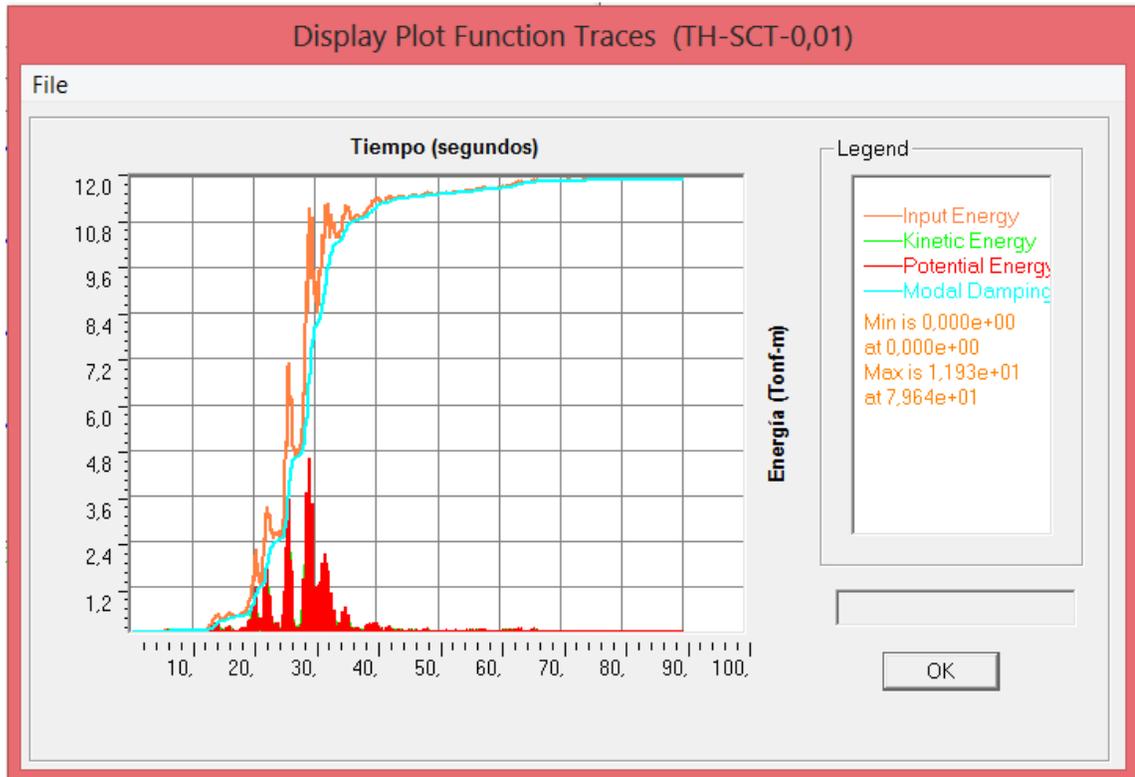


Fig. 6.4.5 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 4 pisos sometido al registro SCT.

	Energía (Tonf-m)			
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal
Registro SCT	11,93	4,591	2,62	11,93
% Energía de Entrada	100,00%	38,48%	21,96%	100,00%

Tabla 6.4.3 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 4 pisos para el registro SCT.

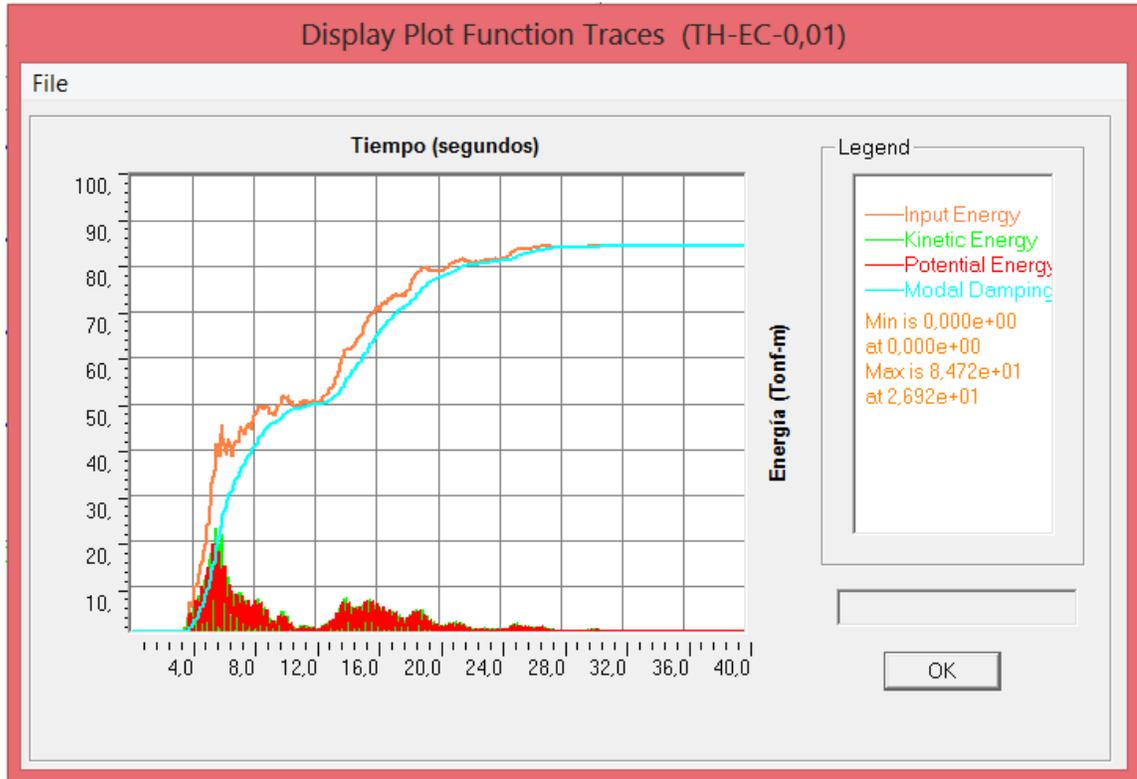


Fig. 6.4.6 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 4 pisos sometido al registro El Centenario.

	Energía (Tonf-m)			
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal
Registro El Centenario	84,72	19,28	22,76	84,56
% Energía de Entrada	100,00%	22,76%	26,86%	99,81%

Tabla 6.4.4 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 4 pisos para el registro El Centenario.

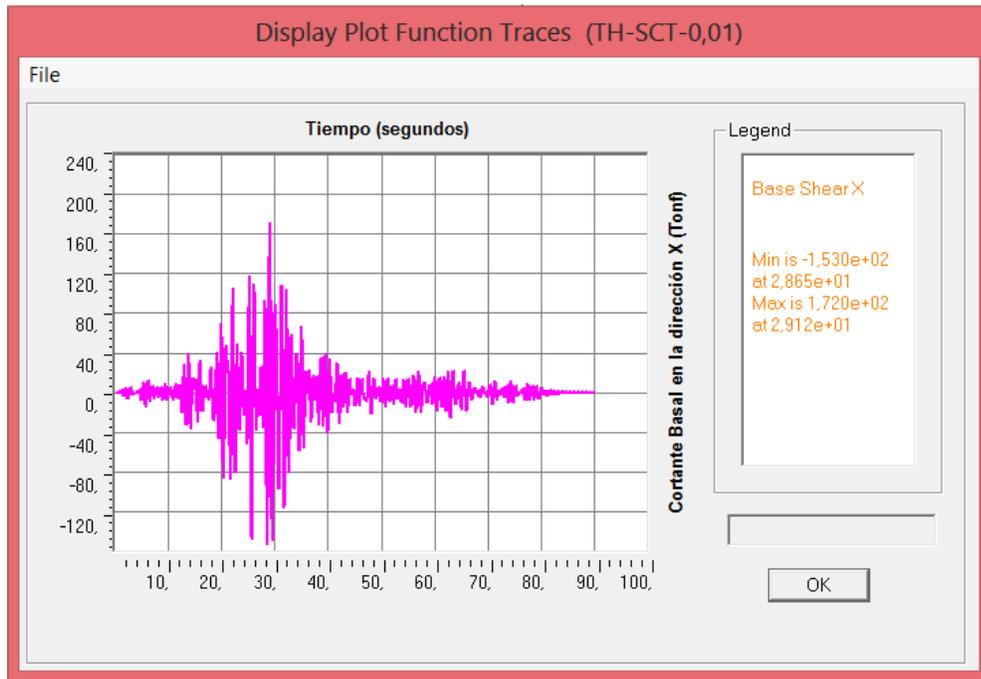


Fig. 6.4.7 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 4 pisos sometido al registro SCT.

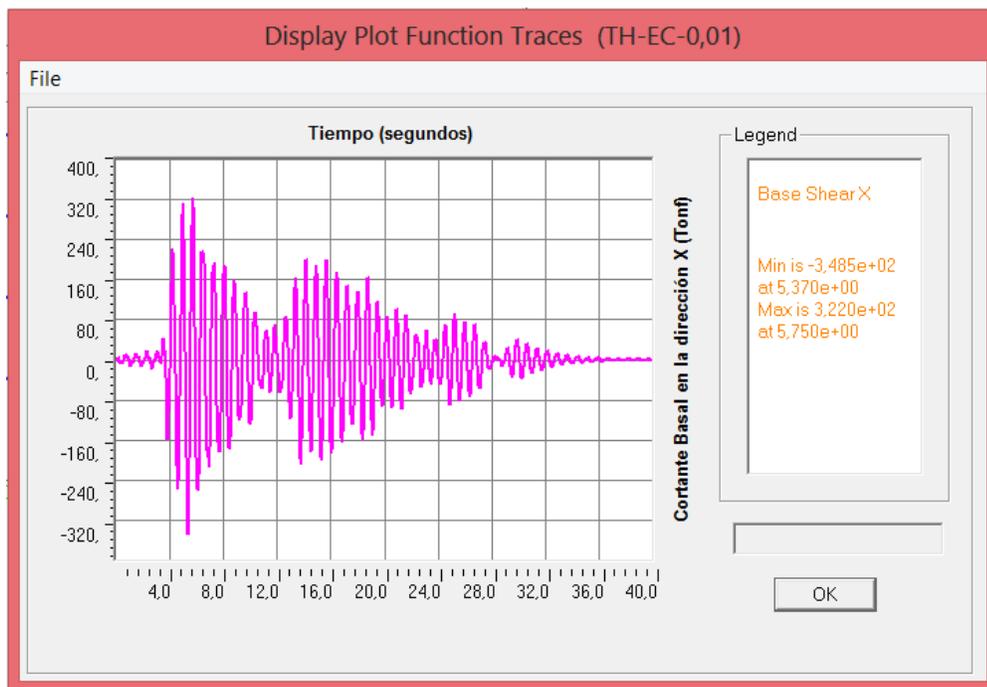


Fig. 6.4.8 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 4 pisos sometido al registro El Centenario.

	Cortante Basal Max. (Tonf)
Registro SCT	172
Registro El Centenario	348,5

Tabla 6.4.5 Cortantes Basales máximos en el pórtico de 4 pisos.

Usando los datos de la Tabla 6.4.5 y el peso total de la estructura, $W_{reactivo} = 460.13Tonf$ (100% de la carga muerta total y el 25% de la carga viva), se procedió al cálculo del coeficiente de carga lateral (c_L):

Registro SCT: $c_L = \frac{V}{W_{reactivo}} = 0.37$

Registro El Centenario: $c_L = \frac{V}{W_{reactivo}} = 0.76$

Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
17	TH-SCT-0,01	Max.	30,64	72,72
17	TH-SCT-0,01	Min.	-34,42	-81,68
17	TH-EC-0,01	Max.	70,28	166,91
17	TH-EC-0,01	Min.	-64,75	-153,73
18	TH-SCT-0,01	Max.	23,80	40,57
18	TH-SCT-0,01	Min.	-26,63	-38,66
18	TH-EC-0,01	Max.	55,61	80,73
18	TH-EC-0,01	Min.	-52,73	-84,72
19	TH-SCT-0,01	Max.	16,23	28,71
19	TH-SCT-0,01	Min.	-18,07	-25,96
19	TH-EC-0,01	Max.	40,90	63,66
19	TH-EC-0,01	Min.	-40,84	-63,00
20	TH-SCT-0,01	Max.	5,97	11,52
20	TH-SCT-0,01	Min.	-6,53	-10,49
20	TH-EC-0,01	Max.	18,99	29,73
20	TH-EC-0,01	Min.	-17,63	-32,19

Tabla 6.4.6 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 4 pisos, producidas por los registros.

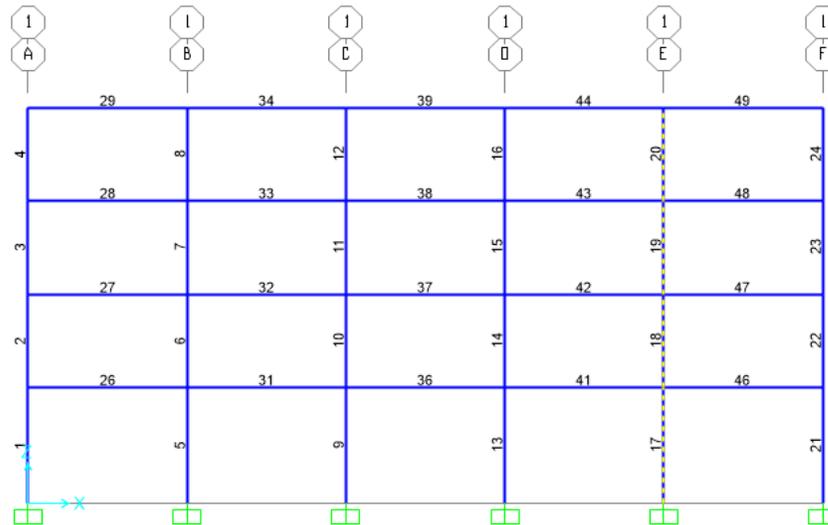


Fig. 6.4.8 Columnas seleccionadas para la obtención de las fuerzas internas mostradas en la Tabla 6.4.6.

Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
41	TH-SCT-0,01	Max.	18,07	55,30
41	TH-SCT-0,01	Min.	-20,26	-55,11
41	TH-EC-0,01	Max.	41,72	113,49
41	TH-EC-0,01	Min.	-38,55	-113,86
42	TH-SCT-0,01	Max.	12,22	37,69
42	TH-SCT-0,01	Min.	-13,66	-37,43
42	TH-EC-0,01	Max.	28,11	78,53
42	TH-EC-0,01	Min.	-28,45	-77,94
43	TH-SCT-0,01	Max.	7,07	21,84
43	TH-SCT-0,01	Min.	-7,86	-21,39
43	TH-EC-0,01	Max.	18,78	51,13
43	TH-EC-0,01	Min.	-18,30	-52,15
44	TH-SCT-0,01	Max.	2,22	6,92
44	TH-SCT-0,01	Min.	-2,44	-6,65
44	TH-EC-0,01	Max.	6,80	18,51
44	TH-EC-0,01	Min.	-6,27	-19,23

Tabla 6.4.7 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al cuarto piso, producidas por los registros.

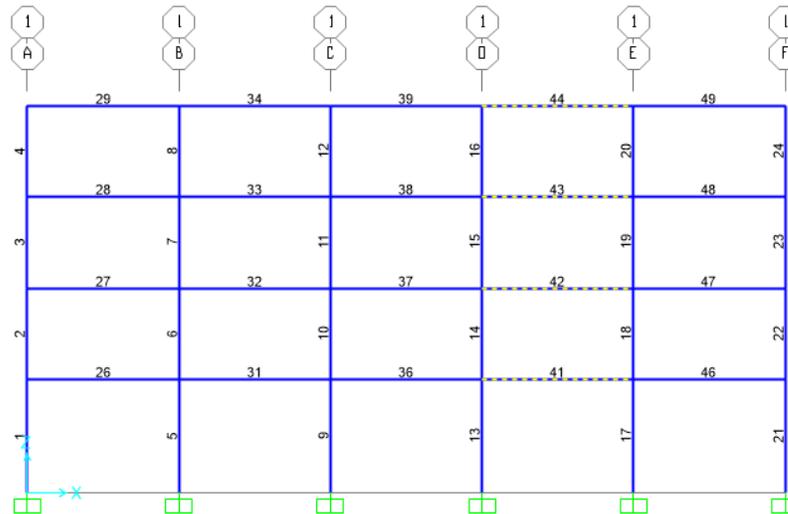


Fig. 6.4.9 Vigas seleccionadas para la obtención de las fuerzas internas mostradas en la Tabla 6.4.7.

- Pórtico de 8 Pisos

Registro SCT

Pisos	Dato del Programa			< ΔM	
	h (m)	δ (m)	Δ (Obtenido)		
8	3,6	0,3325	0,50%	2,00%	Ok
7	3,6	0,3145	0,89%	2,00%	Ok
6	3,6	0,2826	1,24%	2,00%	Ok
5	3,6	0,2379	1,22%	2,00%	Ok
4	3,6	0,1939	1,30%	2,00%	Ok
3	3,6	0,147	1,20%	2,00%	Ok
2	3,6	0,1039	1,26%	2,00%	Ok
1	4,5	0,0585	1,30%	2,00%	Ok

Tabla 6.4.8 Deformaciones y Derivas de pisos para $t=32.05s$ (momento de la deformación máx. del piso 8).

Registro El Centenario

Pisos	Dato del Programa			< ΔM	
	h (m)	δ (m)	Δ (Obtenido)		
8	3,6	0,11	0,22%	2,00%	Ok
7	3,6	0,102	0,31%	2,00%	Ok
6	3,6	0,091	0,36%	2,00%	Ok
5	3,6	0,0782	0,34%	2,00%	Ok
4	3,6	0,066	0,39%	2,00%	Ok
3	3,6	0,052	0,39%	2,00%	Ok
2	3,6	0,0379	0,45%	2,00%	Ok
1	4,5	0,0218	0,48%	2,00%	Ok

Tabla 6.4.9 Deformaciones y Derivas de pisos para $t=4.4s$ (momento de la deformación máx. del piso 8).

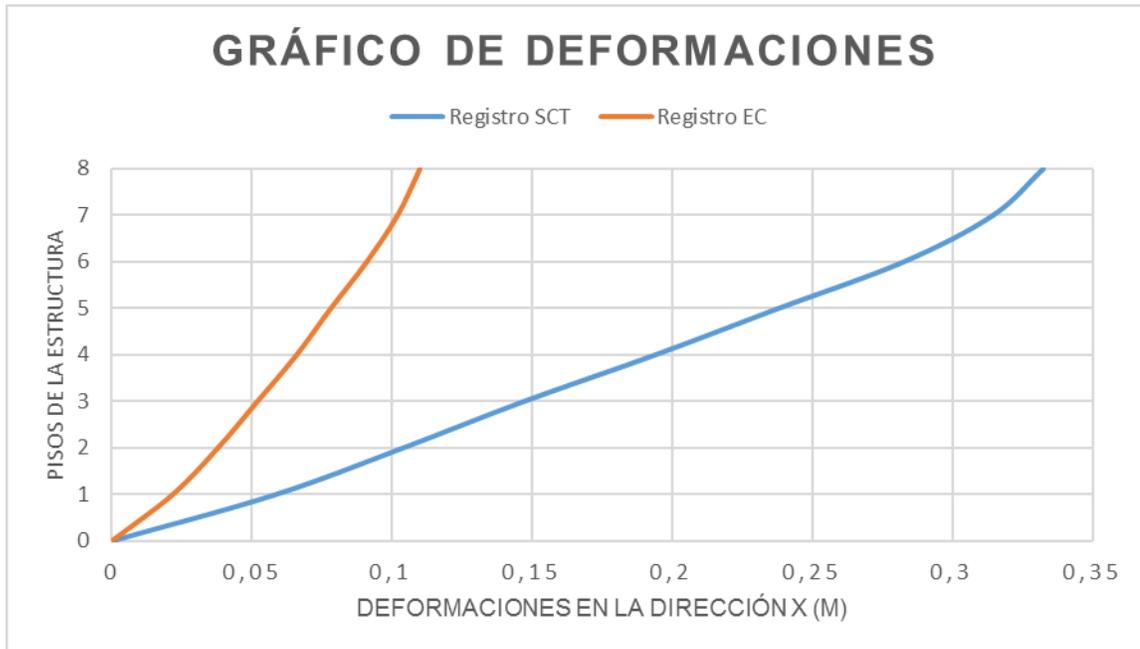


Fig. 6.4.10 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.4.8 y 6.4.9.

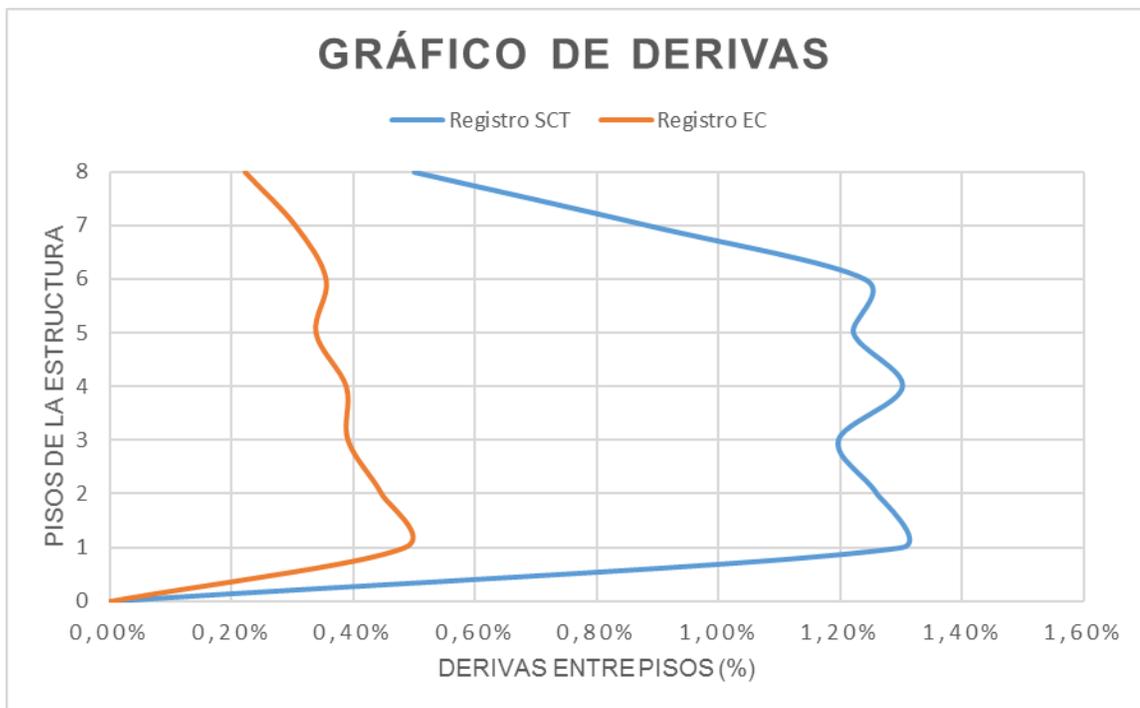


Fig. 6.4.11 Gráfico de las derivas de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.4.8 y 6.4.9.

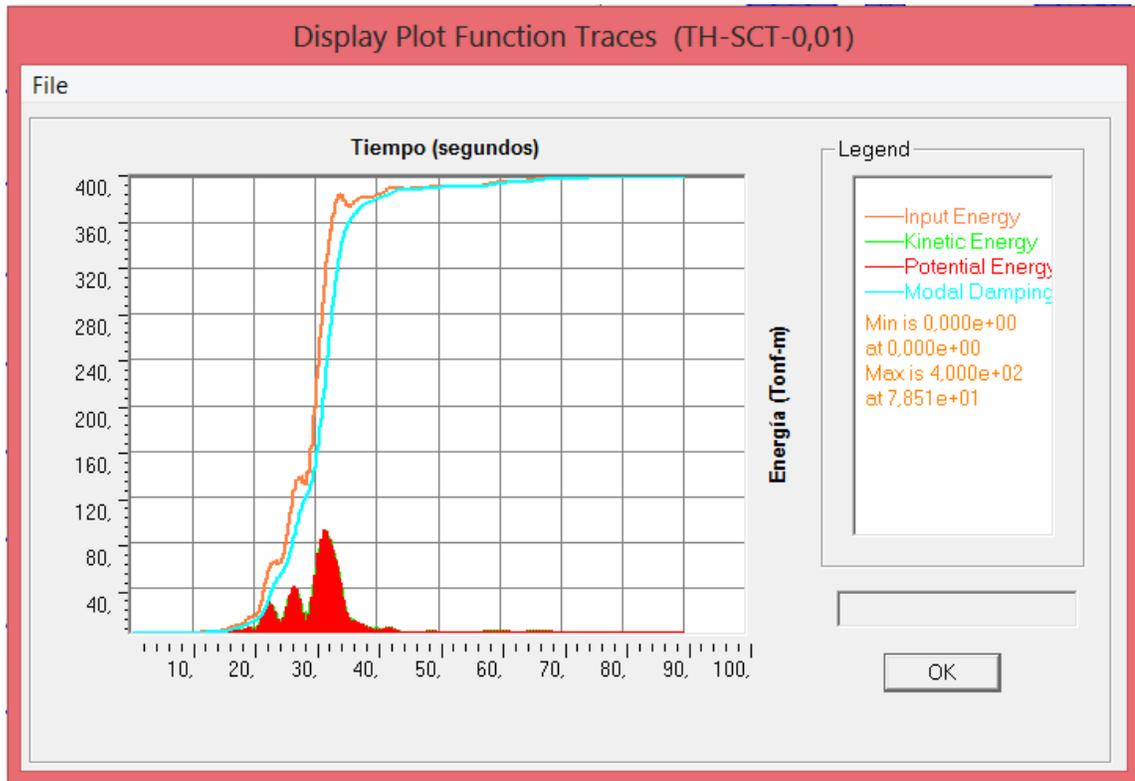


Fig. 6.4.12 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 8 pisos sometido al registro SCT.

	Energía (Tonf-m)			
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal
Registro SCT	400	90,14	90,22	399,9
% Energía de Entrada	100,00%	22,54%	22,56%	99,98%

Tabla 6.4.10 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 8 pisos para el registro SCT.

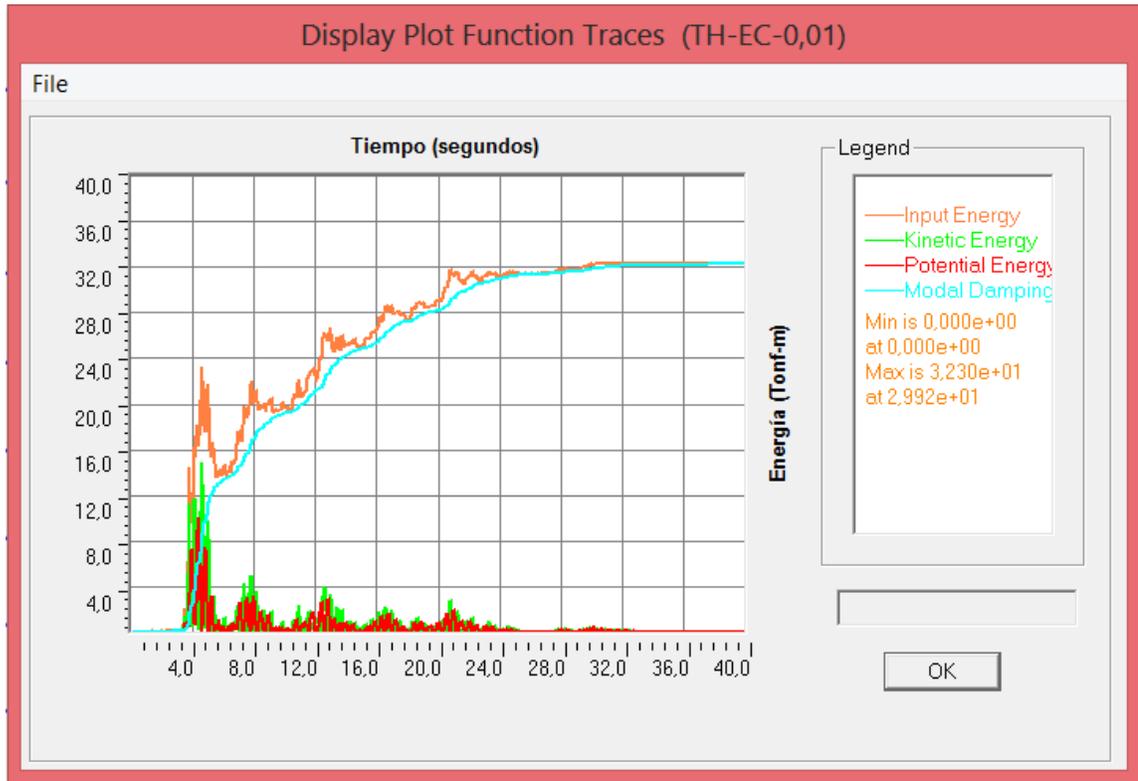


Fig. 6.4.13 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 8 pisos sometido al registro El Centenario.

	Energía (Tonf-m)			
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal
Registro El Centenario	32,3	10,03	14,87	32,24
% Energía de Entrada	100,00%	31,05%	46,04%	99,81%

Tabla 6.4.11 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 8 pisos para el registro El Centenario.

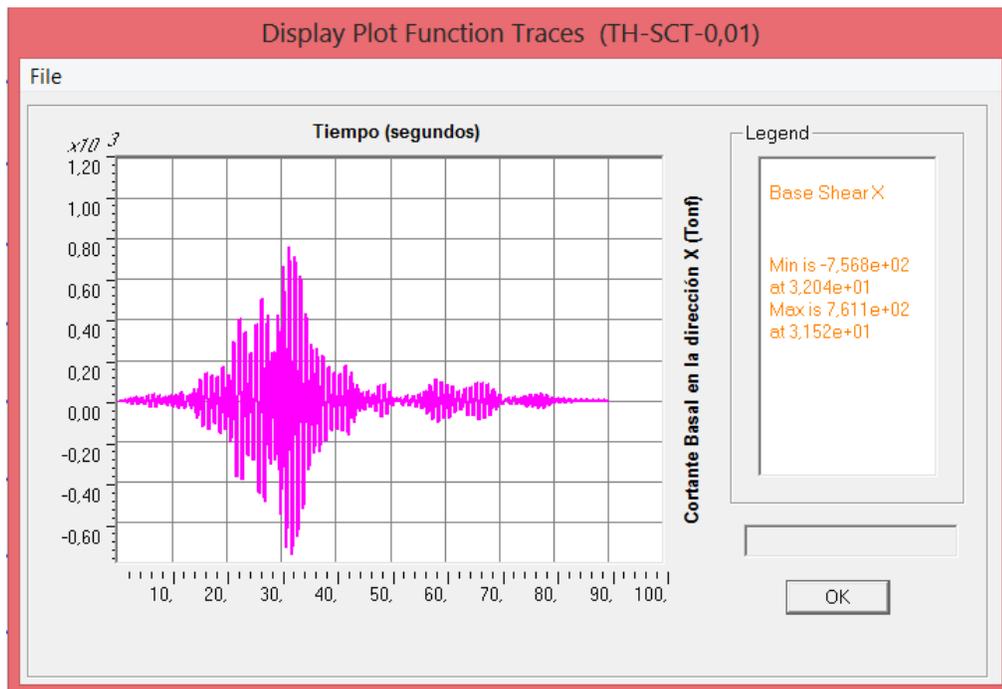


Fig. 6.4.14 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 8 pisos sometido al registro SCT.

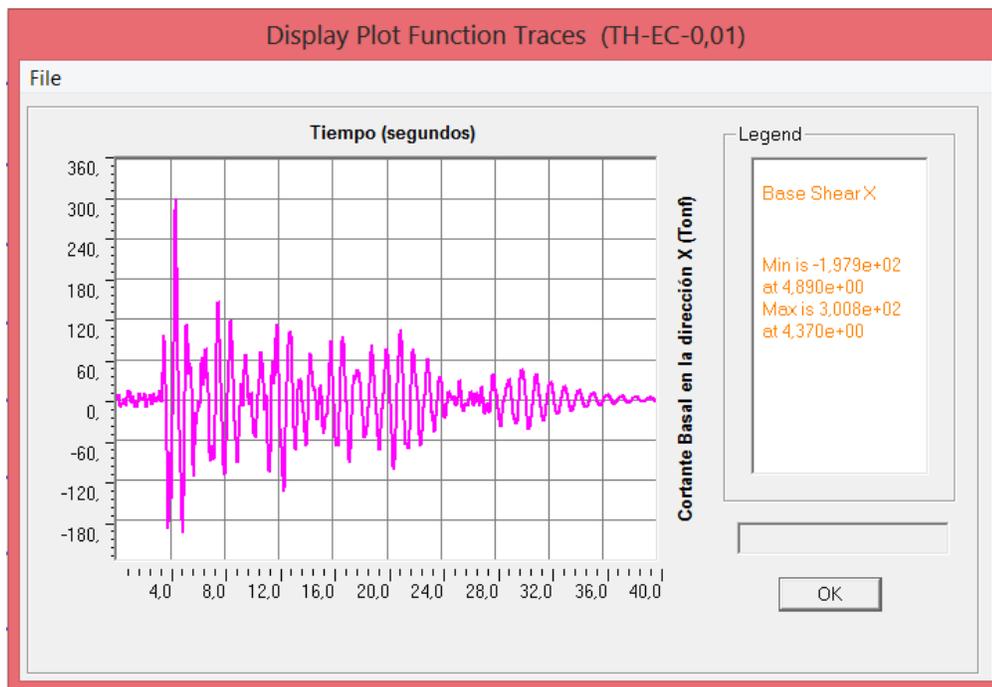


Fig. 6.4.15 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 8 pisos sometido al registro El Centenario.

	Cortante Basal Max. (Tonf)
Registro SCT	761
Registro El Centenario	300,8

Tabla 6.4.12 Cortantes Basales máximos en el pórtico de 8 pisos.

Usando los datos de la Tabla 6.4.12 y el peso total de la estructura, $W_{reactivo} = 1043.93Tonf$ (100% de la carga muerta total y el 25% de la carga viva), se procedió al cálculo del coeficiente de carga lateral (c_L):

Registro SCT: $c_L = V/W_{reactivo} = 0.73$

Registro El Centenario: $c_L = V/W_{reactivo} = 0.29$

Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
33	TH-SCT1-0,01	Max.	134,47	323,36
33	TH-SCT1-0,01	Min.	-135,27	-325,34
33	TH-EC-0,01	Max.	35,63	92,57
33	TH-EC-0,01	Min.	-53,46	-127,98
34	TH-SCT1-0,01	Max.	148,04	215,59
34	TH-SCT1-0,01	Min.	-149,45	-217,75
34	TH-EC-0,01	Max.	41,16	77,93
34	TH-EC-0,01	Min.	-54,83	-78,36
35	TH-SCT1-0,01	Max.	130,03	192,00
35	TH-SCT1-0,01	Min.	-131,63	-189,68
35	TH-EC-0,01	Max.	36,50	64,11
35	TH-EC-0,01	Min.	-42,66	-57,82
36	TH-SCT1-0,01	Max.	114,50	165,70
36	TH-SCT1-0,01	Min.	-115,86	-167,40
36	TH-EC-0,01	Max.	40,92	61,42
36	TH-EC-0,01	Min.	-38,57	-57,23
37	TH-SCT1-0,01	Max.	94,88	140,45

37	TH-SCT1-0,01	Min.	-95,28	-139,60
37	TH-EC-0,01	Max.	40,95	60,86
37	TH-EC-0,01	Min.	-35,67	-58,99
38	TH-SCT1-0,01	Max.	71,06	107,92
38	TH-SCT1-0,01	Min.	-70,58	-108,53
38	TH-EC-0,01	Max.	34,02	50,65
38	TH-EC-0,01	Min.	-26,83	-50,94
39	TH-SCT1-0,01	Max.	44,26	72,28
39	TH-SCT1-0,01	Min.	-43,88	-72,94
39	TH-EC-0,01	Max.	26,66	38,42
39	TH-EC-0,01	Min.	-15,93	-41,56
40	TH-SCT1-0,01	Max.	15,55	28,07
40	TH-SCT1-0,01	Min.	-15,51	-28,16
40	TH-EC-0,01	Max.	13,20	17,61
40	TH-EC-0,01	Min.	-8,98	-22,32

Tabla 6.4.13 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 8 pisos, producidas por los registros.

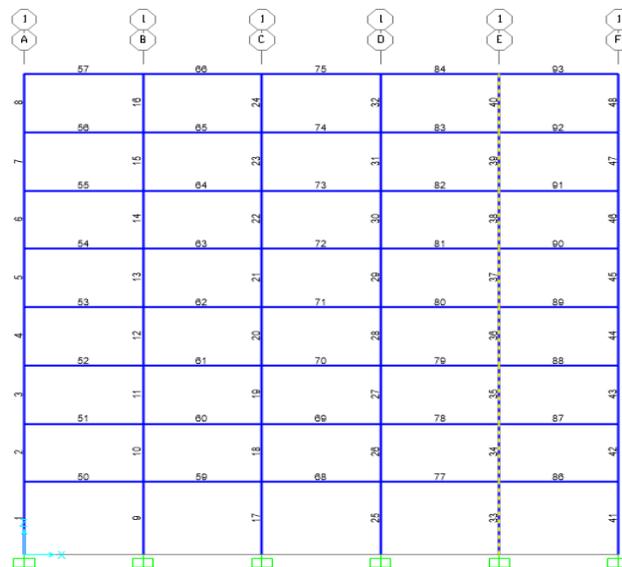


Fig. 6.4.16 Columnas seleccionadas para la obtención de las fuerzas internas mostradas en la Tabla 6.4.13.

Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
77	TH-SCT1-0,01	Max.	88,74	241,39
77	TH-SCT1-0,01	Min.	-89,43	-243,26
77	TH-EC-0,01	Max.	24,09	90,52
77	TH-EC-0,01	Min.	-33,81	-92,03
78	TH-SCT1-0,01	Max.	83,02	227,15
78	TH-SCT1-0,01	Min.	-83,87	-225,75
78	TH-EC-0,01	Max.	23,01	78,42
78	TH-EC-0,01	Min.	-28,95	-77,94
79	TH-SCT1-0,01	Max.	75,82	207,34
79	TH-SCT1-0,01	Min.	-76,66	-206,62
79	TH-EC-0,01	Max.	23,12	64,83
79	TH-EC-0,01	Min.	-23,96	-64,57
80	TH-SCT1-0,01	Max.	64,13	176,56
80	TH-SCT1-0,01	Min.	-64,57	-175,35
80	TH-EC-0,01	Max.	24,34	66,18
80	TH-EC-0,01	Min.	-22,46	-66,49
81	TH-SCT1-0,01	Max.	51,08	139,61
81	TH-SCT1-0,01	Min.	-51,02	-139,78
81	TH-EC-0,01	Max.	21,86	59,40
81	TH-EC-0,01	Min.	-18,83	-59,72
82	TH-SCT1-0,01	Max.	35,41	97,17
82	TH-SCT1-0,01	Min.	-35,14	-97,90
82	TH-EC-0,01	Max.	17,29	47,39
82	TH-EC-0,01	Min.	-12,51	-47,68
83	TH-SCT1-0,01	Max.	19,94	54,96
83	TH-SCT1-0,01	Min.	-19,79	-55,38
83	TH-EC-0,01	Max.	11,95	32,72
83	TH-EC-0,01	Min.	-7,62	-33,00
84	TH-SCT1-0,01	Max.	6,54	18,74
84	TH-SCT1-0,01	Min.	-6,50	-18,84
84	TH-EC-0,01	Max.	4,63	12,65
84	TH-EC-0,01	Min.	-3,22	-13,03

Tabla 6.4.14 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al octavo piso, producidas por los registros.

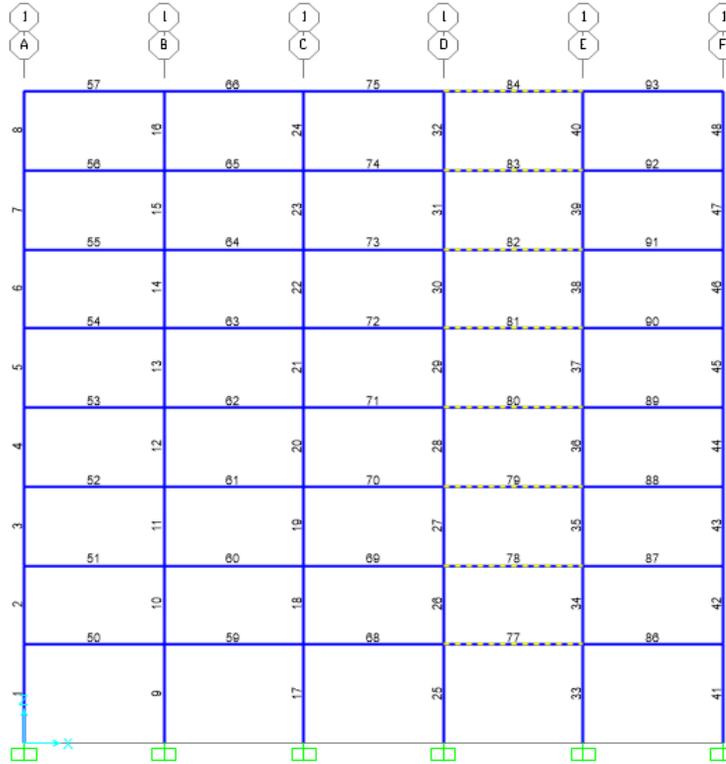


Fig. 6.4.17 Vigas seleccionadas para la obtención de las fuerzas internas mostradas en la Tabla 6.4.14.

- Pórtico de 12 Pisos

Registro SCT

Pisos	Dato del Programa			< ΔM	
	h (m)	δ (m)	Δ (Obtenido)		
12	3,6	0,3472	0,31%	2,00%	Ok
11	3,6	0,3361	0,54%	2,00%	Ok
10	3,6	0,3165	0,74%	2,00%	Ok
9	3,6	0,29	0,80%	2,00%	Ok
8	3,6	0,2612	0,89%	2,00%	Ok
7	3,6	0,2291	0,94%	2,00%	Ok
6	3,6	0,1952	0,92%	2,00%	Ok
5	3,6	0,162	0,94%	2,00%	Ok
4	3,6	0,1283	0,93%	2,00%	Ok

3	3,6	0,0947	0,87%	2,00%	Ok
2	3,6	0,0634	0,87%	2,00%	Ok
1	4,5	0,0322	0,72%	2,00%	Ok

Tabla 6.4.15 Deformaciones y Derivas de pisos para t=34.14s (momento de la deformación máx. del piso 12).

Registro El Centenario

Pisos	Dato del Programa			< ΔM	
	h (m)	δ (m)	Δ (Obtenido)		
12	3,6	0,1073	0,19%	2,00%	Ok
11	3,6	0,1006	0,34%	2,00%	Ok
10	3,6	0,0885	0,43%	2,00%	Ok
9	3,6	0,0731	0,40%	2,00%	Ok
8	3,6	0,0588	0,37%	2,00%	Ok
7	3,6	0,0455	0,32%	2,00%	Ok
6	3,6	0,0339	0,26%	2,00%	Ok
5	3,6	0,0244	0,22%	2,00%	Ok
4	3,6	0,0166	0,16%	2,00%	Ok
3	3,6	0,0108	0,12%	2,00%	Ok
2	3,6	0,0066	0,09%	2,00%	Ok
1	4,5	0,0032	0,07%	2,00%	Ok

Tabla 6.4.16 Deformaciones y Derivas máximas de pisos para t=4.02s (momento de la deformación máx. del piso 12).

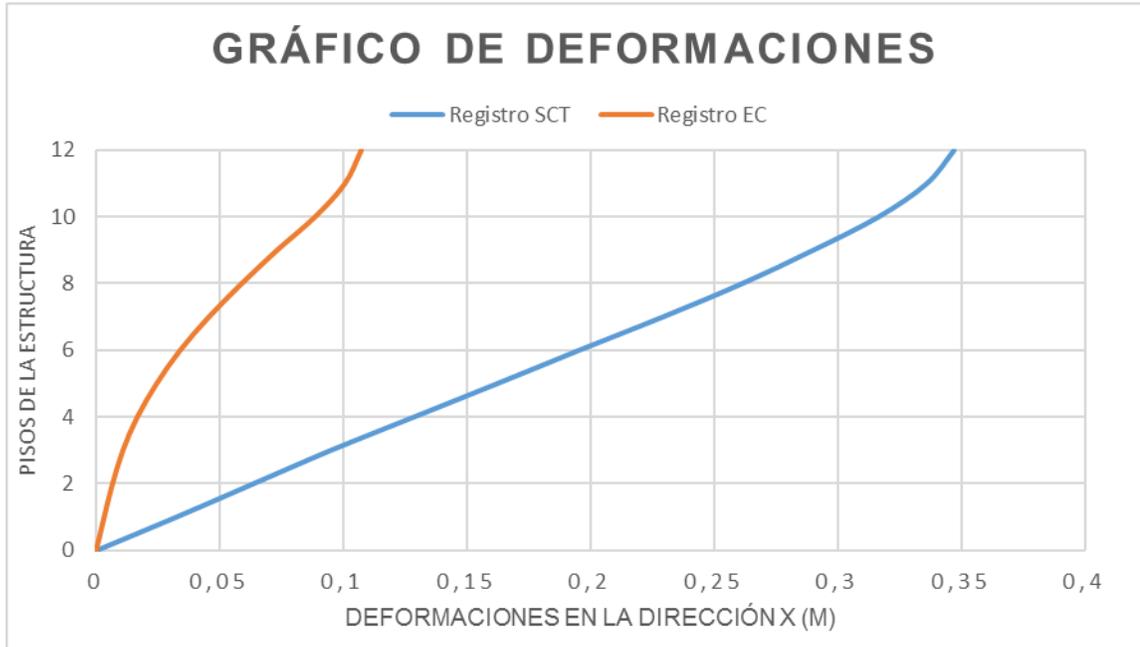


Fig. 6.4.18 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basado en las Tablas 6.4.15 y 6.4.16.

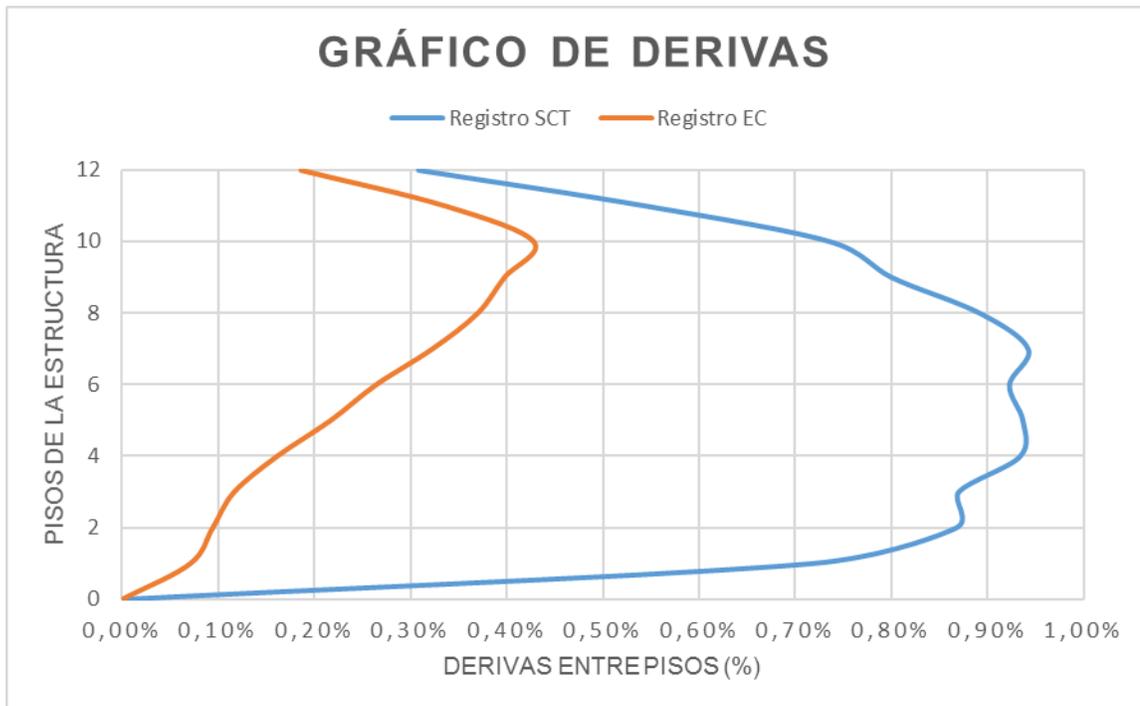


Fig. 6.4.19 Gráfico de las derivas de piso en la dirección X basado en las Tablas 6.4.15 y 6.4.16.

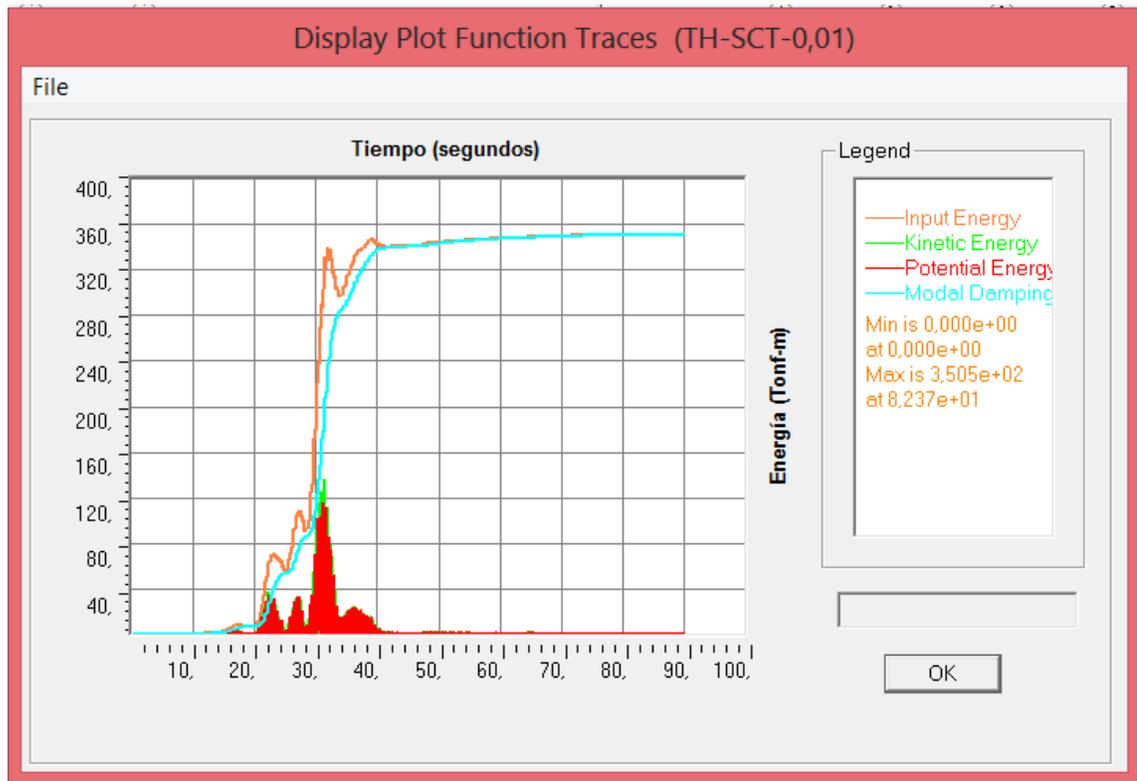


Fig. 6.4.20 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 12 pisos sometido al registro SCT.

	Energía (Tonf-m)			
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal
Registro SCT	350,5	115	135,9	350,5
% Energía de Entrada	100,00%	32,81%	38,77%	100,00%

Tabla 6.4.17 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 12 pisos para el registro SCT.

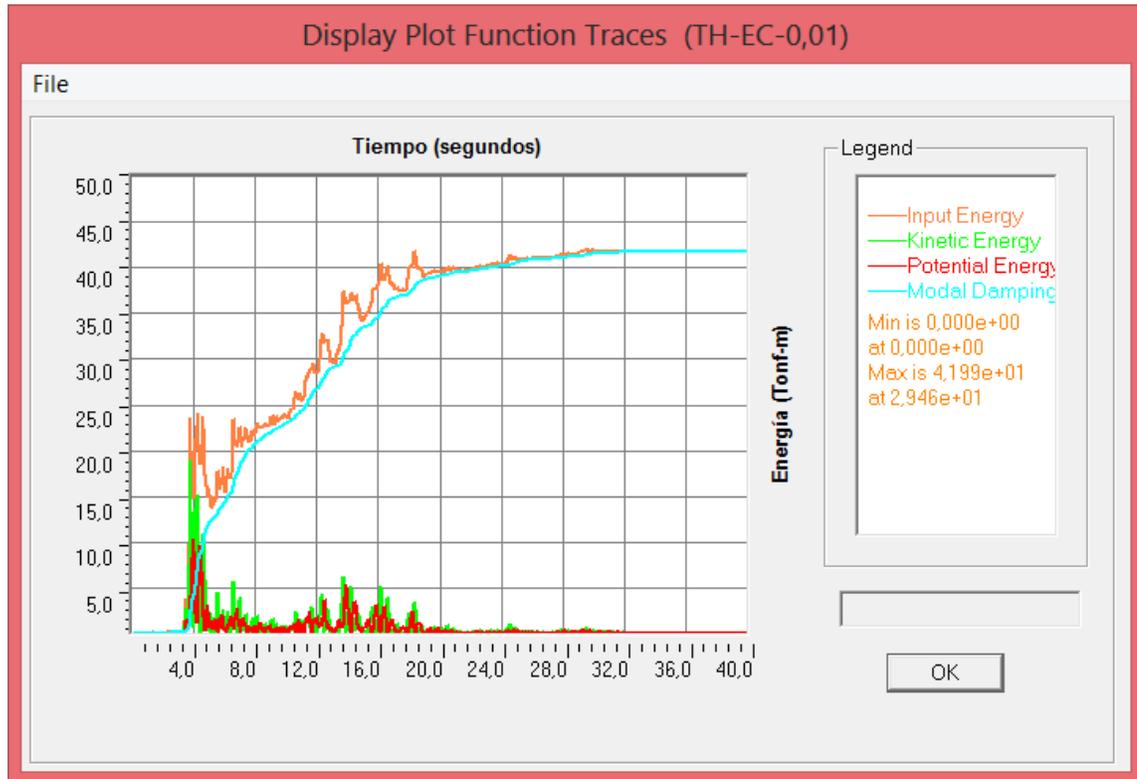


Fig. 6.4.21 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 12 pisos sometido al registro El Centenario.

	Energía (Tonf-m)			
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal
Registro El Centenario	41,99	10,28	18,95	41,78
% Energía de Entrada	100,00%	24,48%	45,13%	99,50%

Tabla 6.4.18 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 8 pisos para el registro El Centenario.

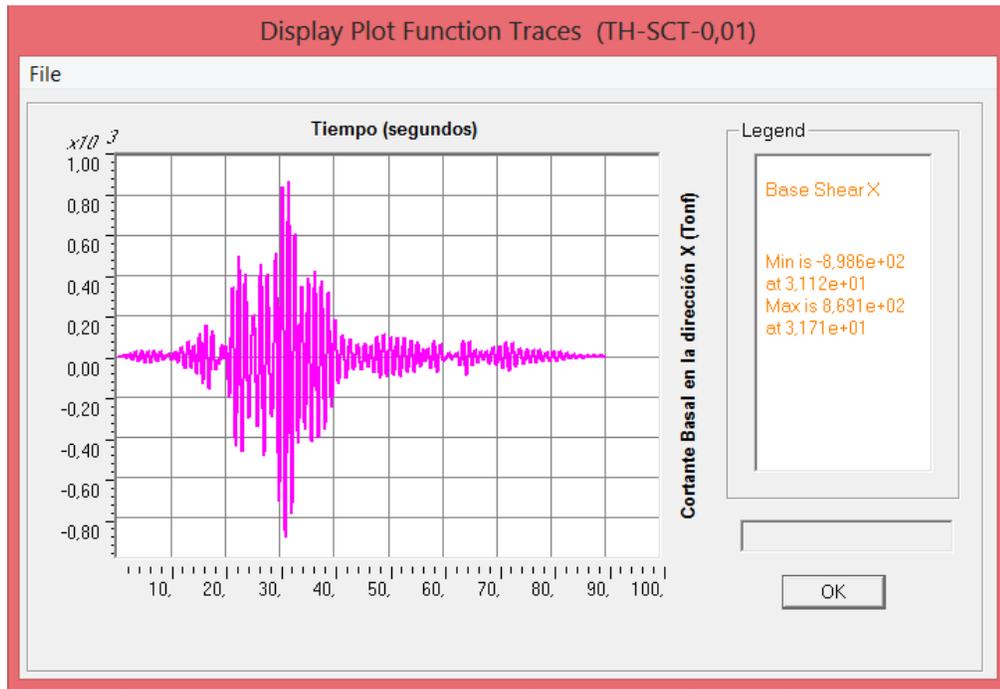


Fig. 6.4.22 Gráfica que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 12 pisos sometido al registro SCT.

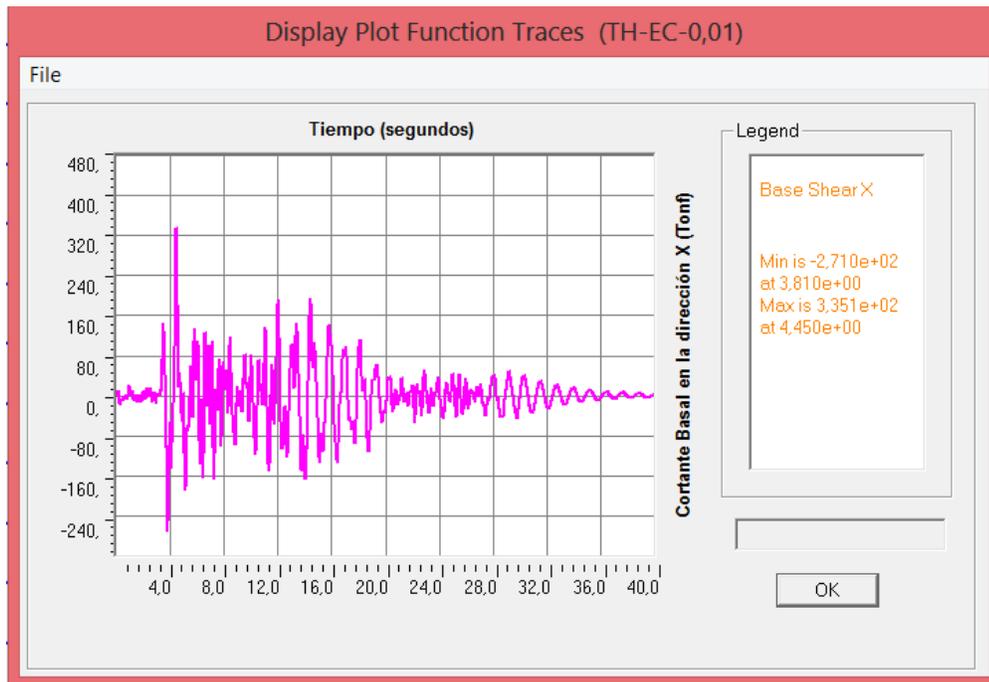


Fig. 6.4.23 Gráfica que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 12 pisos sometido al registro El Centenario.

	Cortante Basal Max. (Tonf)
Registro SCT	898,6
Registro El Centenario	335,1

Tabla 6.4.19 Cortantes Basales máximos en el pórtico de 12 pisos.

Usando los datos de la Tabla 6.4.19 y el peso total de la estructura, $W_{reactivo} = 1795.55 \text{Tonf}$ (100% de la carga muerta total y el 25% de la carga viva), se procedió al cálculo del coeficiente de carga lateral (c_L):

Registro SCT: $c_L = \frac{V}{W_{reactivo}} = 0.5$

Registro El Centenario: $c_L = \frac{V}{W_{reactivo}} = 0.19$

Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
49	TH-SCT-0,01	Max.	168,83	464,09
49	TH-SCT-0,01	Min.	-163,36	-449,22
49	TH-EC-0,01	Max.	51,41	139,02
49	TH-EC-0,01	Min.	-63,32	-173,35
50	TH-SCT-0,01	Max.	177,69	324,41
50	TH-SCT-0,01	Min.	-172,33	-315,34
50	TH-EC-0,01	Max.	51,69	118,36
50	TH-EC-0,01	Min.	-65,73	-118,33
51	TH-SCT-0,01	Max.	171,85	308,17
51	TH-SCT-0,01	Min.	-166,90	-310,48
51	TH-EC-0,01	Max.	50,51	111,58
51	TH-EC-0,01	Min.	-59,83	-103,80
52	TH-SCT-0,01	Max.	164,39	295,50
52	TH-SCT-0,01	Min.	-159,66	-296,33
52	TH-EC-0,01	Max.	47,56	93,31
52	TH-EC-0,01	Min.	-49,59	-87,03
53	TH-SCT-0,01	Max.	155,08	287,26

53	TH-SCT-0,01	Min.	-150,53	-278,99
53	TH-EC-0,01	Max.	46,12	87,95
53	TH-EC-0,01	Min.	-45,85	-84,66
54	TH-SCT-0,01	Max.	143,36	255,78
54	TH-SCT-0,01	Min.	-139,59	-263,14
54	TH-EC-0,01	Max.	51,25	96,25
54	TH-EC-0,01	Min.	-40,67	-88,80
55	TH-SCT-0,01	Max.	124,56	223,55
55	TH-SCT-0,01	Min.	-122,27	-224,86
55	TH-EC-0,01	Max.	54,87	102,49
55	TH-EC-0,01	Min.	-34,49	-95,27
56	TH-SCT-0,01	Max.	106,47	192,48
56	TH-SCT-0,01	Min.	-106,03	-192,58
56	TH-EC-0,01	Max.	53,52	99,44
56	TH-EC-0,01	Min.	-27,47	-94,08
57	TH-SCT-0,01	Max.	88,83	170,89
57	TH-SCT-0,01	Min.	-90,11	-169,38
57	TH-EC-0,01	Max.	48,50	84,91
57	TH-EC-0,01	Min.	-23,44	-90,75
58	TH-SCT-0,01	Max.	65,05	123,57
58	TH-SCT-0,01	Min.	-67,37	-119,91
58	TH-EC-0,01	Max.	41,32	76,69
58	TH-EC-0,01	Min.	-28,68	-72,52
59	TH-SCT-0,01	Max.	40,61	90,53
59	TH-SCT-0,01	Min.	-42,62	-86,58
59	TH-EC-0,01	Max.	32,78	52,90
59	TH-EC-0,01	Min.	-24,89	-65,11
60	TH-SCT-0,01	Max.	14,15	36,51
60	TH-SCT-0,01	Min.	-14,97	-34,63
60	TH-EC-0,01	Max.	15,00	24,57
60	TH-EC-0,01	Min.	-11,00	-33,24

Tabla 6.4.20 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Columnas del Eje 1-E del pódico de 12 pisos, producidas por los registros.

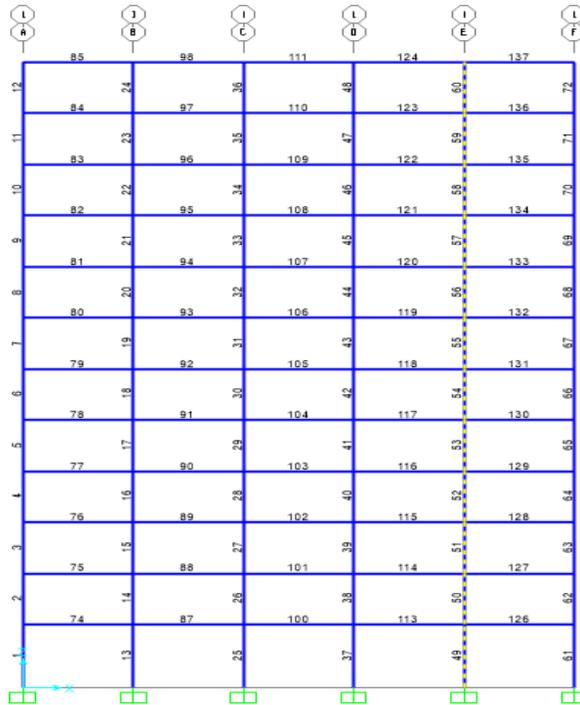


Fig. 6.4.24 Columnas seleccionadas para la obtención de las fuerzas internas mostradas en la Tabla 6.4.20.

Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
113	TH-SCT-0,01	Max.	102,80	267,48
113	TH-SCT-0,01	Min.	-99,65	-267,07
113	TH-EC-0,01	Max.	29,44	98,23
113	TH-EC-0,01	Min.	-37,83	-98,51
114	TH-SCT-0,01	Max.	105,89	274,72
114	TH-SCT-0,01	Min.	-102,83	-275,93
114	TH-EC-0,01	Max.	29,39	97,34
114	TH-EC-0,01	Min.	-37,39	-97,07
115	TH-SCT-0,01	Max.	103,97	269,45
115	TH-SCT-0,01	Min.	-101,06	-271,18
115	TH-EC-0,01	Max.	28,72	86,98
115	TH-EC-0,01	Min.	-33,38	-86,60
116	TH-SCT-0,01	Max.	101,09	264,08
116	TH-SCT-0,01	Min.	-98,27	-266,63
116	TH-EC-0,01	Max.	28,04	76,19

116	TH-EC-0,01	Min.	-28,92	-75,62
117	TH-SCT-0,01	Max.	91,68	239,43
117	TH-SCT-0,01	Min.	-89,26	-241,87
117	TH-EC-0,01	Max.	28,67	74,92
117	TH-EC-0,01	Min.	-26,02	-75,59
118	TH-SCT-0,01	Max.	86,07	224,78
118	TH-SCT-0,01	Min.	-84,26	-227,08
118	TH-EC-0,01	Max.	32,85	85,95
118	TH-EC-0,01	Min.	-23,63	-86,53
119	TH-SCT-0,01	Max.	80,44	214,97
119	TH-SCT-0,01	Min.	-79,56	-217,34
119	TH-EC-0,01	Max.	36,18	94,21
119	TH-EC-0,01	Min.	-20,73	-97,53
120	TH-SCT-0,01	Max.	61,53	164,39
120	TH-SCT-0,01	Min.	-61,73	-163,87
120	TH-EC-0,01	Max.	30,38	80,26
120	TH-EC-0,01	Min.	-15,43	-80,73
121	TH-SCT-0,01	Max.	51,50	140,44
121	TH-SCT-0,01	Min.	-52,49	-137,83
121	TH-EC-0,01	Max.	27,73	73,04
121	TH-EC-0,01	Min.	-16,21	-73,94
122	TH-SCT-0,01	Max.	33,33	92,98
122	TH-SCT-0,01	Min.	-34,46	-91,39
122	TH-EC-0,01	Max.	21,33	56,79
122	TH-EC-0,01	Min.	-15,18	-57,32
123	TH-SCT-0,01	Max.	20,84	58,76
123	TH-SCT-0,01	Min.	-21,65	-57,07
123	TH-EC-0,01	Max.	15,41	40,93
123	TH-EC-0,01	Min.	-11,28	-41,51
124	TH-SCT-0,01	Max.	8,14	23,38
124	TH-SCT-0,01	Min.	-8,44	-22,58
124	TH-EC-0,01	Max.	6,32	16,65
124	TH-EC-0,01	Min.	-4,54	-17,18

Tabla 6.4.21 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al duodécimo piso, producidas por los registros.

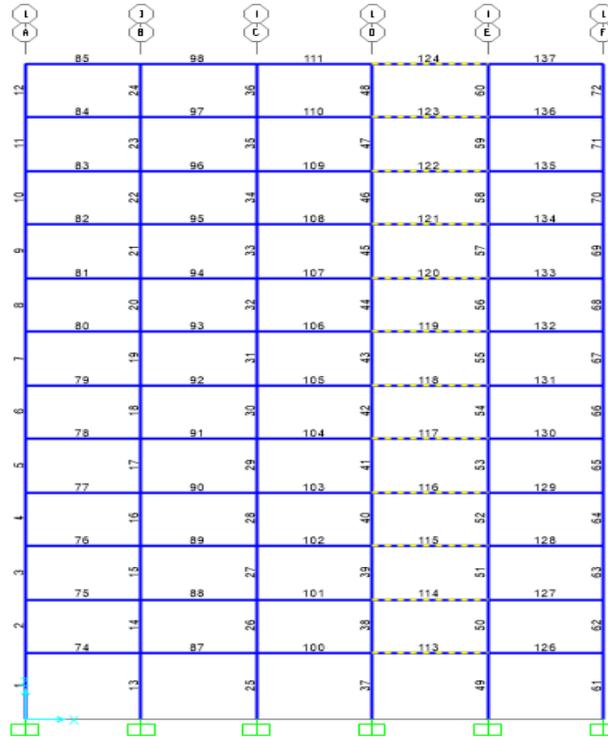


Fig. 6.4.25 Vigas seleccionadas para la obtención de las fuerzas internas mostradas en la Tabla 6.4.21.

6.5. Análisis Dinámico No-Lineal Tiempo-Historia de los pórticos con disipadores

En esta parte del trabajo se analizaron los 3 pórticos con los mismos registros acelerográficos, pero teniendo dentro de su configuración estructural disipadores de fluido viscoso, los cuales se modelaron como elementos “Link”.

Para la definición de las propiedades de estos elementos, se estimó la razón de amortiguamiento crítico de acuerdo a las especificaciones técnicas de los disipadores estipuladas por la empresa TAYLOR DEVICES, estableciéndose un valor de $\xi=20\%$ para el pórtico de 4 pisos; $\xi=30\%$, para el

pórtico de 8 pisos y $\xi=50\%$, para el pórtico de 12 pisos. Tales valores fueron definidos basándose en los resultados obtenidos de varias pruebas con los pórticos, dado que se buscó que los disipadores tomaran la mayor cantidad de energía posible, de tal manera que la estructura incurriera menos en el rango inelástico, teniendo menos daño. A pesar de que el programa SAP2000 no muestra la energía inelástica disipada por los pórticos, (la incluye dentro del amortiguamiento modal) uno espera que la curva de energía disipada por los elementos “Link”, deba encontrarse sobre la curva de energía disipada por el amortiguamiento modal.

Posteriormente, para el cálculo del coeficiente de amortiguamiento por disipador, por piso, se utilizó la fórmula: $c = 2\xi_{disipado}m\omega_n$, con lo cual se tuvo que cuantificar las masas de cada piso y de forma descendente (del último piso al primero), se las acumuló. ω_n fue calculado mediante un despeje de la ec. 2.3.3 (definida en el Cap. 2), teniendo como dato el valor de T_n (obtenido del análisis modal del programa).

Piso	ξ	m (Tonf*s²/m)	m acum. (Tonf*s²/m)	ω_n (rad/s)	C (Tonf*s/m)
4	20,00%	7,10	7,10	8,42	23,92
3	20,00%	12,97	20,08	8,42	67,59
2	20,00%	13,13	33,21	8,42	111,79
1	20,00%	13,71	46,92	8,42	157,95

Tabla 6.5.1 Masas y Coeficientes de amortiguamiento calculados para los diferentes pisos del pórtico de 4 pisos.

Pisos	ξ	m (Tonf*s²/m)	m acum. (Tonf*s²/m)	ω_n (rad/s)	C (Tonf*s/m)
8	30,00%	7,50	7,50	6,00	26,97
7	30,00%	13,28	20,78	6,00	74,76

6	30,00%	13,51	34,29	6,00	123,34
5	30,00%	13,90	48,19	6,00	173,35
4	30,00%	14,03	62,22	6,00	223,82
3	30,00%	14,45	76,67	6,00	275,82
2	30,00%	14,45	91,13	6,00	327,81
1	30,00%	15,58	106,71	6,00	383,86

Tabla 6.5.2 Masas y Coeficientes de amortiguamiento calculados para los diferentes pisos del pórtico de 8 pisos.

Piso	ξ	m (Tonf*s ² /m)	m acum. (Tonf*s ² /m)	ω_n (rad/s)	C (Tonf*s/m)
12	50,00%	8,73	8,73	5,14	44,93
11	50,00%	14,52	23,25	5,14	119,62
10	50,00%	14,52	37,77	5,14	194,31
9	50,00%	15,25	53,02	5,14	272,78
8	50,00%	15,25	68,27	5,14	351,24
7	50,00%	15,67	83,95	5,14	431,87
6	50,00%	16,05	100,00	5,14	514,43
5	50,00%	16,05	116,05	5,14	596,99
4	50,00%	16,21	132,26	5,14	680,40
3	50,00%	16,61	148,87	5,14	765,87
2	50,00%	16,61	165,49	5,14	851,34
1	50,00%	17,43	182,91	5,14	940,98

Tabla 6.5.3 Masas y Coeficientes de amortiguamiento calculados para los diferentes pisos del pórtico de 12 pisos.

6.5.1. Propiedades de los Elementos Link

Los elementos tipo “Link” son aquellos elementos que pueden ser usados para modelar sistemas de protección pasivos. El programa SAP2000 cuenta

con una variedad de opciones que uno puede usar con el propósito de proteger las estructuras de la energía inducida por los sismos, como por ejemplo:

- Lineal
- Mutilineal Elástico
- Multilineal Plástico
- Amortiguador-Exponencial
- Amortiguador-Bilineal
- Amortiguador-Resorte de Fricción
- Plastic (Wen)
- Aislador de Caucho
- Aislador de Fricción
- Aislador de Fricción T/C
- Aislador de Péndulo Triple

Particularmente, para este trabajo se usará la opción de “Amortiguador-Exponencial” por el hecho de que la fuerza del disipador de fluido viscoso es proporcional a la velocidad elevada a un exponente (α), el cual tendrá un valor de 1 para considerar un comportamiento lineal.

El Amortiguador-Exponencial sirve para modelar un disipador de fluido viscoso tanto lineal como no lineal. De acuerdo con Pardo (2007), el programa Sap2000 se basa en el modelo Viscoelástico de Maxwell para representar a esta clase de disipador. Este se compone de la conexión en serie de un resorte y un amortiguador, dando lugar a que la fuerza en el elemento tenga la siguiente expresión:

$$f = k * \Delta = c * v^\alpha \quad (6.5.1.1)$$

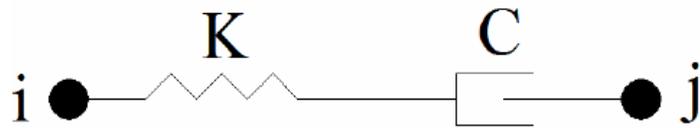


Fig. 6.5.1.1 Modelo Viscoelastico de Maxwell considerado por el Programa Sap2000 para modelar un Disipador Viscoso. (Pardo 2007)

Según Pardo (2007), en el caso de que se requiera considerar un disipador de fluido viscoso con comportamiento no lineal, la rigidez del resorte debería ser infinita y el cociente, entre la rigidez y el coeficiente de amortiguamiento, debería ser magnitud igual a la fuerza de entrada al sistema, dado que valores excesivamente altos de la rigidez pueden afectar a los resultados del programa.

Caso contrario, si se requiere un disipador de fluido viscoso con comportamiento lineal, el programa considera un modelo alternativo, basado en la conexión en paralelo de un resorte con un disipador, por lo que, para obtener una fuerza de salida dependiente netamente de la velocidad en el elemento de disipación, necesariamente la rigidez del resorte debe hacerse 0.

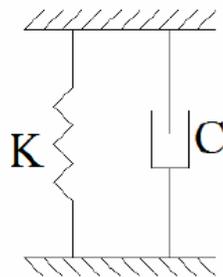


Fig. 6.5.1.2 Modelo alternativo considerado por el Programa Sap2000 para modelar un Disipador Viscoso con comportamiento lineal. (Pardo 2007)

6.5.2. Distribución de los disipadores en la altura de los pórticos

A continuación se ilustra la ubicación y el número de elementos Link utilizados en elevación, así como también, las propiedades asignadas a los mismos:

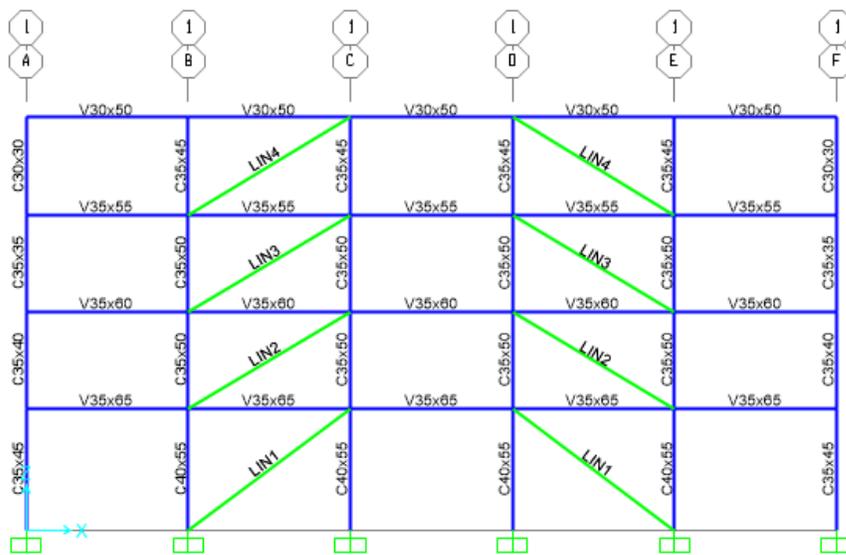


Fig. 6.5.2.1 Pórtico de 4 Pisos con Disipadores.

Link/Support Property Data

Link/Support Type:

Property Name:

Property Notes:

Total Mass and Weight

Mass: Rotational Inertia 1:

Weight: Rotational Inertia 2:

Rotational Inertia 3:

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring:

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs:

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for U1..."/>
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for U2..."/>
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for U3..."/>
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for R1..."/>
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for R2..."/>
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Modify/Show for R3..."/>

P-Delta Parameters

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name:

Direction:

Type:

NonLinear:

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness:

Effective Damping:

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness:

Damping Coefficient:

Damping Exponent:

Fig. 6.5.2.2 a.) y b.) Propiedades del elemento LIN1 del pórtico de 4 Pisos.

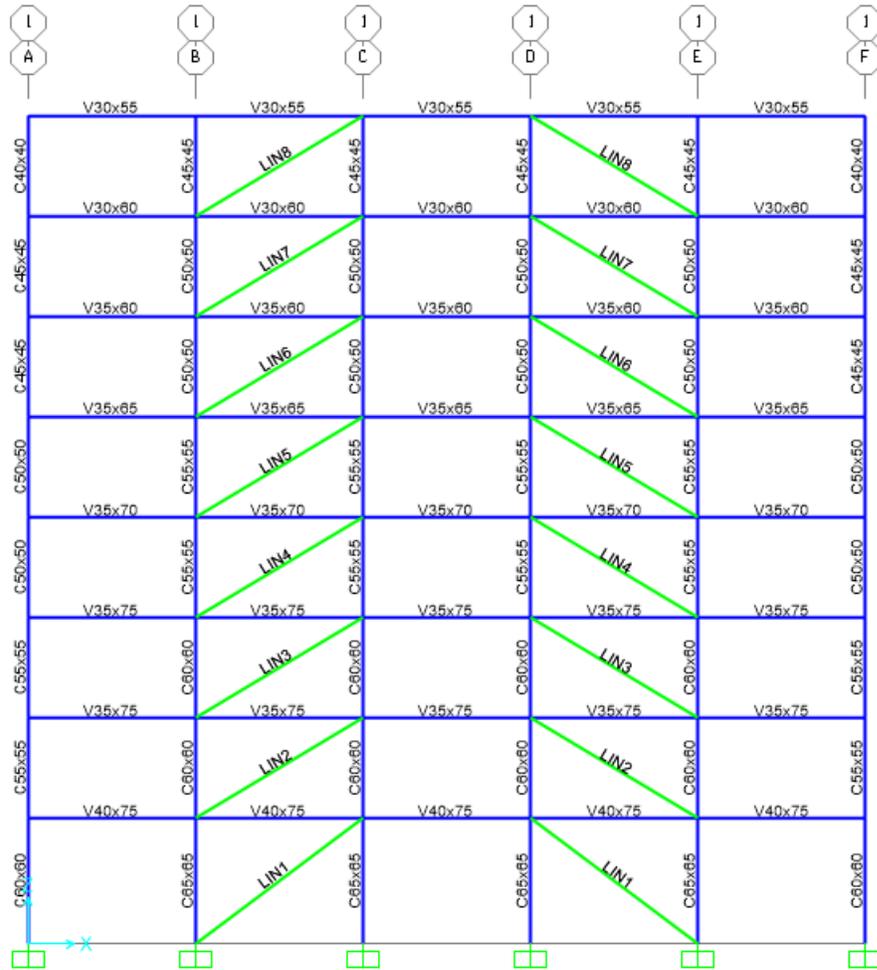


Fig. 6.5.2.3 Pórtico de 8 Pisos con Disipadores.

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Damper - Exponential

Property Name: LIN1 Set Default Name

Property Notes: Modify/Show...

Total Mass and Weight

Mass	<input style="width: 80%;" type="text" value="0."/>	Rotational Inertia 1	<input style="width: 80%;" type="text" value="0."/>
Weight	<input style="width: 80%;" type="text" value="0."/>	Rotational Inertia 2	<input style="width: 80%;" type="text" value="0."/>
		Rotational Inertia 3	<input style="width: 80%;" type="text" value="0."/>

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring:

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs:

Directional Properties			P-Delta Parameters
Direction	Fixed	NonLinear	Advanced...
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	OK Cancel
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Fix All Clear All

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: LIN1

Direction: U1

Type: Damper - Exponential

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness:

Effective Damping:

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness:

Damping Coefficient:

Damping Exponent:

OK
Cancel

Fig. 6.5.2.4 a.) y b.) Propiedades del elemento LIN1 del pórtico de 8 Pisos.

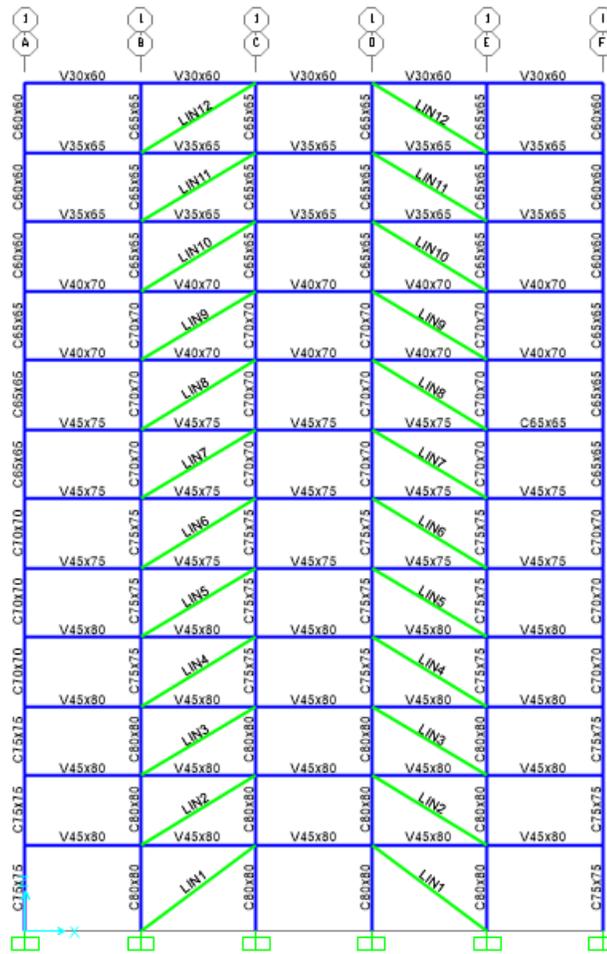


Fig. 6.5.2.5 Pórtico de 12 Pisos con Disipadores.

Link/Support Property Data

Link/Support Type: Damper - Exponential

Property Name: LIN1 Set Default Name

Property Notes: Modify/Show...

Total Mass and Weight

Mass: 0. Rotational Inertia 1: 0.

Weight: 0. Rotational Inertia 2: 0.

Rotational Inertia 3: 0.

Factors For Line, Area, and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1.

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1.

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...
<input type="checkbox"/> U2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...
<input type="checkbox"/> U3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...
<input type="checkbox"/> R1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input type="checkbox"/> R2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

Fix All Clear All

P-Delta Parameters

Advanced...

OK Cancel

Link/Support Directional Properties

Identification

Property Name: LIN1

Direction: U1

Type: Damper - Exponential

NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 0.

Effective Damping: 0.5

Properties Used For Nonlinear Analysis Cases

Stiffness: 1.000E+15

Damping Coefficient: 940.98

Damping Exponent: 1.

OK Cancel

Fig. 6.5.2.6 a.) y b.) Propiedades del elemento LIN1 del pórtico de 8 Pisos.

6.5.3 Resultados Obtenidos

- Pórtico 4 Pisos

Registro SCT

Pisos	Dato del Programa			< ΔM	
	h (m)	δ (m)	Δ (Obtenido)		
4	3,6	0,0524	0,18%	2,00%	Ok
3	3,6	0,0461	0,31%	2,00%	Ok
2	3,6	0,0351	0,41%	2,00%	Ok
1	4,5	0,0204	0,45%	2,00%	Ok

Tabla 6.5.3.1 Deformaciones y Derivas de pisos para t=29.16s (momento de la deformación máx. del piso 4).

Registro El Centenario

Pisos	Dato del Programa			< ΔM	
	h (m)	δ (m)	Δ (Obtenido)		
4	3,6	0,0762	0,28%	2,00%	Ok
3	3,6	0,0663	0,47%	2,00%	Ok
2	3,6	0,0494	0,60%	2,00%	Ok
1	4,5	0,0277	0,62%	2,00%	Ok

Tabla 6.5.3.2 Deformaciones y Derivas de pisos para t=5.36s (momento de la deformación máx. del piso 4).

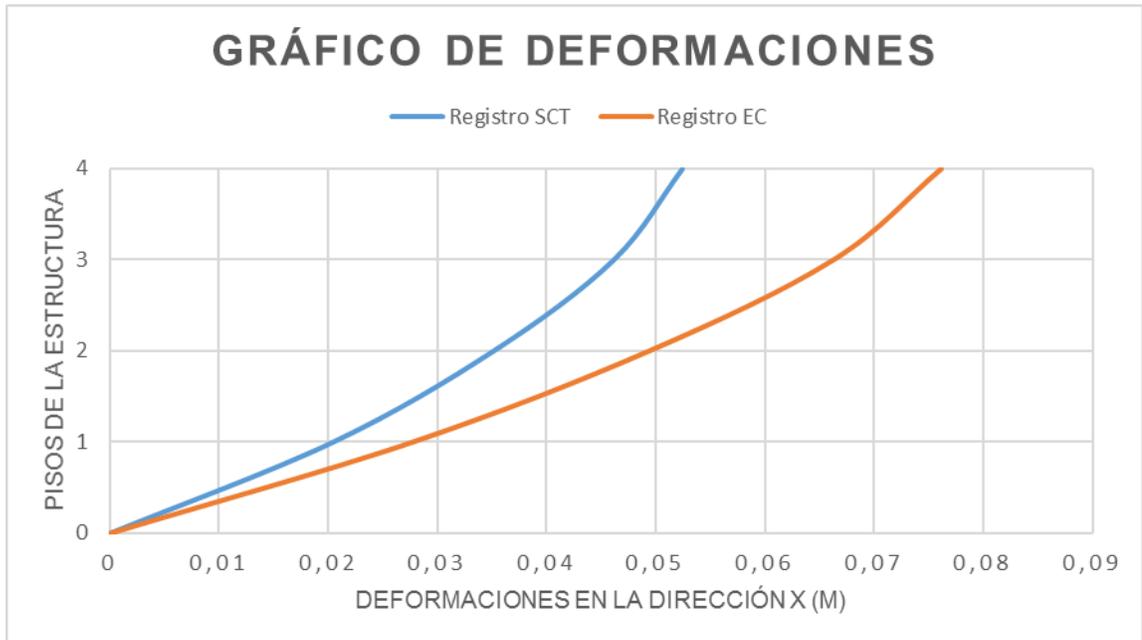


Fig. 6.5.3.1 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.5.3.1 y 6.5.3.2.

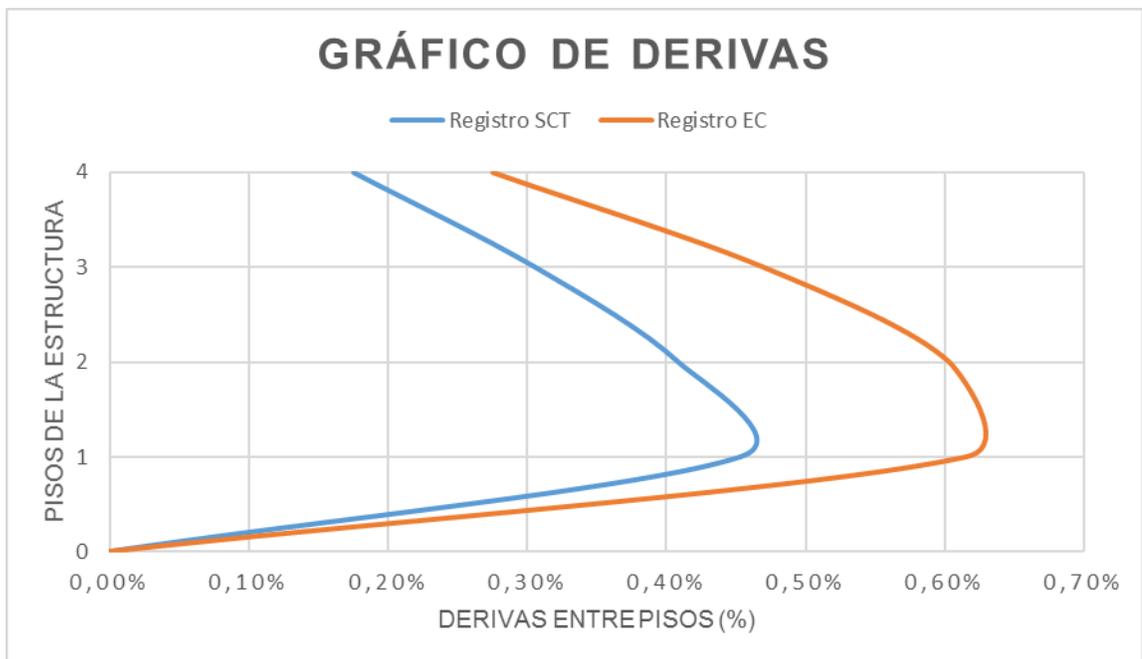


Fig. 6.5.3.2 Gráfico de las derivas de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.5.3.1 y 6.5.3.2.

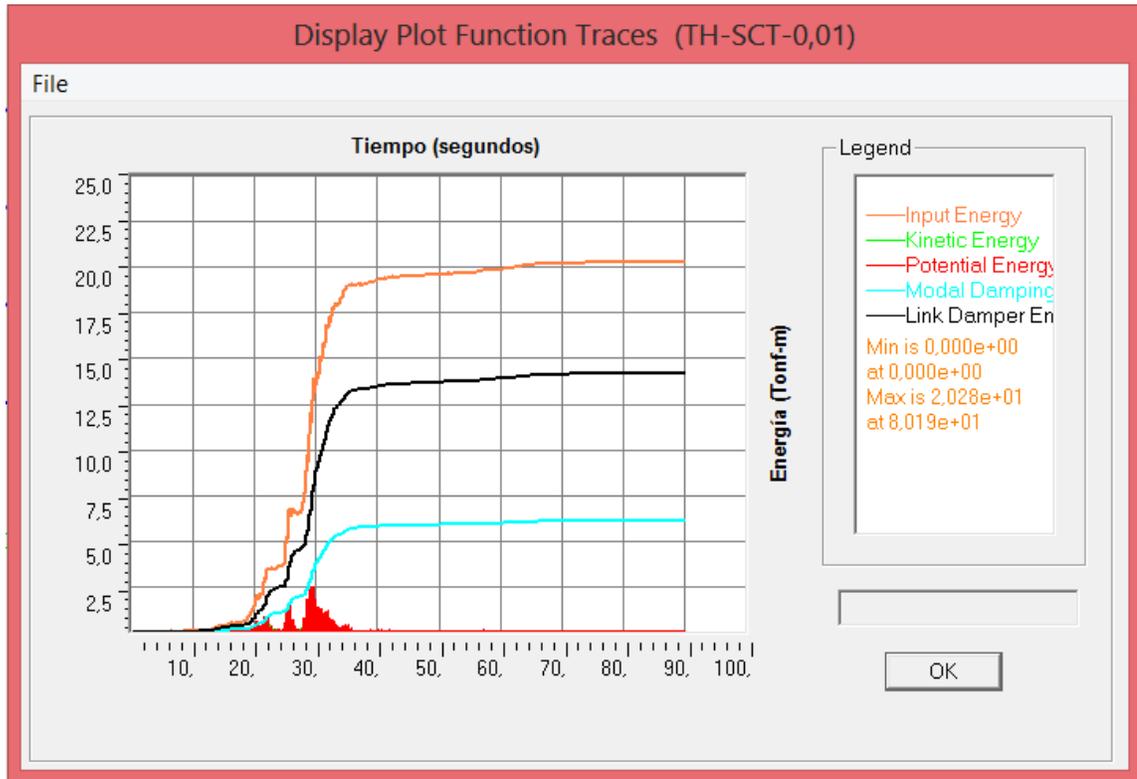


Fig. 6.5.3.3 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 4 pisos sometido al registro SCT.

	Energía (Tonf-m)				
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal	Amortiguamiento Disipador
Registro SCT	20,28	2,472	1,463	6,095	14,18
% Energía de Entrada	100,00%	12,19%	7,21%	30,05%	69,92%

Tabla 6.5.3.3 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 4 pisos para el registro SCT.

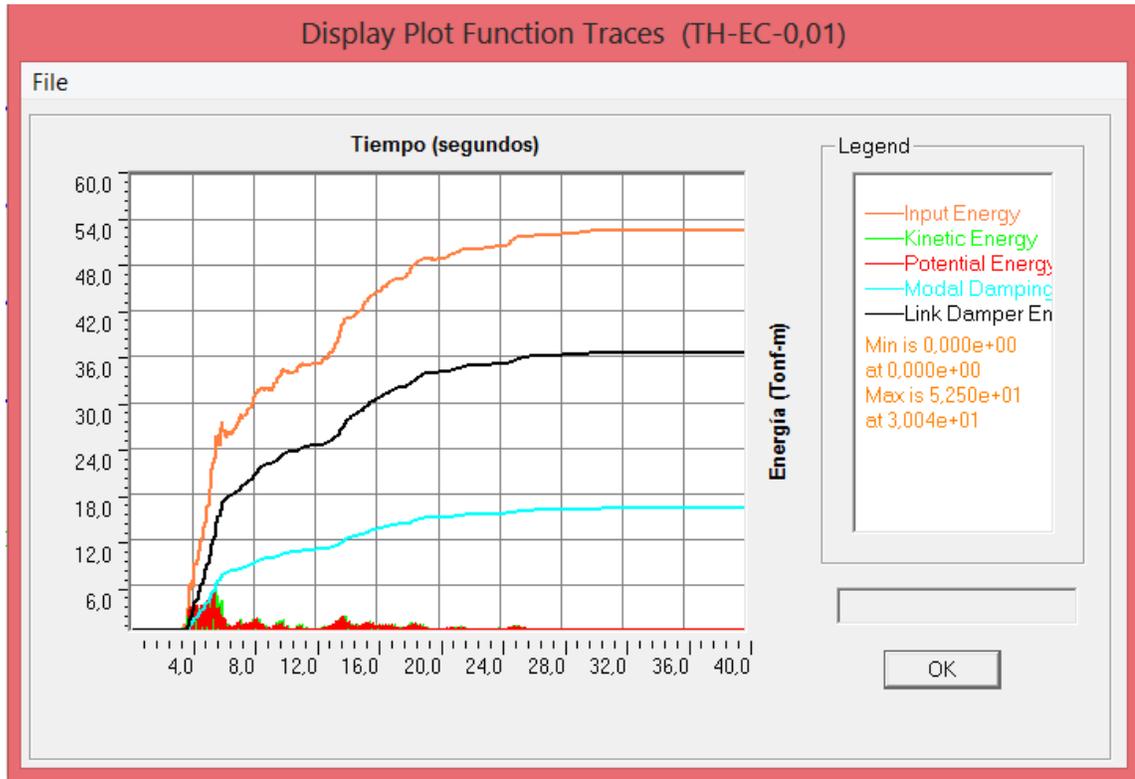


Fig. 6.5.3.4 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 4 pisos sometido al registro El Centenario.

	Energía (Tonf-m)				
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal	Amortiguamiento Disipador
Registro El Centenario	52,5	4,896	5,67	15,98	36,5
% Energía de Entrada	100,00%	9,33%	10,80%	30,44%	69,52%

Tabla 6.5.3.4 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 4 pisos para el registro El Centenario.

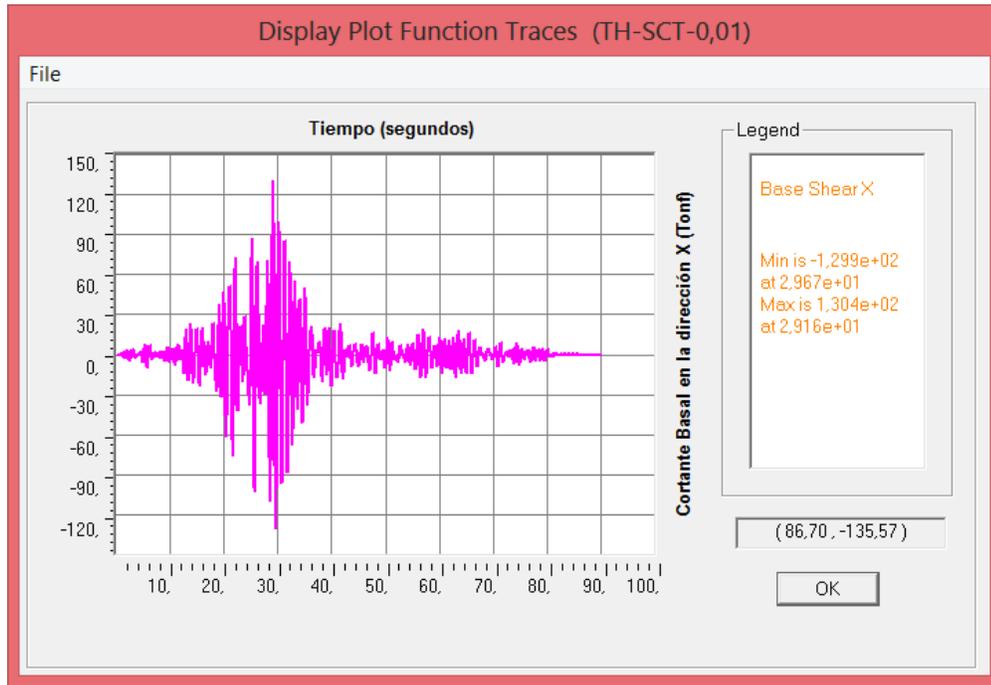


Fig. 6.5.3.5 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 4 pisos sometido al registro SCT.

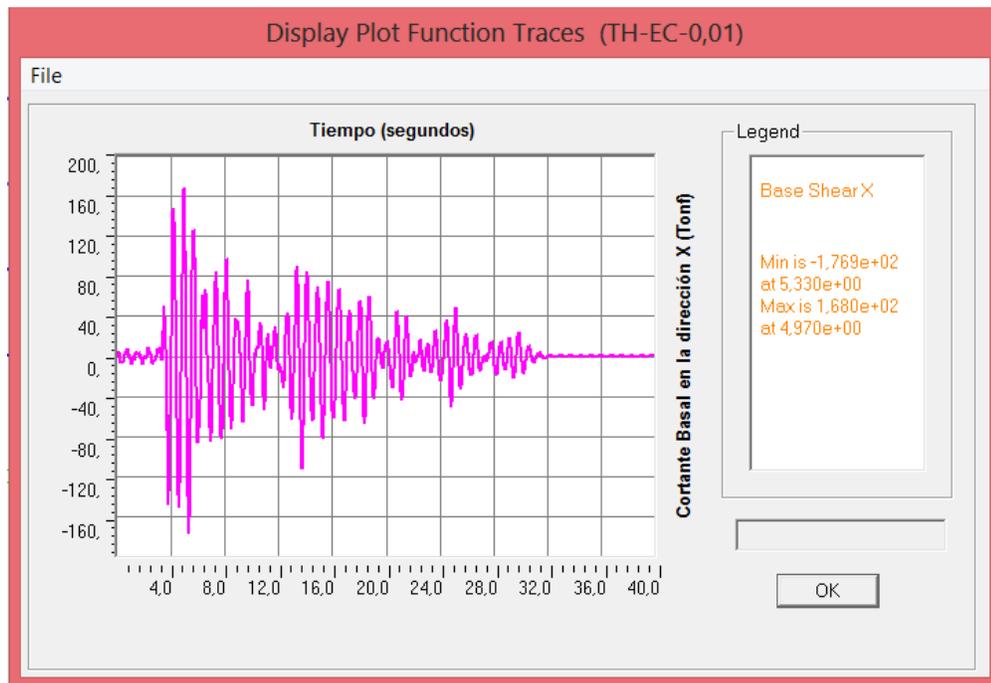


Fig. 6.5.3.6 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 4 pisos sometido al registro El Centenario.

	Cortante Basal Max. (Tonf)
Registro SCT	130,4
Registro El Centenario	176,9

Tabla 6.5.3.5 Cortantes Basales máximos en el pórtico de 4 pisos.

Usando los datos de la Tabla 6.5.3.5 y el peso total de la estructura, $W_{reactivo} = 460.13 \text{Tonf}$ (100% de la carga muerta total y el 25% de la carga viva), se procedió al cálculo del coeficiente de carga lateral (c_L):

Registro SCT: $c_L = V/W_{reactivo} = 0.28$

Registro El Centenario: $c_L = V/W_{reactivo} = 0.38$

Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
17	TH-SCT-0,01	Max.	25,44	60,36
17	TH-SCT-0,01	Min.	-25,62	-60,74
17	TH-EC-0,01	Max.	33,81	80,49
17	TH-EC-0,01	Min.	-31,92	-75,81
18	TH-SCT-0,01	Max.	19,46	29,61
18	TH-SCT-0,01	Min.	-19,38	-29,69
18	TH-EC-0,01	Max.	28,40	41,61
18	TH-EC-0,01	Min.	-25,30	-42,88
19	TH-SCT-0,01	Max.	12,99	20,64
19	TH-SCT-0,01	Min.	-12,97	-20,69
19	TH-EC-0,01	Max.	20,07	28,99
19	TH-EC-0,01	Min.	-17,38	-31,72
20	TH-SCT-0,01	Max.	4,58	8,22
20	TH-SCT-0,01	Min.	-4,65	-8,11
20	TH-EC-0,01	Max.	7,80	12,46
20	TH-EC-0,01	Min.	-7,24	-13,27

Tabla 6.5.3.6 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 4 pisos, producidas por los registros.

Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
41	TH-SCT-0,01	Max.	14,90	40,78
41	TH-SCT-0,01	Min.	-14,94	-40,68
41	TH-EC-0,01	Max.	20,59	56,00
41	TH-EC-0,01	Min.	-18,92	-56,19
42	TH-SCT-0,01	Max.	9,91	27,28
42	TH-SCT-0,01	Min.	-9,88	-27,35
42	TH-EC-0,01	Max.	14,77	40,48
42	TH-EC-0,01	Min.	-12,77	-40,76
43	TH-SCT-0,01	Max.	5,62	15,64
43	TH-SCT-0,01	Min.	-5,63	-15,61
43	TH-EC-0,01	Max.	8,77	23,87
43	TH-EC-0,01	Min.	-7,75	-24,35
44	TH-SCT-0,01	Max.	1,72	4,92
44	TH-SCT-0,01	Min.	-1,74	-4,88
44	TH-EC-0,01	Max.	2,87	7,86
44	TH-EC-0,01	Min.	-2,63	-8,08

Tabla 6.5.3.7 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al cuarto piso, producidas por los registros.

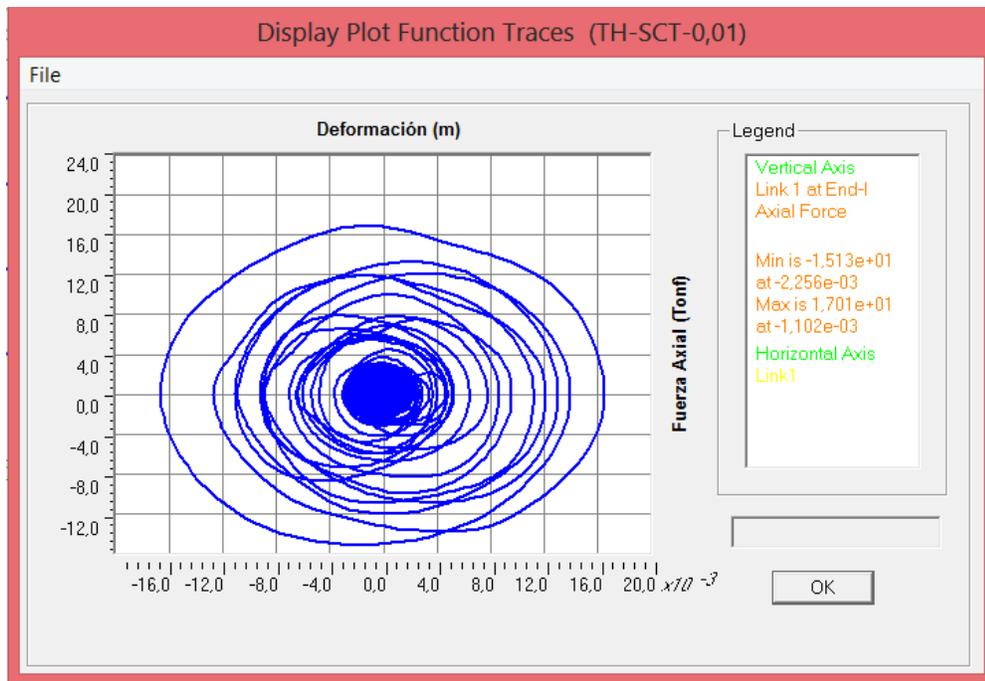


Fig.6.5.3.7 Histéresis elíptica del disipador de fluido viscoso LIN1 sometido al registro SCT.

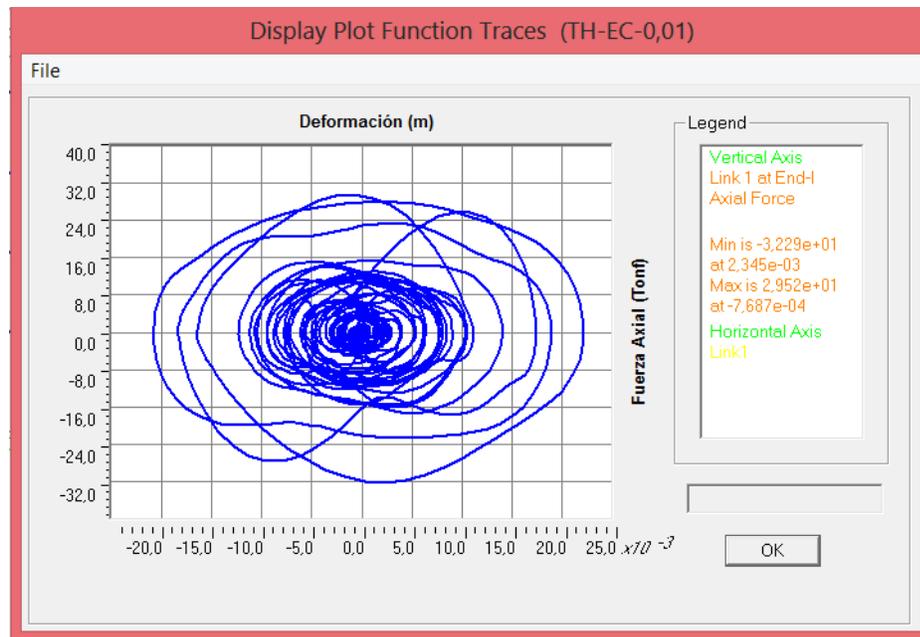


Fig.6.5.3.8 Histéresis elíptica del disipador de fluido viscoso LIN1 sometido al registro de El Centenario.

Una vez corrido el pórtico con los disipadores se procedió a obtener las fuerzas axiales en los elementos “Link” para el registro que genere los mayores efectos, de tal manera que observando el catálogo de productos de la empresa TAYLOR DEVICES, se pueda seleccionar el disipador a instalar, en función de la fuerza máxima que soporta el producto del fabricante.

En el Anexo 16 está la tabla con los diferentes disipadores propuestos por la empresa TAYLOR DEVICES.

A continuación se muestran las fuerzas axiales máximas en los disipadores y el producto seleccionado:

Piso	Fuerza Axial Max. en el Disipador por Piso (Tonf)	Fuerza Axial Max. en el Disipador por Piso (Kip)	Fuerza Axial Max. Disipador Taylor Devices (Kip)
4	2,70	5,94	55
3	9,17	20,17	55
2	18,92	41,62	55
1	32,29	71,04	110

Tabla 6.5.3.8 Fuerzas Axiales Max. producidas por el registro El Centenario y disipador seleccionado.

- Pórtico de 8 Pisos

Registro SCT

Pisos	Dato del Programa				
	h (m)	δ (m)	Δ (Obtenido)	< ΔM	
8	3,6	0,1777	0,27%	2,00%	Ok
7	3,6	0,1679	0,48%	2,00%	Ok
6	3,6	0,1508	0,66%	2,00%	Ok
5	3,6	0,1269	0,65%	2,00%	Ok
4	3,6	0,1034	0,70%	2,00%	Ok
3	3,6	0,0783	0,64%	2,00%	Ok
2	3,6	0,0554	0,67%	2,00%	Ok
1	4,5	0,0312	0,69%	2,00%	Ok

Tabla 6.5.3.9 Deformaciones y Derivas de pisos para t=30.98s (momento de la deformación máx. del piso 8).

Registro El Centenario

Pisos	Dato del Programa				
	h (m)	δ (m)	Δ (Obtenido)	< ΔM	
8	3,6	0,0858	0,14%	2,00%	Ok
7	3,6	0,0807	0,25%	2,00%	Ok
6	3,6	0,0718	0,34%	2,00%	Ok
5	3,6	0,0596	0,33%	2,00%	Ok
4	3,6	0,0478	0,34%	2,00%	Ok
3	3,6	0,0356	0,30%	2,00%	Ok
2	3,6	0,0247	0,31%	2,00%	Ok
1	4,5	0,0137	0,30%	2,00%	Ok

Tabla 6.5.3.10 Deformaciones y Derivas de pisos para t=4.39s (momento de la deformación máx. del piso 8).

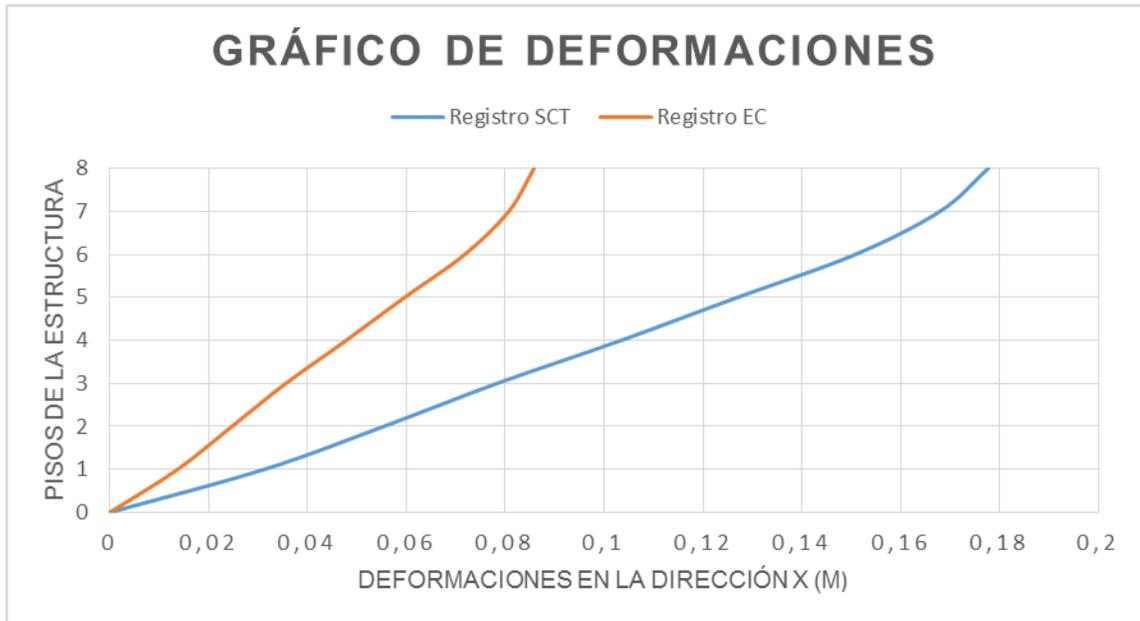


Fig. 6.5.3.9 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.5.3.9 y 6.5.3.10.

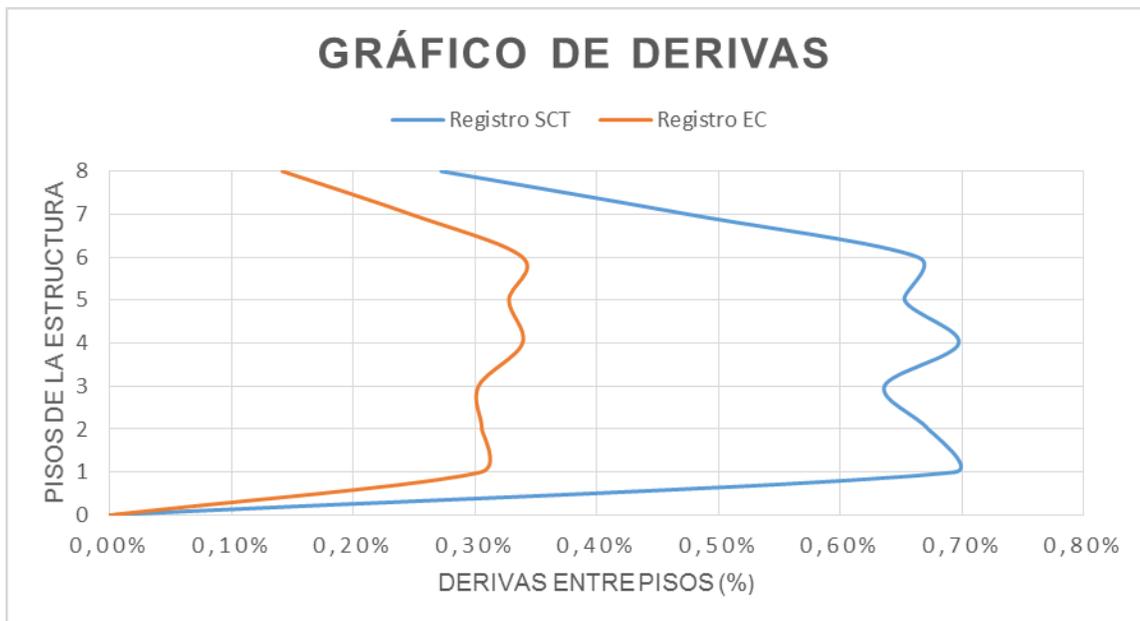


Fig. 6.5.3.10 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.5.3.9 y 6.5.3.10.

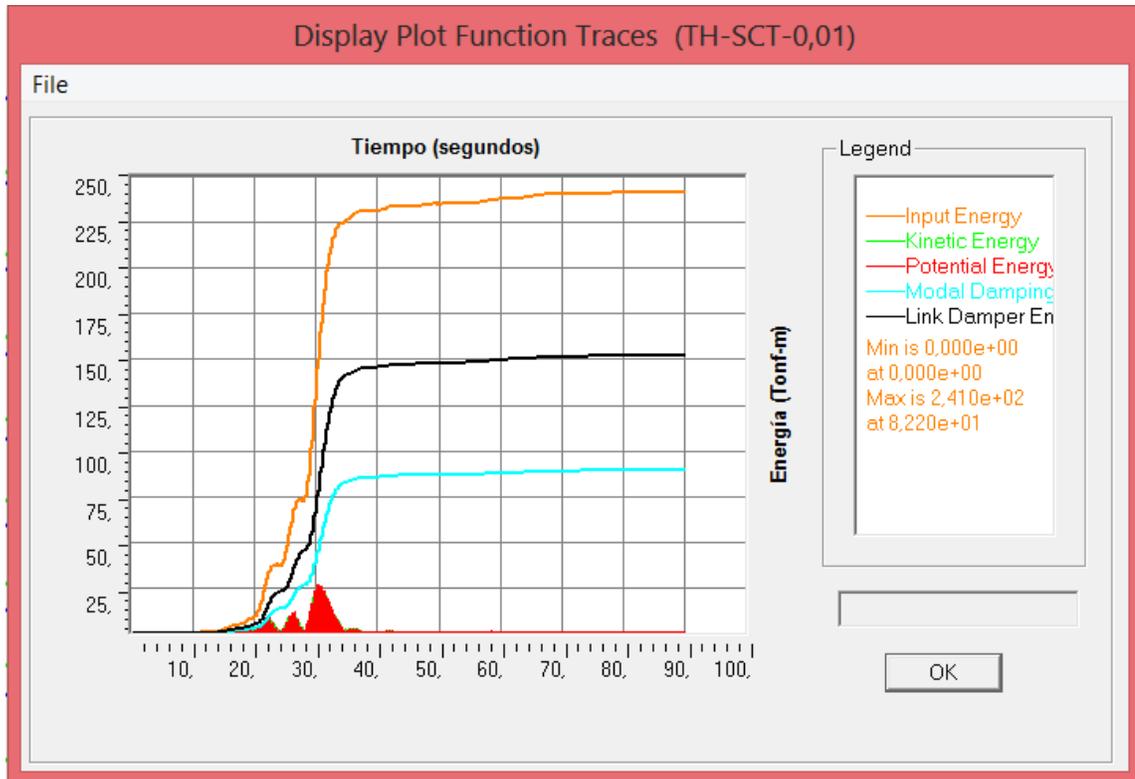


Fig. 6.5.3.11 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 8 pisos sometido al registro SCT.

	Energía (Tonf-m)				
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal	Amortiguamiento Disipador
Registro SCT	241	26,45	23,43	89,09	151,9
% Energía de Entrada	100,00%	10,98%	9,72%	36,97%	63,03%

Tabla 6.5.3.11 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 8 pisos para el registro SCT.

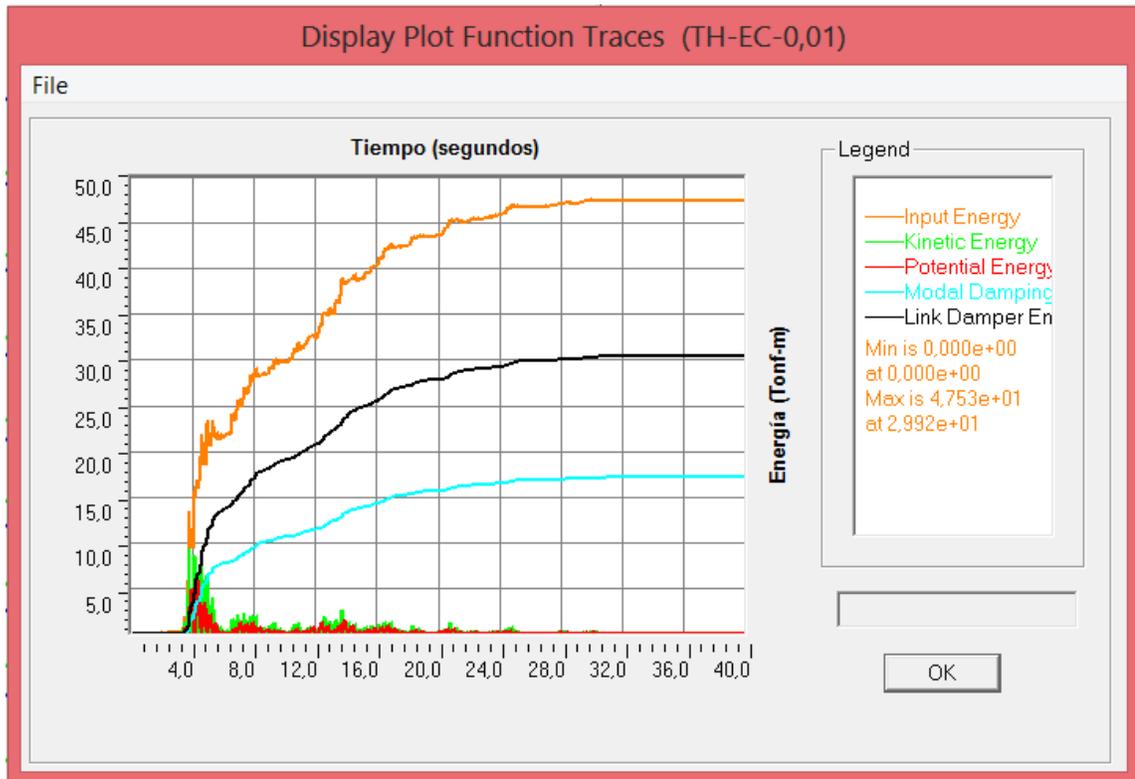


Fig. 6.5.3.12 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 8 pisos sometido al registro de El Centenario.

	Energía (Tonf-m)				
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal	Amortiguamiento Disipador
Registro El Centenario	47,53	5,801	9,212	17,11	30,38
% Energía de Entrada	100,00%	12,20%	19,38%	36,00%	63,92%

Tabla 6.5.3.12 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 8 pisos para el registro SCT.

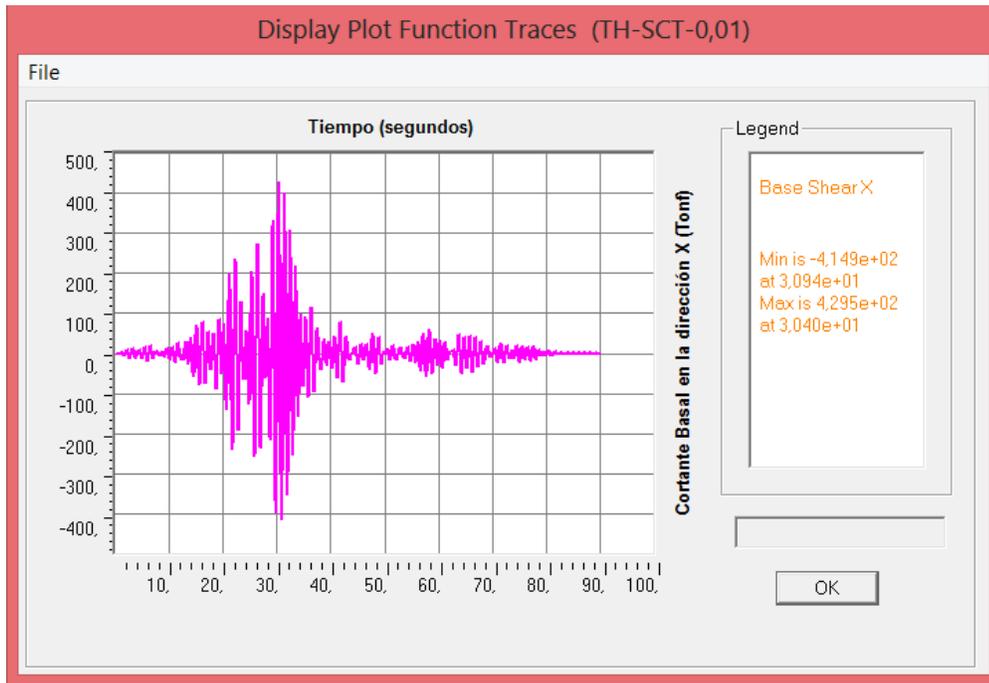


Fig. 6.5.3.13 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 8 pisos sometido al registro SCT.

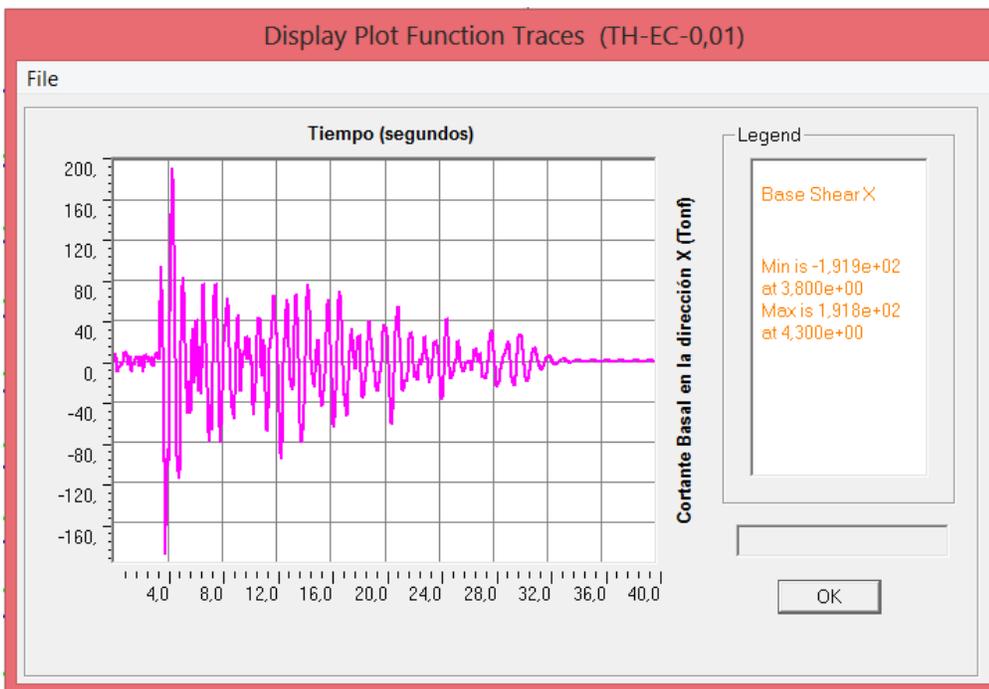


Fig. 6.5.3.14 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 8 pisos sometido al registro El Centenario.

	Cortante Basal Max. (Tonf)
Registro SCT	429,5
Registro El Centenario	191,9

Tabla 6.5.3.13 Cortantes Basales máximos en el pórtico de 8 pisos.

Usando los datos de la Tabla 6.5.3.13 y el peso total de la estructura, $W_{reactivo} = 1043.93Tonf$ (100% de la carga muerta total y el 25% de la carga viva), se procedió al cálculo del coeficiente de carga lateral (c_L):

Registro SCT: $c_L = \frac{V}{W_{reactivo}} = 0.41$

Registro El Centenario: $c_L = \frac{V}{W_{reactivo}} = 0.18$

Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
33	TH-SCT-0,01	Max.	71,70	172,40
33	TH-SCT-0,01	Min.	-73,89	-177,65
33	TH-EC-0,01	Max.	29,26	70,23
33	TH-EC-0,01	Min.	-31,88	-76,92
34	TH-SCT-0,01	Max.	78,87	114,85
34	TH-SCT-0,01	Min.	-81,01	-117,87
34	TH-EC-0,01	Max.	32,64	51,23
34	TH-EC-0,01	Min.	-37,08	-54,45
35	TH-SCT-0,01	Max.	69,27	103,32
35	TH-SCT-0,01	Min.	-70,73	-101,02
35	TH-EC-0,01	Max.	30,39	49,04
35	TH-EC-0,01	Min.	-33,82	-47,35
36	TH-SCT-0,01	Max.	61,10	88,74
36	TH-SCT-0,01	Min.	-62,05	-89,65
36	TH-EC-0,01	Max.	29,46	43,53
36	TH-EC-0,01	Min.	-30,14	-43,74
37	TH-SCT-0,01	Max.	50,66	75,30

37	TH-SCT-0,01	Min.	-51,13	-74,51
37	TH-EC-0,01	Max.	27,45	40,88
37	TH-EC-0,01	Min.	-25,41	-39,44
38	TH-SCT-0,01	Max.	37,99	58,23
38	TH-SCT-0,01	Min.	-38,11	-57,98
38	TH-EC-0,01	Max.	23,16	34,33
38	TH-EC-0,01	Min.	-19,53	-34,57
39	TH-SCT-0,01	Max.	23,91	39,19
39	TH-SCT-0,01	Min.	-23,80	-39,31
39	TH-EC-0,01	Max.	16,59	23,15
39	TH-EC-0,01	Min.	-12,57	-26,63
40	TH-SCT-0,01	Max.	8,60	15,33
40	TH-SCT-0,01	Min.	-8,48	-15,51
40	TH-EC-0,01	Max.	6,92	8,78
40	TH-EC-0,01	Min.	-4,61	-12,16

Tabla 6.5.3.14 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 8 pisos, producidas por los registros.

Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
77	TH-SCT-0,01	Max.	47,27	130,23
77	TH-SCT-0,01	Min.	-48,60	-132,20
77	TH-EC-0,01	Max.	18,78	57,97
77	TH-EC-0,01	Min.	-21,62	-58,78
78	TH-SCT-0,01	Max.	44,20	122,53
78	TH-SCT-0,01	Min.	-45,24	-121,75
78	TH-EC-0,01	Max.	18,15	57,00
78	TH-EC-0,01	Min.	-21,04	-56,64
79	TH-SCT-0,01	Max.	40,38	111,27
79	TH-SCT-0,01	Min.	-41,14	-110,88
79	TH-EC-0,01	Max.	18,08	53,26
79	TH-EC-0,01	Min.	-19,69	-53,05
80	TH-SCT-0,01	Max.	34,22	94,81
80	TH-SCT-0,01	Min.	-34,68	-94,19

80	TH-EC-0,01	Max.	17,19	46,68
80	TH-EC-0,01	Min.	-16,98	-47,00
81	TH-SCT-0,01	Max.	27,32	75,32
81	TH-SCT-0,01	Min.	-27,53	-74,74
81	TH-EC-0,01	Max.	15,37	41,76
81	TH-EC-0,01	Min.	-13,85	-41,99
82	TH-SCT-0,01	Max.	19,07	52,75
82	TH-SCT-0,01	Min.	-19,09	-52,70
82	TH-EC-0,01	Max.	12,09	33,19
82	TH-EC-0,01	Min.	-9,89	-33,33
83	TH-SCT-0,01	Max.	10,90	30,06
83	TH-SCT-0,01	Min.	-10,84	-30,22
83	TH-EC-0,01	Max.	7,65	20,97
83	TH-EC-0,01	Min.	-5,71	-21,13
84	TH-SCT-0,01	Max.	3,71	10,50
84	TH-SCT-0,01	Min.	-3,69	-10,57
84	TH-EC-0,01	Max.	2,80	7,67
84	TH-EC-0,01	Min.	-1,94	-7,86

Tabla 6.5.3.15 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al octavo piso, producidas por los registros.

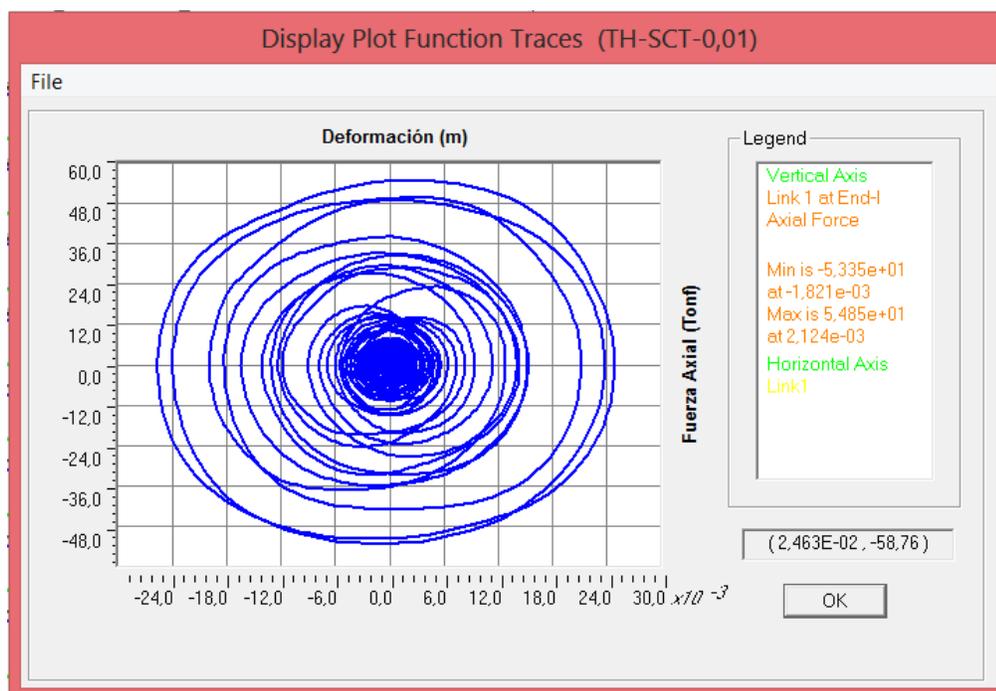


Fig.6.5.3.15 Histéresis elíptica del disipador de fluido viscoso LIN1 sometido al registro SCT.

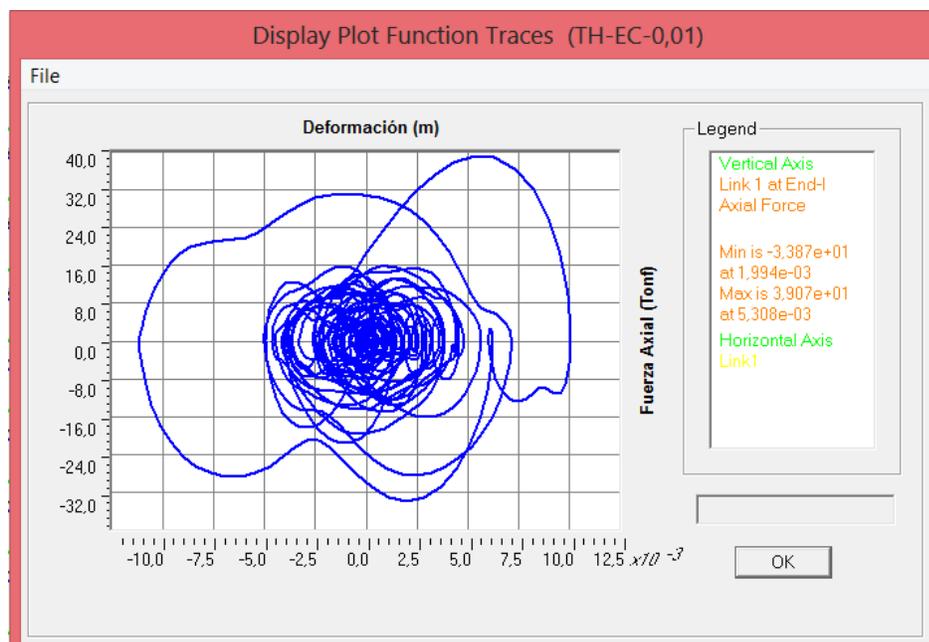


Fig.6.5.3.16 Histéresis elíptica del disipador de fluido viscoso LIN1 sometido al registro El Centenario.

Una vez corrido el pórtico con los disipadores se procedió a obtener las fuerzas axiales en los elementos “Link” para el registro que genere los mayores efectos, de tal manera que observando el catálogo de productos de la empresa TAYLOR DEVICES, se pueda seleccionar el disipador a instalar, en función de la fuerza máxima que soporta el producto del fabricante.

En el Anexo 16 está la tabla con los diferentes disipadores propuestos por la empresa TAYLOR DEVICES.

A continuación se muestran las fuerzas axiales máximas en los disipadores y el producto seleccionado:

Pisos	Fuerza Axial Max. en el Disipador por Piso (Tonf)	Fuerza Axial Max. en el Disipador por Piso (Kip)	Fuerza Axial Max. Disipador Taylor Devices (Kip)
8	1,700	3,74	55
7	6,890	15,16	55
6	15,300	33,66	55
5	20,320	44,70	55
4	27,320	60,10	110
3	30,690	67,52	110
2	38,720	85,18	110
1	54,850	120,67	165

Tabla 6.5.3.16 Fuerzas Axiales Max. producidas por los registros y disipador seleccionado.

- Pórtico de 12 Pisos

Registro SCT

Pisos	Dato del Programa			< ΔM	
	h (m)	δ (m)	Δ (Obtenido)		
12	3,6	0,2047	0,18%	2,00%	Ok

11	3,6	0,1982	0,33%	2,00%	Ok
10	3,6	0,1865	0,44%	2,00%	Ok
9	3,6	0,1708	0,48%	2,00%	Ok
8	3,6	0,1537	0,53%	2,00%	Ok
7	3,6	0,1347	0,56%	2,00%	Ok
6	3,6	0,1146	0,54%	2,00%	Ok
5	3,6	0,095	0,55%	2,00%	Ok
4	3,6	0,0752	0,55%	2,00%	Ok
3	3,6	0,0555	0,51%	2,00%	Ok
2	3,6	0,0371	0,51%	2,00%	Ok
1	4,5	0,0188	0,42%	2,00%	Ok

Tabla 6.5.3.17 Deformaciones y Derivas de pisos para t=30.57s (momento de la deformación máx. del piso 12).

Registro El Centenario

Pisos	Dato del Programa			< ΔM	
	h (m)	δ (m)	Δ (Obtenido)		
12	3,6	0,0825	0,11%	2,00%	Ok
11	3,6	0,0784	0,20%	2,00%	Ok
10	3,6	0,0712	0,26%	2,00%	Ok
9	3,6	0,062	0,26%	2,00%	Ok
8	3,6	0,0527	0,26%	2,00%	Ok
7	3,6	0,0432	0,25%	2,00%	Ok
6	3,6	0,0341	0,22%	2,00%	Ok
5	3,6	0,0263	0,20%	2,00%	Ok
4	3,6	0,0192	0,17%	2,00%	Ok
3	3,6	0,0131	0,14%	2,00%	Ok
2	3,6	0,0082	0,12%	2,00%	Ok
1	4,5	0,004	0,09%	2,00%	Ok

Tabla 6.5.3.18 Deformaciones y Derivas de pisos para t=3.99s (momento de la deformación máx. del piso 12).

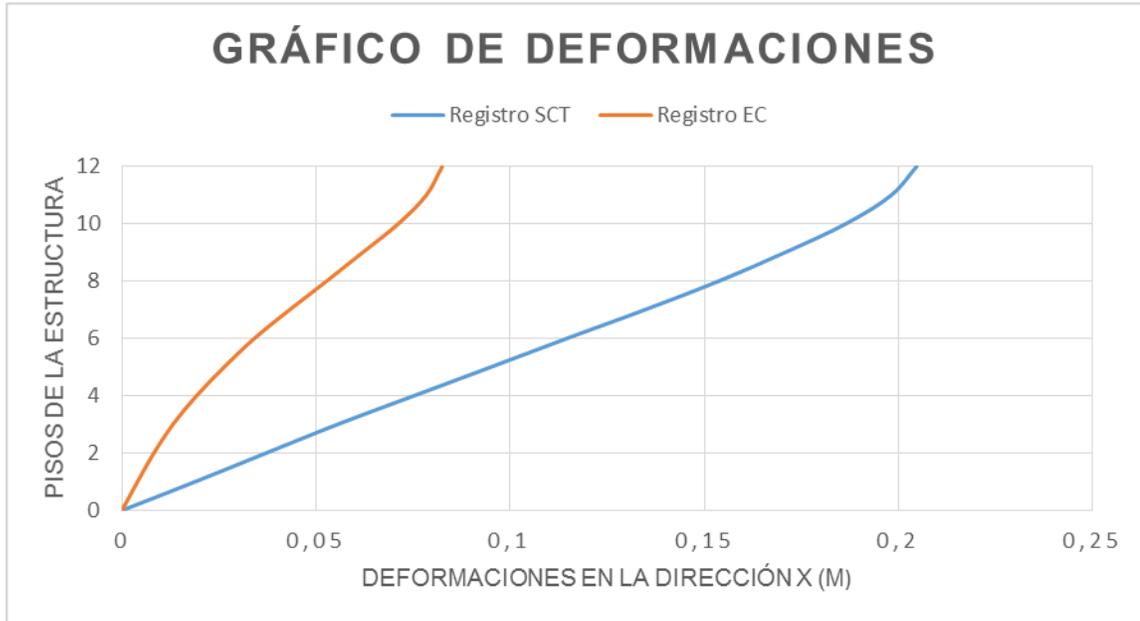


Fig. 6.5.3.17 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.5.3.17 y 6.5.3.18.

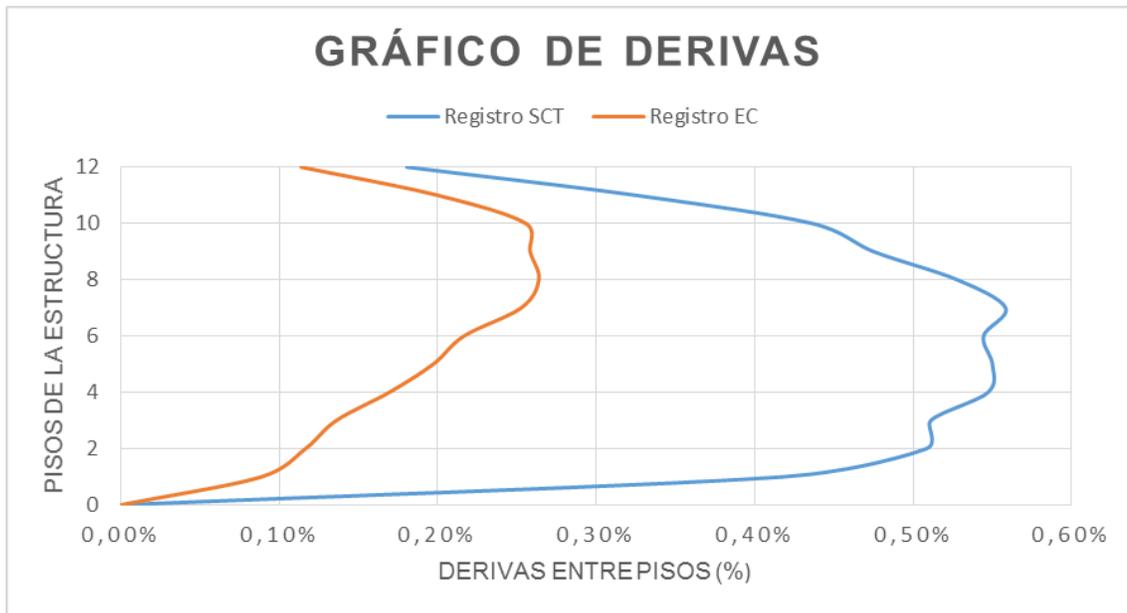


Fig. 6.5.3.18 Gráfico de las deformaciones de piso en la dirección X basada en los datos obtenidos de las Tablas 6.5.3.17 y 6.5.3.18.

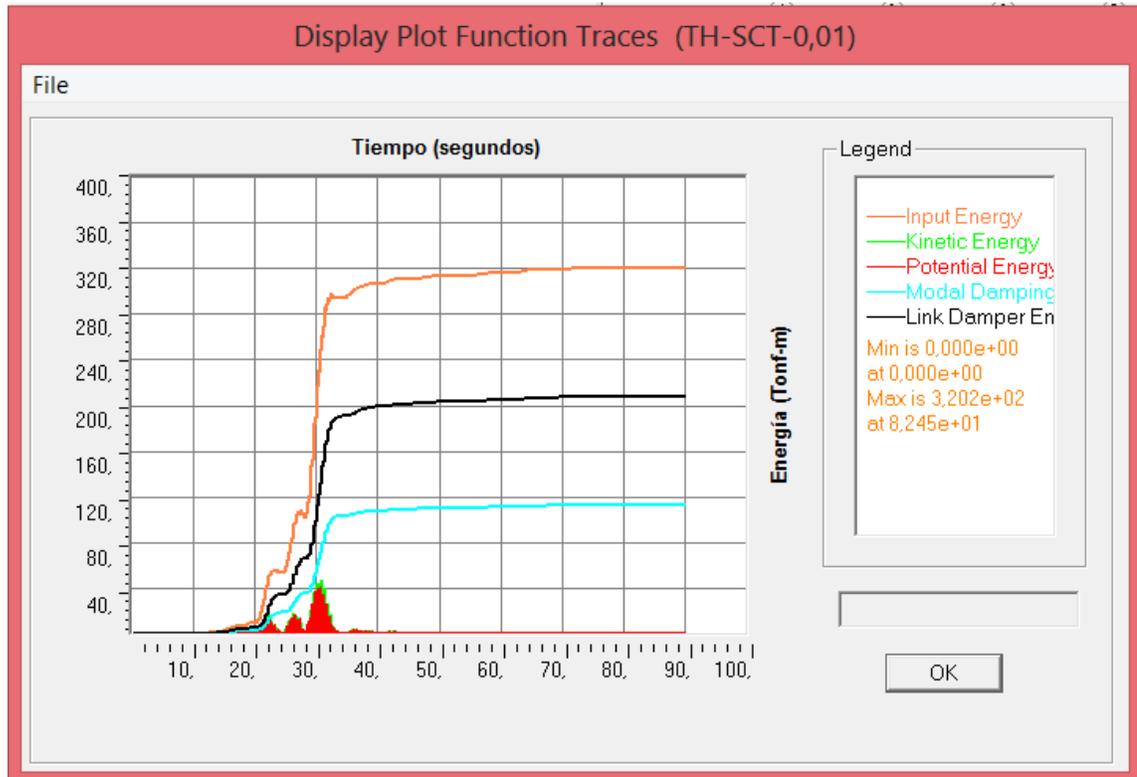


Fig. 6.5.3.19 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 12 pisos sometido al registro SCT.

	Energía (Tonf-m)				
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal	Amortiguamiento Disipador
Registro SCT	320,2	40,07	46,06	112,6	207,6
% Energía de Entrada	100,00%	12,51%	14,38%	35,17%	64,83%

Tabla 6.5.3.19 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 12 pisos para el registro SCT.

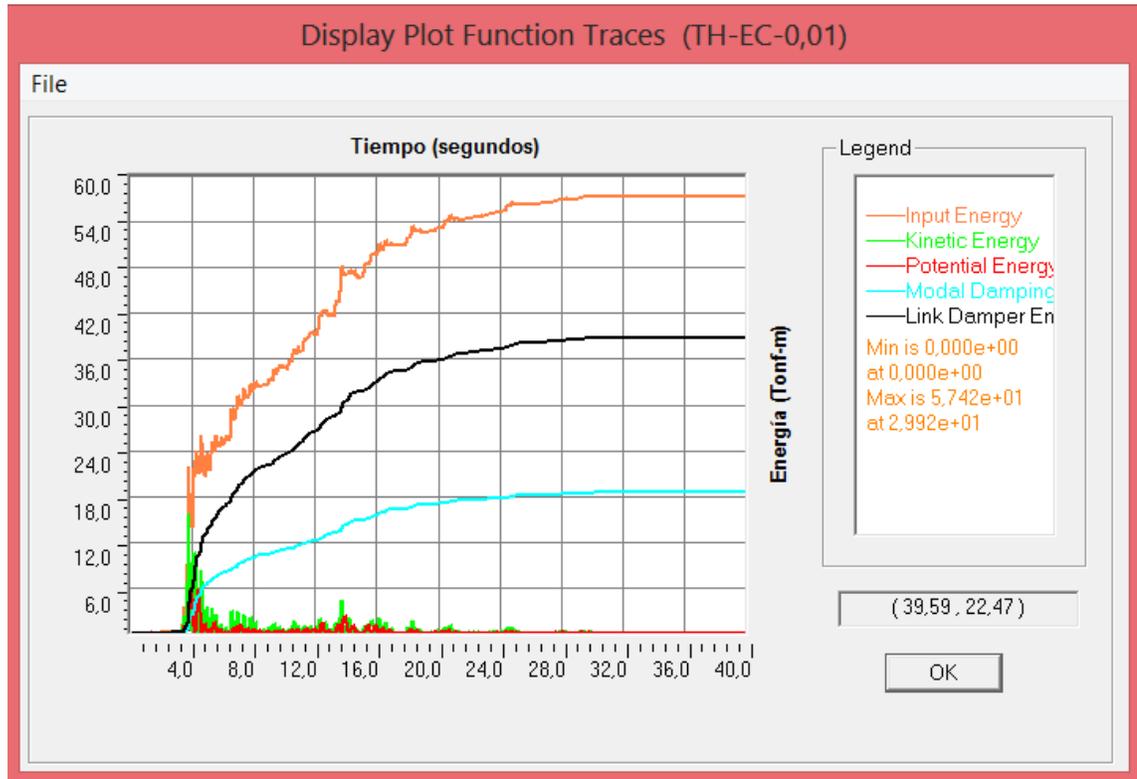


Fig. 6.5.3.20 Gráfico de la distribución de la Energía para el pórtico de 12 pisos sometido al registro El Centenario.

	Energía (Tonf-m)				
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal	Amortiguamiento Disipador
Registro El Centenario	57,42	5,942	15,66	18,48	38,86
% Energía de Entrada	100,00%	10,35%	27,27%	32,18%	67,68%

Tabla 6.5.3.20 Distribución de las Energías máximas en el pórtico de 12 pisos para el registro El Centenario.

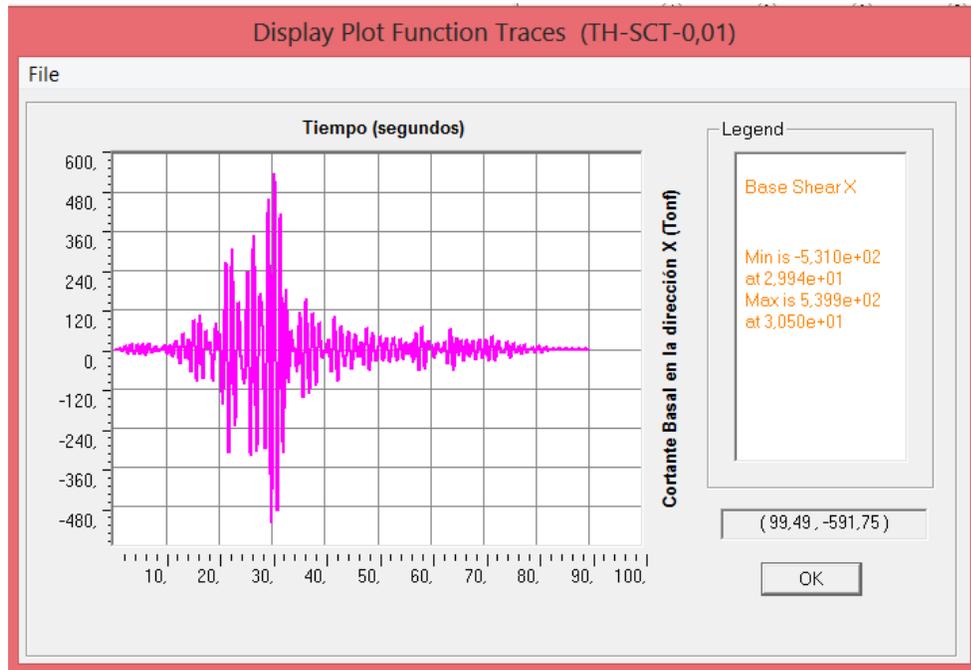


Fig. 6.5.3.21 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 12 pisos sometido al registro SCT.

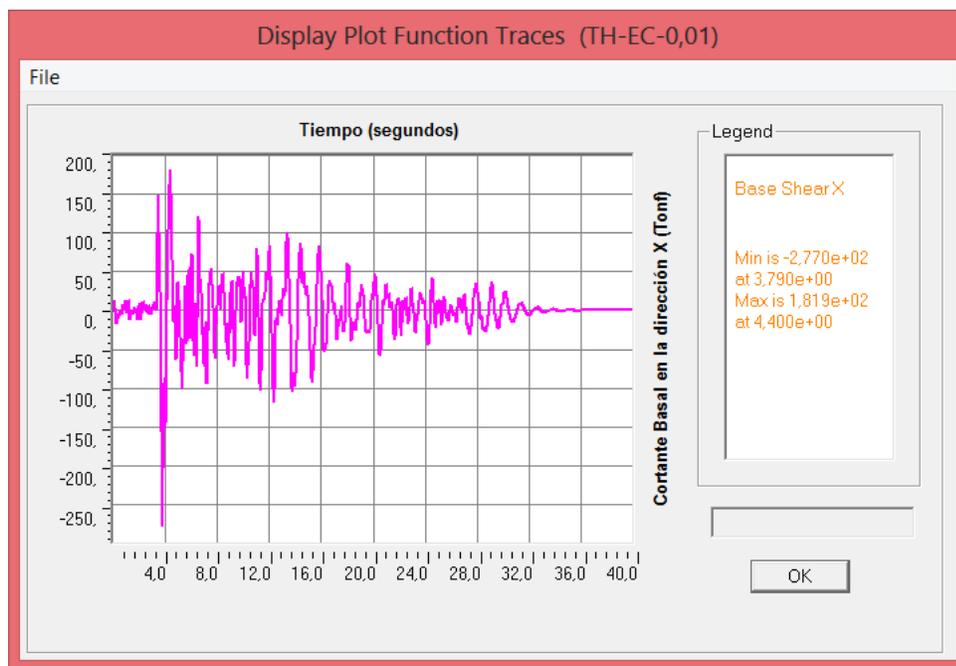


Fig. 6.5.3.22 Gráfico que muestra la variación del cortante basal con respecto al tiempo para el pórtico de 12 pisos sometido al registro El Centenario.

	Cortante Basal Max. (Tonf)
Registro SCT	539,9
Registro El Centenario	277

Tabla 6.5.3.21 Cortantes Basales máximos en el pórtico de 12 pisos.

Usando los datos de la Tabla 6.5.3.21 y el peso total de la estructura, $W_{reactivo} = 1795.55 \text{Tonf}$ (100% de la carga muerta total y el 25% de la carga viva), se procedió al cálculo del coeficiente de carga lateral (c_L):

Registro SCT: $c_L = \frac{V}{W_{reactivo}} = 0.30$

Registro El Centenario: $c_L = \frac{V}{W_{reactivo}} = 0.15$

Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
49	TH-SCT-0,01	Max.	97,07	266,81
49	TH-SCT-0,01	Min.	-98,66	-271,46
49	TH-EC-0,01	Max.	42,11	114,57
49	TH-EC-0,01	Min.	-32,46	-89,81
50	TH-SCT-0,01	Max.	102,10	186,19
50	TH-SCT-0,01	Min.	-104,64	-191,34
50	TH-EC-0,01	Max.	42,43	76,33
50	TH-EC-0,01	Min.	-35,81	-76,92
51	TH-SCT-0,01	Max.	98,06	183,35
51	TH-SCT-0,01	Min.	-101,51	-182,09
51	TH-EC-0,01	Max.	39,62	70,70
51	TH-EC-0,01	Min.	-36,50	-72,60
52	TH-SCT-0,01	Max.	92,89	174,53
52	TH-SCT-0,01	Min.	-96,80	-173,96
52	TH-EC-0,01	Max.	36,33	65,64
52	TH-EC-0,01	Min.	-36,11	-65,62
53	TH-SCT-0,01	Max.	86,96	160,83
53	TH-SCT-0,01	Min.	-91,16	-168,94
53	TH-EC-0,01	Max.	35,19	66,63

53	TH-EC-0,01	Min.	-34,79	-64,92
54	TH-SCT-0,01	Max.	80,11	155,16
54	TH-SCT-0,01	Min.	-84,63	-149,49
54	TH-EC-0,01	Max.	35,75	64,99
54	TH-EC-0,01	Min.	-33,11	-63,78
55	TH-SCT-0,01	Max.	69,35	133,18
55	TH-SCT-0,01	Min.	-73,79	-132,46
55	TH-EC-0,01	Max.	34,34	63,25
55	TH-EC-0,01	Min.	-29,54	-60,52
56	TH-SCT-0,01	Max.	58,97	112,95
56	TH-SCT-0,01	Min.	-63,04	-114,05
56	TH-EC-0,01	Max.	32,35	60,26
56	TH-EC-0,01	Min.	-25,60	-56,40
57	TH-SCT-0,01	Max.	49,36	100,42
57	TH-SCT-0,01	Min.	-52,69	-93,98
57	TH-EC-0,01	Max.	29,79	52,07
57	TH-EC-0,01	Min.	-21,58	-55,18
58	TH-SCT-0,01	Max.	36,53	71,38
58	TH-SCT-0,01	Min.	-38,76	-68,15
58	TH-EC-0,01	Max.	23,89	43,05
58	TH-EC-0,01	Min.	-16,08	-42,94
59	TH-SCT-0,01	Max.	22,76	51,58
59	TH-SCT-0,01	Min.	-24,19	-48,61
59	TH-EC-0,01	Max.	16,38	25,00
59	TH-EC-0,01	Min.	-10,09	-33,98
60	TH-SCT-0,01	Max.	8,00	21,03
60	TH-SCT-0,01	Min.	-8,76	-19,36
60	TH-EC-0,01	Max.	6,67	8,94
60	TH-EC-0,01	Min.	-3,79	-15,49

Tabla 6.5.3.22 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 12 pisos, producidas por los registros.

Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
113	TH-SCT-0,01	Max.	58,99	156,64
113	TH-SCT-0,01	Min.	-60,29	-156,85
113	TH-EC-0,01	Max.	24,14	62,83
113	TH-EC-0,01	Min.	-20,38	-62,71
114	TH-SCT-0,01	Max.	60,50	162,43

114	TH-SCT-0,01	Min.	-62,33	-161,68
114	TH-EC-0,01	Max.	23,54	61,05
114	TH-EC-0,01	Min.	-21,94	-61,34
115	TH-SCT-0,01	Max.	58,97	159,63
115	TH-SCT-0,01	Min.	-61,20	-158,59
115	TH-EC-0,01	Max.	22,34	58,42
115	TH-EC-0,01	Min.	-22,39	-58,31
116	TH-SCT-0,01	Max.	56,89	156,74
116	TH-SCT-0,01	Min.	-59,42	-155,24
116	TH-EC-0,01	Max.	22,02	59,14
116	TH-EC-0,01	Min.	-22,42	-58,56
117	TH-SCT-0,01	Max.	51,31	142,41
117	TH-SCT-0,01	Min.	-53,98	-140,99
117	TH-EC-0,01	Max.	21,54	56,21
117	TH-EC-0,01	Min.	-20,81	-56,87
118	TH-SCT-0,01	Max.	48,01	134,13
118	TH-SCT-0,01	Min.	-50,84	-132,80
118	TH-EC-0,01	Max.	22,19	57,98
118	TH-EC-0,01	Min.	-20,01	-58,49
119	TH-SCT-0,01	Max.	44,64	128,60
119	TH-SCT-0,01	Min.	-47,61	-123,77
119	TH-EC-0,01	Max.	22,94	59,71
119	TH-EC-0,01	Min.	-19,09	-61,88
120	TH-SCT-0,01	Max.	34,13	97,20
120	TH-SCT-0,01	Min.	-36,51	-96,29
120	TH-EC-0,01	Max.	19,26	50,88
120	TH-EC-0,01	Min.	-14,81	-51,20
121	TH-SCT-0,01	Max.	28,68	81,97
121	TH-SCT-0,01	Min.	-30,64	-80,45
121	TH-EC-0,01	Max.	17,59	46,33
121	TH-EC-0,01	Min.	-12,53	-46,88
122	TH-SCT-0,01	Max.	18,61	53,61
122	TH-SCT-0,01	Min.	-19,87	-52,71
122	TH-EC-0,01	Max.	12,31	32,77
122	TH-EC-0,01	Min.	-8,19	-33,10
123	TH-SCT-0,01	Max.	11,65	33,99
123	TH-SCT-0,01	Min.	-12,54	-33,11
123	TH-EC-0,01	Max.	8,21	21,77
123	TH-EC-0,01	Min.	-5,20	-22,13
124	TH-SCT-0,01	Max.	4,66	13,93
124	TH-SCT-0,01	Min.	-5,07	-13,19
124	TH-EC-0,01	Max.	3,33	8,74

124	TH-EC-0,01	Min.	-2,14	-9,09
-----	------------	------	-------	-------

Tabla 6.5.3.23 Fuerzas Internas Máx. y Mín. en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al duodécimo piso, producidas por los registros.

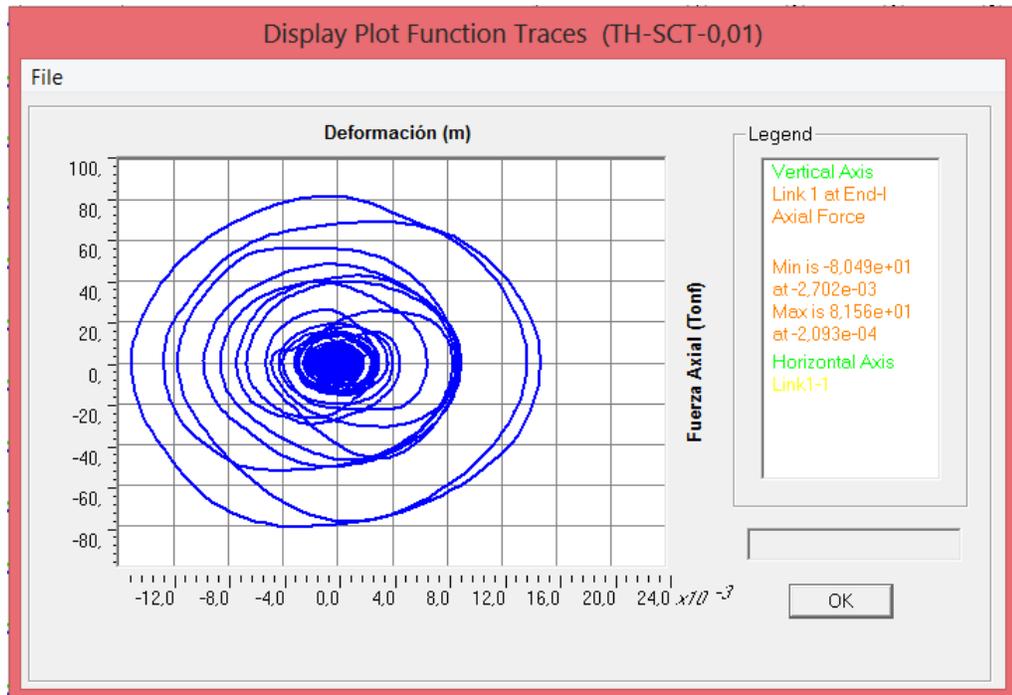


Fig.6.5.3.23 Histéresis elíptica del disipador de fluido viscoso LIN1 sometido al registro SCT.

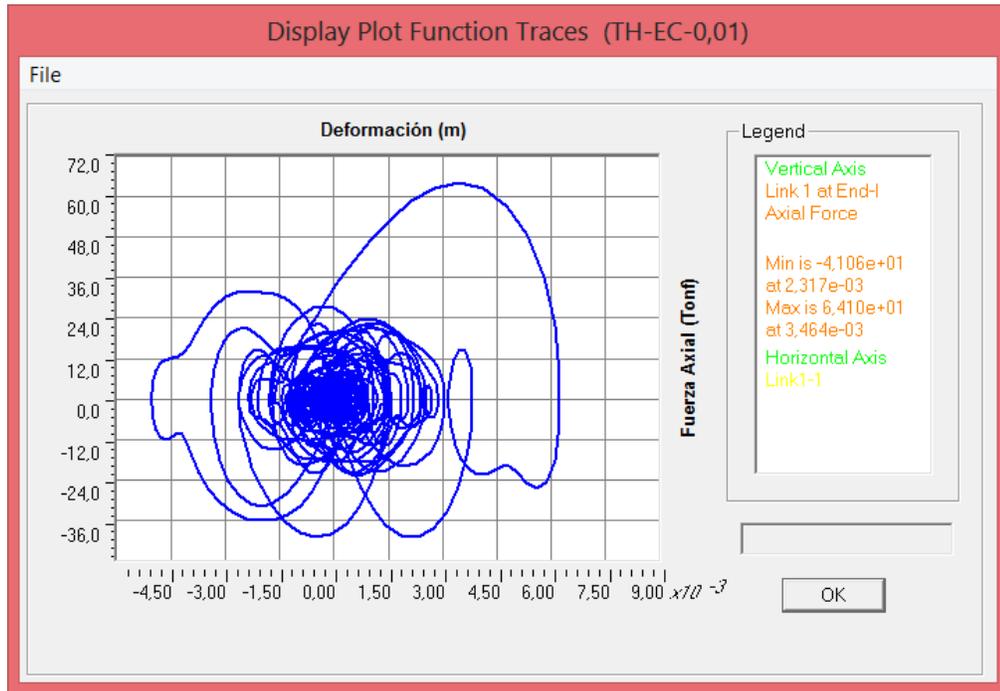


Fig.6.5.3.24 Histéresis elíptica del disipador de fluido viscoso LIN1 sometido al registro El Centenario.

Una vez corrido el pórtico con los disipadores se procedió a obtener las fuerzas axiales en los elementos “Link” para el registro que genere los mayores efectos, de tal manera que observando el catálogo de productos de la empresa TAYLOR DEVICES, se pueda seleccionar el disipador a instalar, en función de la fuerza máxima que soporta el producto del fabricante.

En el Anexo 16 está la tabla con los diferentes disipadores propuestos por la empresa TAYLOR DEVICES.

A continuación se muestran las fuerzas axiales máximas en los disipadores y el producto seleccionado:

Piso	Fuerza Axial Max. en el Disipador (Tonf)	Fuerza Axial Max. en el Disipador (Kip)	Fuerza Max. Disipador Taylor Devices (Kip)
12	1,27	2,79	55
11	5,71	12,56	55
10	12,74	28,03	55
9	20,03	44,07	55
8	29,55	65,01	111
7	39,47	86,83	111
6	46,69	102,72	111
5	55,98	123,16	165
4	64,47	141,83	165
3	68,42	150,52	165
2	76,62	168,56	220
1	81,56	179,43	220

Tabla 6.5.3.24 Fuerzas Axiales Max. producidas por los registros y disipador seleccionado.

6.6. Análisis comparativo de los resultados obtenidos para los pórticos sin disipadores y con disipadores

Una vez concluido los análisis, resulta de vital importancia establecer una comparación entre los resultados obtenidos, para los pórticos con y sin disipadores, de tal manera que sea más fácil visualizar los beneficios aportados por los mismos a las estructuras. A continuación, por medio de tablas se ilustrará el efecto de los disipadores en el desempeño de las estructuras, ya sea con relación a las Deformaciones y Derivas, Energía, Cortante Basal y Fuerzas Internas en los elementos estructurales seleccionados.

6.6.1. Deformaciones y Derivas

- Pórtico de 4 Pisos

Pisos	h (m)	Pórtico Sin Disipadores	Pórtico Con Disipadores	% Reducción
		δ (m)	δ (m)	
4	3,6	0,0726	0,0524	27,82%
3	3,6	0,0638	0,0461	27,74%
2	3,6	0,0484	0,0351	27,48%
1	4,5	0,028	0,0204	27,14%

Tabla 6.6.1.1 Comparación entre las Deformaciones obtenidas para el registro SCT.

Pisos	h (m)	Pórtico Sin Disipadores	Pórtico Con Disipadores	% Reducción
		Δ (Obtenido)	Δ (Obtenido)	
4	3,6	0,24%	0,18%	28,41%
3	3,6	0,43%	0,31%	28,57%
2	3,6	0,57%	0,41%	27,94%
1	4,5	0,62%	0,45%	27,14%

Tabla 6.6.1.2 Comparación entre las Derivas obtenidas para el registro SCT.

Pisos	h (m)	Pórtico Sin Disipadores	Pórtico Con Disipadores	% Reducción
		δ (m)	δ (m)	
4	3,6	0,1486	0,0762	48,72%
3	3,6	0,1307	0,0663	49,27%
2	3,6	0,0994	0,0494	50,30%
1	4,5	0,0571	0,0277	51,49%

Tabla 6.6.1.3 Comparación entre las Deformaciones obtenidas para el registro El Centenario.

Pisos	h (m)	Pórtico Sin Disipadores	Pórtico Con Disipadores	% Reducción
		Δ (Obtenido)	Δ (Obtenido)	
4	3,6	0,50%	0,28%	44,69%
3	3,6	0,87%	0,47%	46,01%
2	3,6	1,18%	0,60%	48,70%
1	4,5	1,27%	0,62%	51,49%

Tabla 6.6.1.4 Comparación entre las Derivas obtenidas para el registro El Centenario.

- Pórtico de 8 Pisos

Pisos	h (m)	Pórtico Sin Disipadores	Pórtico Con Disipadores	% Reducción
		δ (m)	δ (m)	
8	3,6	0,3325	0,1777	46,56%
7	3,6	0,3145	0,1679	46,61%
6	3,6	0,2826	0,1508	46,64%
5	3,6	0,2379	0,1269	46,66%
4	3,6	0,1939	0,1034	46,67%
3	3,6	0,147	0,0783	46,73%
2	3,6	0,1039	0,0554	46,68%
1	4,5	0,0585	0,0312	46,67%

Tabla 6.6.1.5 Comparación entre las Deformaciones obtenidas para el registro SCT.

Pisos	h (m)	Pórtico Sin Disipadores	Pórtico Con Disipadores	% Reducción
		Δ (Obtenido)	Δ (Obtenido)	
8	3,6	0,50%	0,27%	45,56%
7	3,6	0,89%	0,48%	46,39%
6	3,6	1,24%	0,66%	46,53%
5	3,6	1,22%	0,65%	46,59%

4	3,6	1,30%	0,70%	46,48%
3	3,6	1,20%	0,64%	46,87%
2	3,6	1,26%	0,67%	46,70%
1	4,5	1,30%	0,69%	46,67%

Tabla 6.6.1.6 Comparación entre las Derivas obtenidas para el registro SCT.

Pisos	h (m)	Pórtico Sin Disipadores	Pórtico Con Disipadores	% Reducción
		δ (m)	δ (m)	
8	3,6	0,11	0,0858	22,00%
7	3,6	0,102	0,0807	20,88%
6	3,6	0,091	0,0718	21,10%
5	3,6	0,0782	0,0596	23,79%
4	3,6	0,066	0,0478	27,58%
3	3,6	0,052	0,0356	31,54%
2	3,6	0,0379	0,0247	34,83%
1	4,5	0,0218	0,0137	37,16%

Tabla 6.6.1.7 Comparación entre las Deformaciones obtenidas para el registro El Centenario.

Pisos	h (m)	Pórtico Sin Disipadores	Pórtico Con Disipadores	% Reducción
		Δ (Obtenido)	Δ (Obtenido)	
8	3,6	0,22%	0,14%	36,25%
7	3,6	0,31%	0,25%	19,09%
6	3,6	0,36%	0,34%	4,69%
5	3,6	0,34%	0,33%	3,28%
4	3,6	0,39%	0,34%	12,86%
3	3,6	0,39%	0,30%	22,70%
2	3,6	0,45%	0,31%	31,68%
1	4,5	0,48%	0,30%	37,16%

Tabla 6.6.1.8 Comparación entre las Derivas obtenidas para el registro El Centenario.

- Pórtico de 12 Pisos

Pisos	h (m)	Pórtico Sin Disipadores	Pórtico Con Disipadores	% Reducción
		δ (m)	δ (m)	
12	3,6	0,3472	0,2047	41,04%
11	3,6	0,3361	0,1982	41,03%
10	3,6	0,3165	0,1865	41,07%
9	3,6	0,29	0,1708	41,10%
8	3,6	0,2612	0,1537	41,16%
7	3,6	0,2291	0,1347	41,20%
6	3,6	0,1952	0,1146	41,29%
5	3,6	0,162	0,095	41,36%
4	3,6	0,1283	0,0752	41,39%
3	3,6	0,0947	0,0555	41,39%
2	3,6	0,0634	0,0371	41,48%
1	4,5	0,0322	0,0188	41,61%

Tabla 6.6.1.9 Comparación entre las Deformaciones obtenidas para el registro SCT.

Pisos	h (m)	Pórtico Sin Disipadores	Pórtico Con Disipadores	% Reducción
		Δ (Obtenido)	Δ (Obtenido)	
12	3,6	0,31%	0,18%	41,44%
11	3,6	0,54%	0,33%	40,31%
10	3,6	0,74%	0,44%	40,75%
9	3,6	0,80%	0,48%	40,63%
8	3,6	0,89%	0,53%	40,81%
7	3,6	0,94%	0,56%	40,71%
6	3,6	0,92%	0,54%	40,96%
5	3,6	0,94%	0,55%	41,25%
4	3,6	0,93%	0,55%	41,37%
3	3,6	0,87%	0,51%	41,21%
2	3,6	0,87%	0,51%	41,35%
1	4,5	0,72%	0,42%	41,61%

Tabla 6.6.1.10 Comparación entre las Derivas obtenidas para el registro SCT.

Pisos	h (m)	Pórtico Sin Disipadores	Pórtico Con Disipadores	% Reducción
		δ (m)	δ (m)	
12	3,6	0,1073	0,0825	23,11%
11	3,6	0,1006	0,0784	22,07%
10	3,6	0,0885	0,0712	19,55%
9	3,6	0,0731	0,062	15,18%
8	3,6	0,0588	0,0527	10,37%
7	3,6	0,0455	0,0432	5,05%
6	3,6	0,0339	0,0341	-0,59%
5	3,6	0,0244	0,0263	-7,79%
4	3,6	0,0166	0,0192	-15,66%
3	3,6	0,0108	0,0131	-21,30%
2	3,6	0,0066	0,0082	-24,24%
1	4,5	0,0032	0,004	-25,00%

Tabla 6.6.1.11 Comparación entre las Deformaciones obtenidas para el registro El Centenario.

Pisos	h (m)	Pórtico Sin Disipadores	Pórtico Con Disipadores	% Reducción
		Δ (Obtenido)	Δ (Obtenido)	
12	3,6	0,19%	0,11%	38,81%
11	3,6	0,34%	0,20%	40,50%
10	3,6	0,43%	0,26%	40,26%
9	3,6	0,40%	0,26%	34,97%
8	3,6	0,37%	0,26%	28,57%
7	3,6	0,32%	0,25%	21,55%
6	3,6	0,26%	0,22%	17,89%
5	3,6	0,22%	0,20%	8,97%
4	3,6	0,16%	0,17%	-5,17%
3	3,6	0,12%	0,14%	-16,67%
2	3,6	0,09%	0,12%	-23,53%
1	4,5	0,07%	0,09%	-25,00%

Tabla 6.6.1.12 Comparación entre las Derivas obtenidas para el registro El Centenario.

Resulta que para este pórtico, sometido al registro de El Centenario, las deformaciones y derivas, en ciertos pisos, se vieron amplificadas por la presencia de los disipadores. De todas maneras esto no presenta una amenaza debido a pequeña magnitud de las mismas.

6.6.2. Energía

- Pórtico de 4 Pisos

	Energía (Tonf-m)				
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal	Amortiguamiento Disipador
Registro SCT (Pórtico SD)	11,93	4,591	2,62	11,93	-
Registro SCT (Pórtico CD)	20,28	2,472	1,463	6,095	14,18
% Reducción	-69,99%	46,16%	44,16%	48,91%	-
% Energía de Entrada					69,92%

Tabla 6.6.2.1 Comparación entre las Energías máx. obtenidas para el registro SCT.

Se observa que la energía de entrada, para el pórtico con disipadores, aumentó (69.99%) en comparación con la energía de entrada para el pórtico sin disipadores. A pesar de eso, el aumento se ve contrarrestado por la disminución en las energías potenciales, cinéticas y de amortiguamiento modal, debido a la presencia del disipador de energía que toma el 69.92% de la energía entrante. Esto resulta importante, ya que la energía inelástica se ve reducida dejando a la estructura con un daño reducido, aunque tal afirmación no es posible apreciar debido a las limitaciones del programa.

	Energía (Tonf-m)				
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal	Amortiguamiento Disipador
Registro El Centenario (Pórtico SD)	84,72	19,28	22,76	84,56	-
Registro El Centenario (Pórtico CD)	52,5	4,896	5,67	15,98	36,5
% Reducción	38,03%	74,61%	75,09%	81,10%	-
% Energía de Entrada					69,52%

Tabla 6.6.2.2 Comparación entre las Energías máx. obtenidas para el registro El Centenario.

Para este registro el disipador toma el 69.52% de la energía entrante y además, resulta que dicha energía se reduce en comparación con la energía entrante para el pórtico sin disipadores.

- Pórtico de 8 Pisos

	Energía (Tonf-m)				
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal	Amortiguamiento Disipador
Registro SCT (Pórtico SD)	400	90,14	90,22	399,9	-
Registro SCT (Pórtico CD)	241	26,45	23,43	17,11	151,9
% Reducción	39,75%	70,66%	74,03%	95,72%	-
% Energía de Entrada					63,03%

Tabla 6.6.2.3 Comparación entre las Energías máx. obtenidas para el registro SCT.

Para este registro el disipador toma el 63.03% de la energía entrante y además, resulta que dicha energía se reduce en comparación con la energía entrante para el pórtico sin disipadores.

	Energía (Tonf-m)				
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal	Amortiguamiento Disipador
Registro El Centenario (Pórtico SD)	32,3	10,03	14,87	32,24	-
Registro El Centenario (Pórtico CD)	47,53	5,801	9,212	17,11	30,38
% Reducción	-47,15%	42,16%	38,05%	46,93%	-
% Energía de Entrada					63,92%

Tabla 6.6.2.4 Comparación entre las Energías máx. obtenidas para el registro El Centenario.

Se observa que la energía de entrada, para el pórtico con disipadores, aumentó (47.15%) en comparación con la energía de entrada para el pórtico sin disipadores. A pesar de eso, el aumento se ve contrarrestado por la disminución en las energías potenciales, cinéticas y de amortiguamiento modal, debido a la presencia del disipador de energía que toma el 63.92% de la energía entrante. Esto resulta importante, ya que la energía inelástica se ve reducida dejando a la estructura con un daño reducido, aunque tal afirmación no es posible apreciar debido a las limitaciones del programa.

- Pórtico de 12 Pisos

	Energía (Tonf-m)				
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal	Amortiguamiento Disipador
Registro SCT (Pórtico SD)	350,5	115	135,9	350,5	-
Registro SCT (Pórtico CD)	320,2	40,07	46,06	112,6	207,6
% Reducción	8,64%	65,16%	66,11%	67,87%	-
% Energía de Entrada					64,83%

Tabla 6.6.2.5 Comparación entre las Energías máx. obtenidas para el registro SCT.

Para este registro el disipador toma el 64.83% de la energía entrante y además, resulta que dicha energía se reduce en comparación con la energía entrante para el pórtico sin disipadores.

	Energía (Tonf-m)				
	Entrada	Potencial	Cinética	Amortiguamiento Modal	Amortiguamiento Disipador
Registro El Centenario (Pórtico SD)	41,99	10,28	18,95	41,78	-
Registro El Centenario (Pórtico CD)	57,42	5,942	15,66	18,48	38,86
% Reducción	-36,75%	42,20%	17,36%	55,77%	-
% Energía de Entrada					67,68%

Tabla 6.6.2.6 Comparación entre las Energías máx. obtenidas para el registro El Centenario.

Se observa que la energía de entrada, para el pórtico con disipadores, aumentó (36.75%) en comparación con la energía de entrada para el pórtico sin disipadores. A pesar de eso, el aumento se ve contrarrestado por la disminución en las energías potenciales, cinéticas y de amortiguamiento modal, debido a la presencia del disipador de energía que toma el 67.68% de la energía entrante. Esto resulta importante, ya que la energía inelástica se ve reducida dejando a la estructura con un daño reducido, aunque tal afirmación no es posible apreciar debido a las limitaciones del programa.

6.6.3. Cortante Basal

- Pórtico de 4 Pisos

	Pórtico Sin Disipadores	Pórtico Con Disipadores	% Reducción
	Cortante Basal Max. (Tonf)	Cortante Basal Max. (Tonf)	
Registro SCT	172	130,4	24,19%
Registro El Centenario	348,5	176,9	49,24%

Tabla 6.6.3.1 Comparación entre los Cortantes Basales máx. obtenidos.

- Pórtico de 8 Pisos

	Pórtico Sin Disipadores	Pórtico Con Disipadores	% Reducción
	Cortante Basal Max. (Tonf)	Cortante Basal Max. (Tonf)	
Registro SCT	761	429,5	43,56%
Registro El Centenario	300,8	191,9	36,20%

Tabla 6.6.3.2 Comparación entre los Cortantes Basales máx. obtenidos.

- Pórtico de 12 Pisos

	Pórtico Sin Disipadores	Pórtico Con Disipadores	% Reducción
	Cortante Basal Max. (Tonf)	Cortante Basal Max. (Tonf)	
Registro SCT	898,6	584,5	34,95%
Registro El Centenario	335,1	272,2	18,77%

Tabla 6.6.3.3 Comparación entre los Cortantes Basales máx. obtenidos.

Para todos los pórticos, sometidos a los 2 registros, el cortante basal se redujo en una buena proporción al utilizar los disipadores de fluido viscoso, siendo el pórtico de 8 pisos, para el registro SCT, el cual tuvo la mayor reducción del cortante (43.56%).

6.6.4. Fuerzas Internas en los elementos

Los elementos de los cuales se extrajeron las fuerzas internas, ya fueron mencionados en literales anteriores. A continuación, se mostrará sólo el porcentaje de reducción las fuerzas internas debido a la presencia de los disipadores en los pórticos.

- Pórtico de 4 Pisos

% Reducción				
Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
17	TH-SCT-0,01	Max.	16,95%	17,00%
17	TH-SCT-0,01	Min.	25,57%	25,64%
17	TH-EC-0,01	Max.	51,89%	51,78%
17	TH-EC-0,01	Min.	50,71%	50,69%
18	TH-SCT-0,01	Max.	18,27%	27,02%
18	TH-SCT-0,01	Min.	27,22%	23,19%
18	TH-EC-0,01	Max.	48,94%	48,46%
18	TH-EC-0,01	Min.	52,01%	49,39%
19	TH-SCT-0,01	Max.	19,95%	28,12%
19	TH-SCT-0,01	Min.	28,25%	20,30%
19	TH-EC-0,01	Max.	50,93%	54,46%
19	TH-EC-0,01	Min.	57,44%	49,65%
20	TH-SCT-0,01	Max.	23,36%	28,68%
20	TH-SCT-0,01	Min.	28,76%	22,68%
20	TH-EC-0,01	Max.	58,93%	58,08%
20	TH-EC-0,01	Min.	58,95%	58,76%

Tabla 6.6.4.1 Reducción o Aumento de Fuerzas Internas en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 4 pisos, producidas por los registros.

% Reducción				
Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
41	TH-SCT-0,01	Max.	17,50%	26,26%
41	TH-SCT-0,01	Min.	26,26%	26,19%
41	TH-EC-0,01	Max.	50,65%	50,65%
41	TH-EC-0,01	Min.	50,91%	50,65%
42	TH-SCT-0,01	Max.	18,94%	27,63%
42	TH-SCT-0,01	Min.	27,63%	26,93%
42	TH-EC-0,01	Max.	47,44%	48,45%

42	TH-EC-0,01	Min.	55,10%	47,70%
43	TH-SCT-0,01	Max.	20,55%	28,40%
43	TH-SCT-0,01	Min.	28,41%	27,05%
43	TH-EC-0,01	Max.	53,32%	53,32%
43	TH-EC-0,01	Min.	57,64%	53,32%
44	TH-SCT-0,01	Max.	22,52%	28,90%
44	TH-SCT-0,01	Min.	28,94%	26,62%
44	TH-EC-0,01	Max.	57,76%	57,55%
44	TH-EC-0,01	Min.	58,11%	57,97%

Tabla 6.6.4.2 Reducción de Fuerzas Internas en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al cuarto piso, producidas por los registros.

Se puede observar que para ambos registros, tanto en las vigas y columnas, gracias a los disipadores, los cortantes y momentos máx. y mín. disminuyeron.

- Pórtico de 8 Pisos

% Reducción				
Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
33	TH-SCT-0,01	Max.	46,68%	46,68%
33	TH-SCT-0,01	Min.	45,37%	45,40%
33	TH-EC-0,01	Max.	17,89%	24,13%
33	TH-EC-0,01	Min.	40,38%	39,89%
34	TH-SCT-0,01	Max.	46,73%	46,73%
34	TH-SCT-0,01	Min.	45,79%	45,87%
34	TH-EC-0,01	Max.	20,69%	34,26%
34	TH-EC-0,01	Min.	32,38%	30,52%
35	TH-SCT-0,01	Max.	46,73%	46,19%
35	TH-SCT-0,01	Min.	46,26%	46,74%
35	TH-EC-0,01	Max.	16,72%	23,50%
35	TH-EC-0,01	Min.	20,71%	18,11%
36	TH-SCT-0,01	Max.	46,63%	46,45%

36	TH-SCT-0,01	Min.	46,45%	46,45%
36	TH-EC-0,01	Max.	28,01%	29,13%
36	TH-EC-0,01	Min.	21,87%	23,57%
37	TH-SCT-0,01	Max.	46,61%	46,39%
37	TH-SCT-0,01	Min.	46,34%	46,63%
37	TH-EC-0,01	Max.	32,98%	32,83%
37	TH-EC-0,01	Min.	28,75%	33,15%
38	TH-SCT-0,01	Max.	46,53%	46,04%
38	TH-SCT-0,01	Min.	46,00%	46,58%
38	TH-EC-0,01	Max.	31,93%	32,21%
38	TH-EC-0,01	Min.	27,22%	32,14%
39	TH-SCT-0,01	Max.	45,98%	45,79%
39	TH-SCT-0,01	Min.	45,77%	46,10%
39	TH-EC-0,01	Max.	37,77%	39,73%
39	TH-EC-0,01	Min.	21,10%	35,94%
40	TH-SCT-0,01	Max.	44,74%	45,39%
40	TH-SCT-0,01	Min.	45,35%	44,91%
40	TH-EC-0,01	Max.	47,56%	50,11%
40	TH-EC-0,01	Min.	48,64%	45,54%

Tabla 6.6.4.3 Reducción o Aumento de Fuerzas Internas en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 8 pisos, producidas por los registros.

% Reducción				
Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
77	TH-SCT-0,01	Max.	46,74%	46,05%
77	TH-SCT-0,01	Min.	45,66%	45,66%
77	TH-EC-0,01	Max.	22,03%	35,96%
77	TH-EC-0,01	Min.	36,05%	36,13%
78	TH-SCT-0,01	Max.	46,77%	46,06%
78	TH-SCT-0,01	Min.	46,07%	46,07%
78	TH-EC-0,01	Max.	21,12%	27,31%
78	TH-EC-0,01	Min.	27,32%	27,33%
79	TH-SCT-0,01	Max.	46,75%	46,33%

79	TH-SCT-0,01	Min.	46,33%	46,34%
79	TH-EC-0,01	Max.	21,81%	17,85%
79	TH-EC-0,01	Min.	17,85%	17,85%
80	TH-SCT-0,01	Max.	46,63%	46,30%
80	TH-SCT-0,01	Min.	46,29%	46,29%
80	TH-EC-0,01	Max.	29,39%	29,46%
80	TH-EC-0,01	Min.	24,40%	29,32%
81	TH-SCT-0,01	Max.	46,51%	46,05%
81	TH-SCT-0,01	Min.	46,04%	46,53%
81	TH-EC-0,01	Max.	29,69%	29,70%
81	TH-EC-0,01	Min.	26,43%	29,69%
82	TH-SCT-0,01	Max.	46,15%	45,72%
82	TH-SCT-0,01	Min.	45,69%	46,17%
82	TH-EC-0,01	Max.	30,04%	29,98%
82	TH-EC-0,01	Min.	20,93%	30,10%
83	TH-SCT-0,01	Max.	45,37%	45,31%
83	TH-SCT-0,01	Min.	45,24%	45,44%
83	TH-EC-0,01	Max.	35,94%	35,90%
83	TH-EC-0,01	Min.	25,05%	35,98%
84	TH-SCT-0,01	Max.	43,26%	43,95%
84	TH-SCT-0,01	Min.	43,30%	43,87%
84	TH-EC-0,01	Max.	39,59%	39,40%
84	TH-EC-0,01	Min.	39,90%	39,70%

Tabla 6.6.4.4 Reducción de Fuerzas Internas en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al octavo piso, producidas por los registros.

Se puede observar que para ambos registros, tanto en las vigas y columnas, gracias a los disipadores, los cortantes y momentos máx. y mín. disminuyeron.

- Pórtico de 12 Pisos

% Reducción				
Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
49	TH-SCT-0,01	Max.	42,50%	42,51%
49	TH-SCT-0,01	Min.	39,61%	39,57%
49	TH-EC-0,01	Max.	18,08%	17,59%
49	TH-EC-0,01	Min.	48,74%	48,19%
50	TH-SCT-0,01	Max.	42,54%	42,61%
50	TH-SCT-0,01	Min.	39,28%	39,32%
50	TH-EC-0,01	Max.	17,91%	35,51%
50	TH-EC-0,01	Min.	45,51%	35,00%
51	TH-SCT-0,01	Max.	42,94%	40,50%
51	TH-SCT-0,01	Min.	39,18%	41,35%
51	TH-EC-0,01	Max.	21,56%	36,64%
51	TH-EC-0,01	Min.	38,99%	30,06%
52	TH-SCT-0,01	Max.	43,49%	40,94%
52	TH-SCT-0,01	Min.	39,37%	41,30%
52	TH-EC-0,01	Max.	23,63%	29,66%
52	TH-EC-0,01	Min.	27,19%	24,60%
53	TH-SCT-0,01	Max.	43,93%	44,01%
53	TH-SCT-0,01	Min.	39,44%	39,45%
53	TH-EC-0,01	Max.	23,71%	24,24%
53	TH-EC-0,01	Min.	24,12%	23,31%
54	TH-SCT-0,01	Max.	44,12%	39,34%
54	TH-SCT-0,01	Min.	39,37%	43,19%
54	TH-EC-0,01	Max.	30,24%	32,48%
54	TH-EC-0,01	Min.	18,60%	28,17%
55	TH-SCT-0,01	Max.	44,32%	40,43%
55	TH-SCT-0,01	Min.	39,65%	41,09%
55	TH-EC-0,01	Max.	37,42%	38,28%
55	TH-EC-0,01	Min.	14,33%	36,47%
56	TH-SCT-0,01	Max.	44,61%	41,32%
56	TH-SCT-0,01	Min.	40,55%	40,78%
56	TH-EC-0,01	Max.	39,56%	39,40%
56	TH-EC-0,01	Min.	6,82%	40,05%

57	TH-SCT-0,01	Max.	44,44%	41,24%
57	TH-SCT-0,01	Min.	41,52%	44,52%
57	TH-EC-0,01	Max.	38,58%	38,67%
57	TH-EC-0,01	Min.	7,94%	39,20%
58	TH-SCT-0,01	Max.	43,84%	42,23%
58	TH-SCT-0,01	Min.	42,46%	43,17%
58	TH-EC-0,01	Max.	42,19%	43,87%
58	TH-EC-0,01	Min.	43,93%	40,79%
59	TH-SCT-0,01	Max.	43,97%	43,03%
59	TH-SCT-0,01	Min.	43,23%	43,86%
59	TH-EC-0,01	Max.	50,05%	52,73%
59	TH-EC-0,01	Min.	59,45%	47,82%
60	TH-SCT-0,01	Max.	43,45%	42,41%
60	TH-SCT-0,01	Min.	41,49%	44,09%
60	TH-EC-0,01	Max.	55,56%	63,63%
60	TH-EC-0,01	Min.	65,57%	53,41%

Tabla 6.6.4.5 Reducción o Aumento de Fuerzas Internas en las Columnas del Eje 1-E del pórtico de 12 pisos, producidas por los registros.

% Reducción				
Etiqueta del elemento	Load Case		V2 (Tonf)	M3 (Tonf-m)
113	TH-SCT-0,01	Max.	42,61%	41,44%
113	TH-SCT-0,01	Min.	39,50%	41,27%
113	TH-EC-0,01	Max.	17,98%	36,04%
113	TH-EC-0,01	Min.	46,14%	36,34%
114	TH-SCT-0,01	Max.	42,87%	40,87%
114	TH-SCT-0,01	Min.	39,39%	41,41%
114	TH-EC-0,01	Max.	19,91%	37,28%
114	TH-EC-0,01	Min.	41,32%	36,81%
115	TH-SCT-0,01	Max.	43,28%	40,76%
115	TH-SCT-0,01	Min.	39,44%	41,52%
115	TH-EC-0,01	Max.	22,22%	32,84%
115	TH-EC-0,01	Min.	32,92%	32,67%
116	TH-SCT-0,01	Max.	43,73%	40,65%
116	TH-SCT-0,01	Min.	39,53%	41,77%

116	TH-EC-0,01	Max.	21,48%	22,37%
116	TH-EC-0,01	Min.	22,47%	22,56%
117	TH-SCT-0,01	Max.	44,03%	40,52%
117	TH-SCT-0,01	Min.	39,52%	41,71%
117	TH-EC-0,01	Max.	24,87%	24,97%
117	TH-EC-0,01	Min.	20,02%	24,77%
118	TH-SCT-0,01	Max.	44,22%	40,33%
118	TH-SCT-0,01	Min.	39,65%	41,52%
118	TH-EC-0,01	Max.	32,48%	32,55%
118	TH-EC-0,01	Min.	15,34%	32,41%
119	TH-SCT-0,01	Max.	44,51%	40,18%
119	TH-SCT-0,01	Min.	40,15%	43,05%
119	TH-EC-0,01	Max.	36,59%	36,62%
119	TH-EC-0,01	Min.	7,92%	36,56%
120	TH-SCT-0,01	Max.	44,52%	40,88%
120	TH-SCT-0,01	Min.	40,86%	41,24%
120	TH-EC-0,01	Max.	36,59%	36,60%
120	TH-EC-0,01	Min.	4,01%	36,58%
121	TH-SCT-0,01	Max.	44,30%	41,63%
121	TH-SCT-0,01	Min.	41,62%	41,63%
121	TH-EC-0,01	Max.	36,58%	36,56%
121	TH-EC-0,01	Min.	22,68%	36,59%
122	TH-SCT-0,01	Max.	44,16%	42,34%
122	TH-SCT-0,01	Min.	42,33%	42,32%
122	TH-EC-0,01	Max.	42,28%	42,30%
122	TH-EC-0,01	Min.	46,05%	42,26%
123	TH-SCT-0,01	Max.	44,11%	42,16%
123	TH-SCT-0,01	Min.	42,07%	41,98%
123	TH-EC-0,01	Max.	46,75%	46,82%
123	TH-EC-0,01	Min.	53,89%	46,68%
124	TH-SCT-0,01	Max.	42,73%	40,42%
124	TH-SCT-0,01	Min.	39,96%	41,57%
124	TH-EC-0,01	Max.	47,30%	47,49%
124	TH-EC-0,01	Min.	52,88%	47,11%

Tabla 6.6.4.6 Reducción de Fuerzas Internas en las Vigas, entre los Ejes D-E del primero al duodécimo piso, producidas por los registros.

Se puede observar que para ambos registros, tanto en las vigas y columnas, gracias a los disipadores, los cortantes y momentos máx. y mín. disminuyeron.

6.6.5. Diagramas de momento-curvatura de vigas y columnas

Como antes se mencionó, el programa no puede mostrar la energía inelástica de las estructuras asociada con los movimientos inducidos por los registros acelerográficos, por lo que para hacerse una idea del daño ocasionado por el efecto dinámico, se obtuvieron los diagramas momento-curvatura de una viga y columna de los 3 pórticos. Mediante esta actividad se buscó obtener el M_y (momento de fluencia de la sección) y compararlo con los momentos obtenidos para el caso sin disipadores y con disipadores, de tal manera que sea posible apreciar cuanto incurre el elemento estructural en el rango inelástico para cada situación. Con el programa SAP2000 es posible realizar esta gráfica por medio del uso del "Section Designer", en el cual se ingresaron las secciones previamente diseñadas de vigas y columnas. Cabe mencionar que el modelo utilizado para el hormigón fue el de Mander Confinado y para las vigas, el refuerzo a tensión va colocado en la parte inferior.

- Pórtico de 4 Pisos

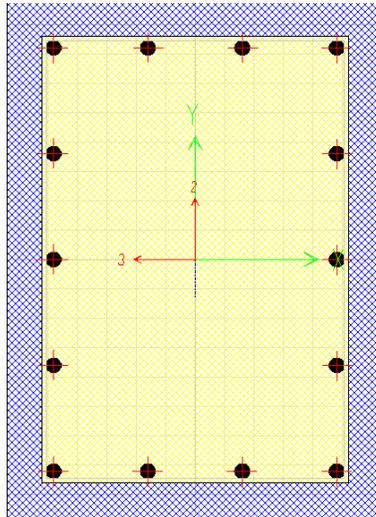


Fig. 6.6.5.1 Sección de la columna C40x55 creada en el Section Designer.

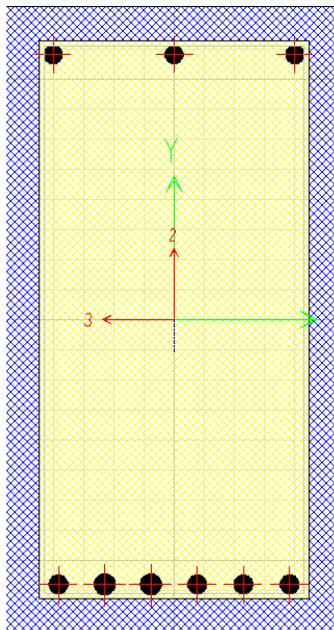


Fig. 6.6.5.2 Sección de la viga V35x65 creada en el Section Designer.

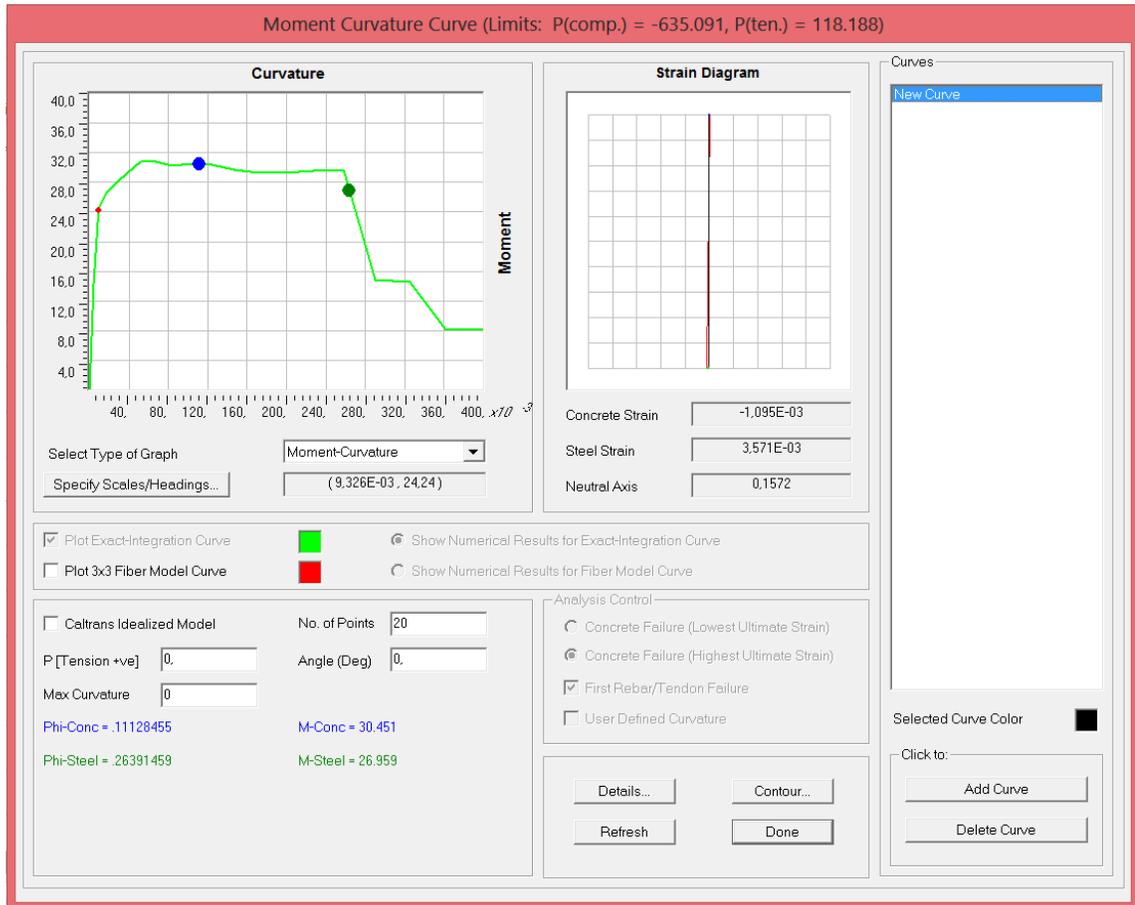


Fig. 6.6.5.3 Diagrama Momento-Curvatura para la columna C40x55 del pórtico de 4 pisos.

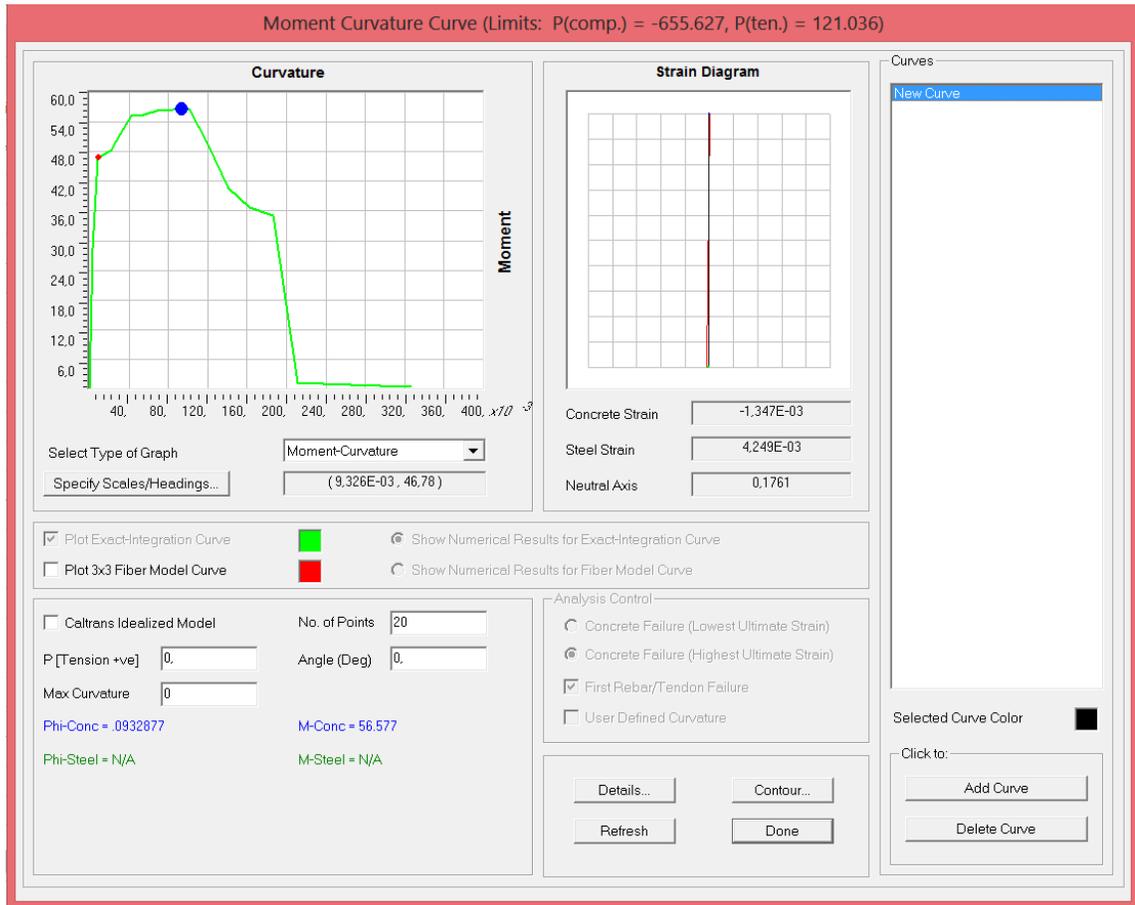


Fig. 6.6.5.4 Diagrama Momento-Curvatura para la viga V35x65 del pórtico de 4 pisos.

- Pórtico de 8 Pisos

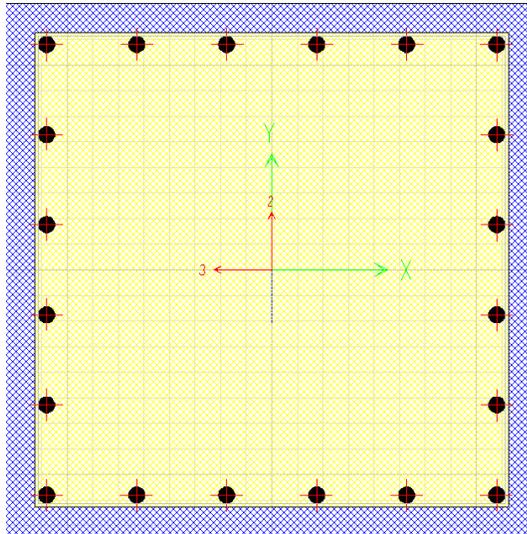


Fig. 6.6.5.5 Sección de la columna C65x65 creada en el Section Designer.

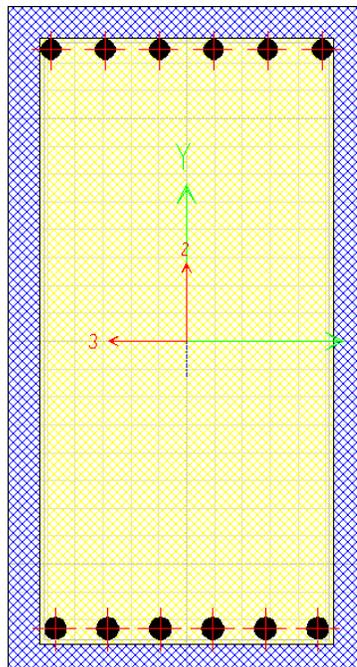


Fig. 6.6.5.6 Sección de la viga V40x75 creada en el Section Designer.

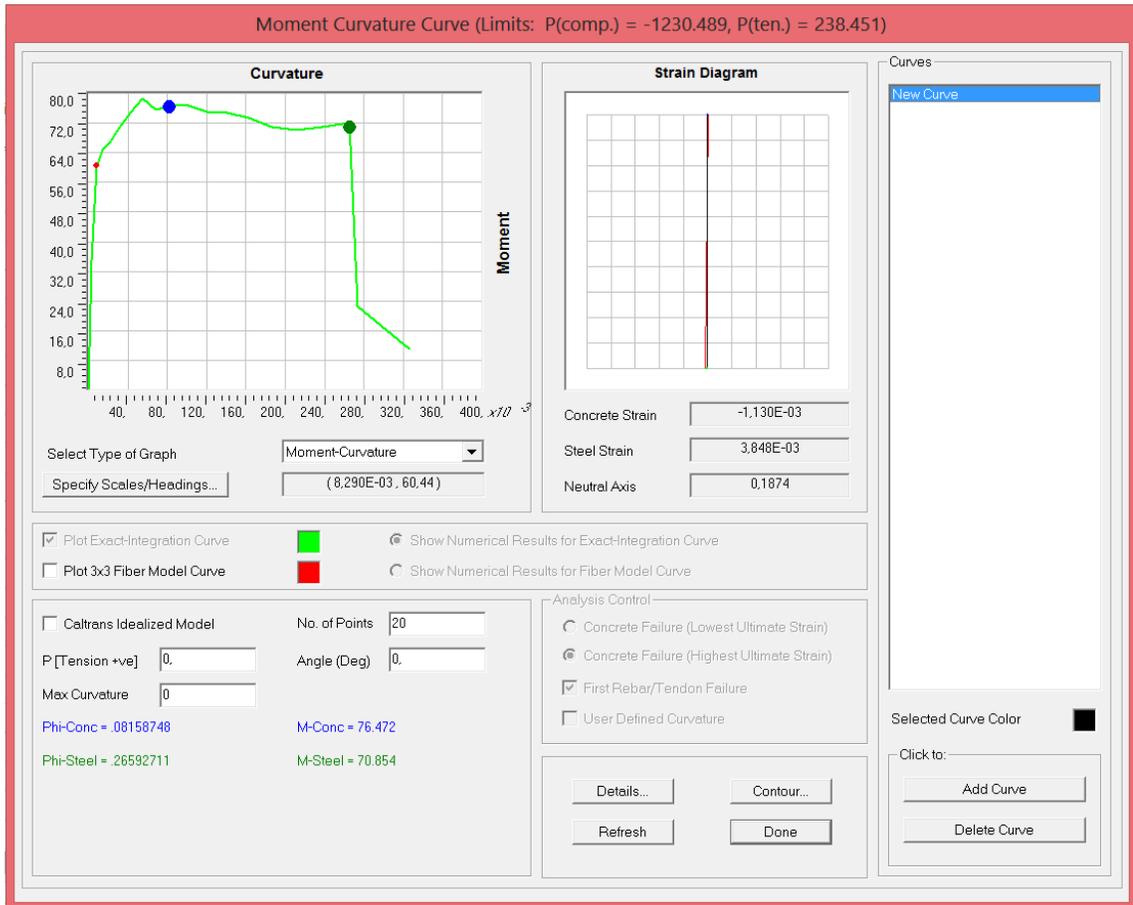


Fig. 6.6.5.7 Diagrama Momento-Curvatura para la columna C65x65 del pórtico de 8 pisos.

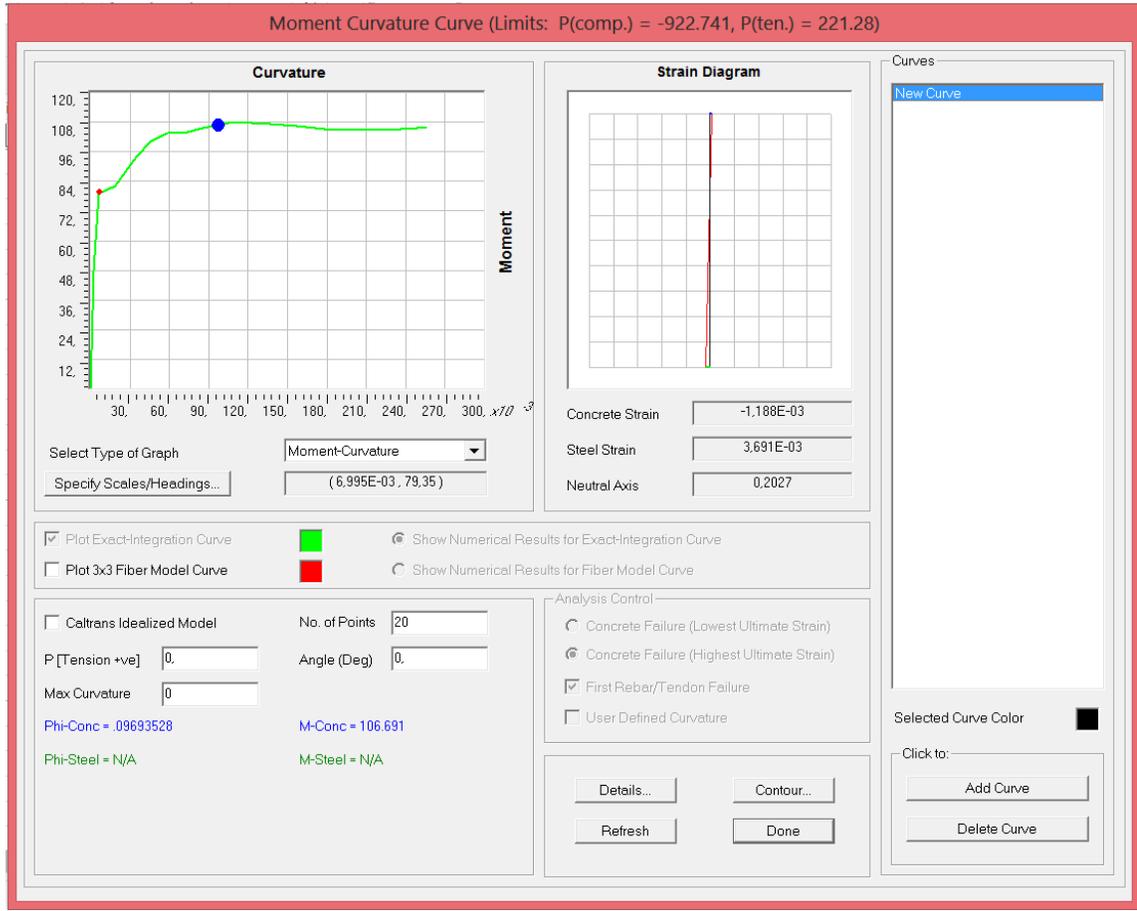


Fig. 6.6.5.8 Diagrama Momento-Curvatura para la viga V40x75 del pórtico de 8 pisos.

- Pórtico de 12 Pisos

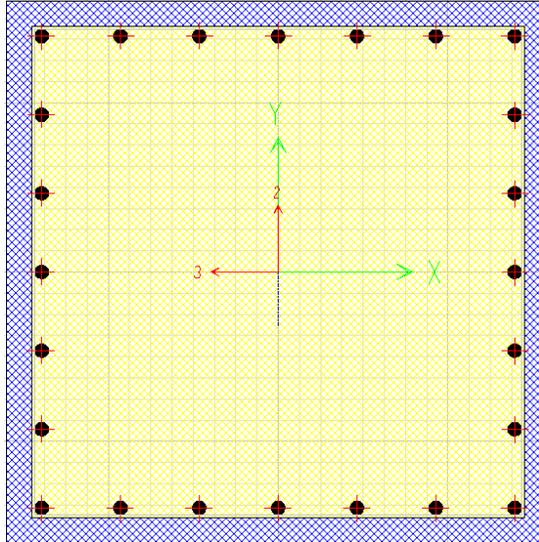


Fig. 6.6.5.9 Sección de la columna C80x80 creada en el Section Designer.

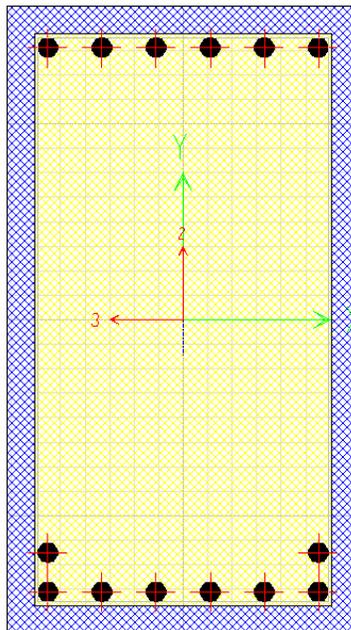


Fig. 6.6.5.10 Sección de la viga V45x80 creada en el Section Designer.

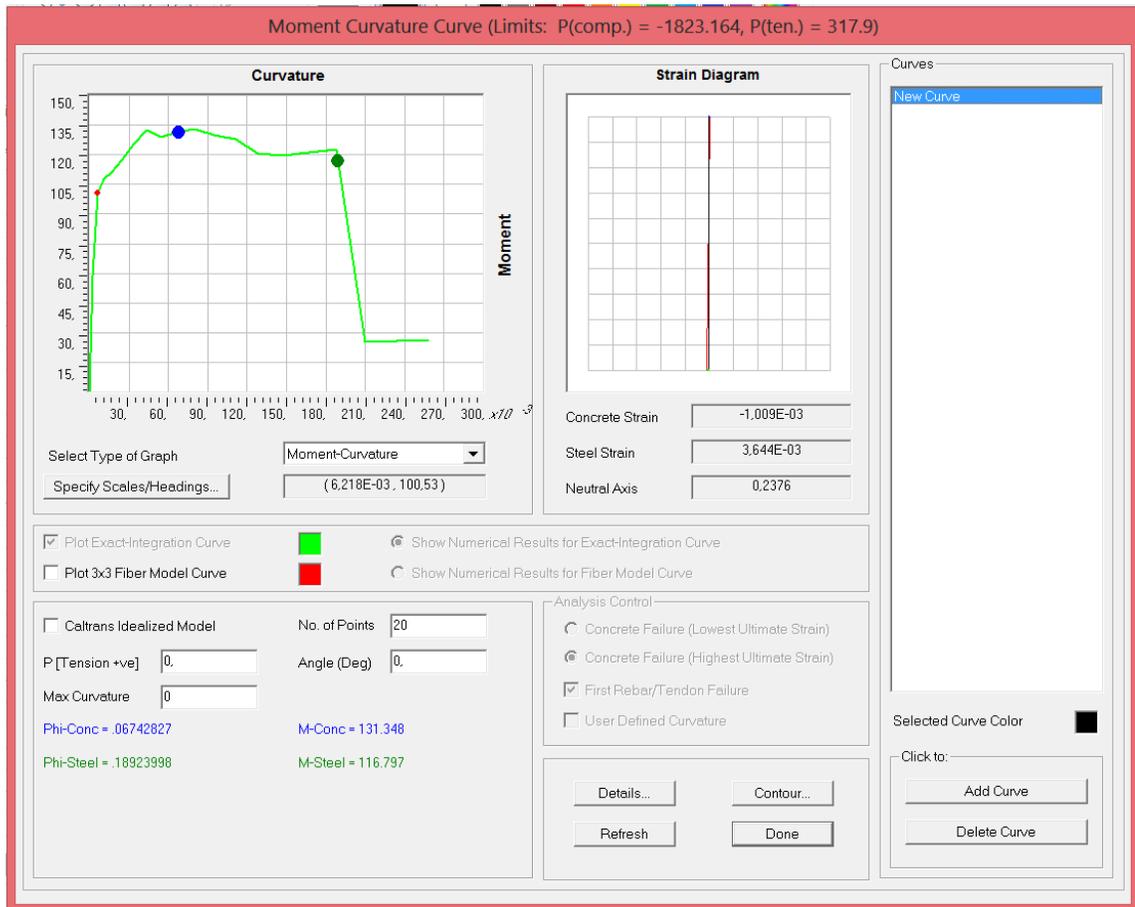


Fig. 6.6.5.11 Diagrama Momento-Curvatura para la columna C80x80 del pórtico de 12 pisos.

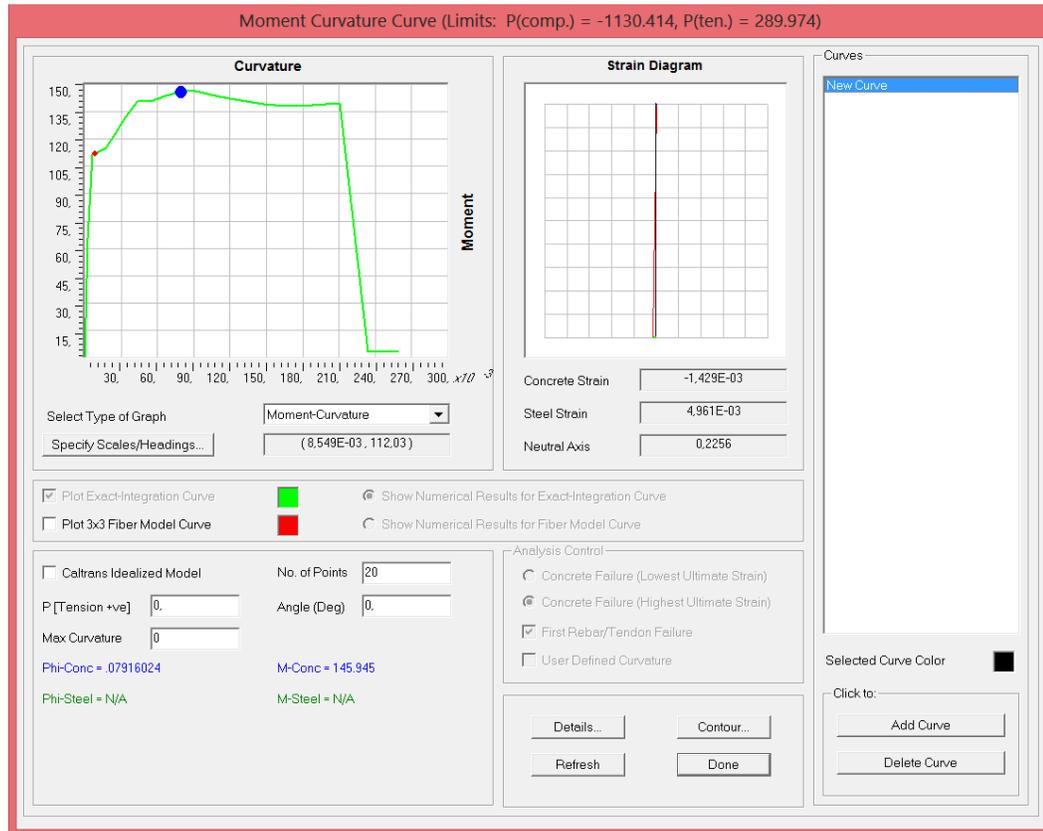


Fig. 6.6.5.12 Diagrama Momento-Curvatura para la viga V45x80 del pórtico de 12 pisos.

El armado de los elementos antes mencionados es el siguiente:

Pórtico	Elemento	Sección			Acero Longitudinal			
		b (cm)	h (cm)	recubrimiento (cm)	ρ	As (cm ²)	diam. Varillas (mm)	Num.Varillas
4	Columna	55	40	4	0,0128	28,15	16	14 ϕ 16
8	Columna	65	65	4	0,012	50,89	18	20 ϕ 18
12	Columna	80	80	4	0,0118	75,4	20	24 ϕ 20

Tabla 6.5.1 Secciones y armado de las columnas de las cuales se obtuvo el diagrama momento-curvatura.

Pórtico	Elemento	Sección			Acero Longitudinal							
		b (cm)	h (cm)	recubrimiento (cm)	ρ (negativo)	As (negativo) (cm ²)	ρ (positivo)	As (positivo) (cm ²)	diam. Va (neg) (mm)	diam. Va (pos) (mm)	Num. Varillas (negativo)	Num. Varillas (positivo)
4	Viga	35	65	4	0,01	20,82	0,0037	7,62	20 y 22	18	3 ϕ 20+3 ϕ 22	3 ϕ 18
8	Viga	40	75	4	0,0107	29,47	0,0083	22,8	25	22	6 ϕ 25	6 ϕ 22
12	Viga	45	80	4	0,012	39,28	0,0088	29,46	25	25	8 ϕ 25	6 ϕ 25

Tabla 6.5.2 Secciones y armado de las vigas de las cuales se obtuvo el diagrama momento-curvatura.

Pórtico	Elemento	My (Tonf-m)	Sin Disipador	Con Disipador
			M3-3 (Tonf-m)	M3-3 (Tonf-m)
4	C40x55	24,24	166,91	80,49
8	C65x65	60,44	325,34	177,65
12	C80x80	100,53	464,09	266,81

Tabla 6.5.3 Momentos de fluencia (My) para las columnas de los pórticos y sus correspondientes momentos actuantes, obtenidos del análisis con y sin disipadores.

Pórtico	Elemento	My (Tonf-m)	Sin Disipador	Con Disipador
			M3-3 (Tonf-m)	M3-3 (Tonf-m)
4	V35x65	46,78	113,86	56,19
8	V40x75	79,35	243,26	132,2
12	V45x80	112,03	267,07	156,85

Tabla 6.5.4 Momentos de fluencia (My) para las vigas de los pórticos y sus correspondientes momentos actuantes, obtenidos del análisis con y sin disipadores.

Al obtener los momentos de fluencia (My) para las diferentes secciones, vigas y columnas, se realizó una comparación con los momentos más críticos obtenidos de los análisis de los pórticos con y sin disipadores. Esta comparación permite tener una idea de que tanto daño sufrirá el elemento en ambos casos.

Resulta apreciable que las columnas incursionarán más en el rango inelástico que las vigas, además, los elementos del pórtico de 8 pisos son los que se ven más afectados debido a la aproximación del periodo de la estructura con el periodo del registro. De esta forma, con la ayuda de los disipadores es

posible reducir tales efectos en una magnitud considerable, dejando a los elementos con un daño menor.

CONCLUSIONES

Para concluir el presente trabajo se hace énfasis en que los disipadores de energía son dispositivos útiles dentro del campo de la sismo-resistencia para poder mejorar el desempeño de las estructuras, de tal forma que los daños se vean aminorados en gran medida, salvaguardando no sólo las vidas humanas, sino también el dinero invertido en la estructura.

El disipador de fluido viscoso constituye un elemento válido para cumplir con el objetivo anteriormente mencionado porque presenta características positivas, teniendo como principal, su desfase con la estructura. Esto se ve reflejado en la fuerza ejercida por el dispositivo, ya que está en función netamente de la velocidad y no con el desplazamiento o en una acción combinada, lo que permite que los esfuerzos en los elementos estructurales, en general, se vean reducidos, tal como se ilustró con las tablas del literal 6.6., resultando en una ventaja considerable frente al resto de los disipadores.

Para el análisis de estructuras con este tipo de disipador resulta necesario la evaluación de la respuesta usando registros acelerográficos de la zona en estudio. En el caso de que no se disponga de suficientes registros, y de magnitud considerable, es posible usar sismos de otros lugares pero con características similares de suelos. Escalar las ordenadas o reducir la frecuencia del registro son medidas aceptadas frente a la escasez de los mismos en la ciudad de Guayaquil, lo que da lugar la generación de un registro de un posible sismo que pudiera presentarse y causar un efecto de

consideración en las estructuras, más aún, si coincide el periodo del registro con el de la estructura.

Con lo antes expuesto, se puede decir que los edificios de 8 pisos cimentados en suelos blandos, como los de Guayaquil, con un periodo de aproximadamente 1 segundo, resultan ser los más proclives a tener problemas frente a la ocurrencia de sismos lejanos, cuyos periodos de ondas se hayan atenuado hasta un valor similar al del sitio donde se encuentra ubicada la estructura, provocándose el efecto de resonancia. Eso se comprueba por medio de una comparación entre los efectos producidos por el registro SCT, el cual es un registro en suelo blando, tomado en la ciudad de México, de un sismo que tuvo un epicentro a 400km de distancia y por lo tanto, una magnitud máxima de la aceleración de 0.16g, frente a los efectos producidos para el registro de El Centenario, el cual es un registro en suelo blando de un sismo cercano en la ciudad y con una magnitud máxima de la aceleración de 0.456g. Los edificios de 12 pisos son afectados por lo antes mencionado pero en una magnitud menor, en cambio para edificios de 4 pisos, de acuerdo con los resultados obtenidos, fue más perjudicial el registro de El Centenario debido en gran parte por la sincronización entre los periodos del registro y de la estructura, y además por la magnitud máxima de la aceleración.

Resulta que para poder definir de manera eficaz y económica las propiedades de los disipadores de fluido viscoso, es necesario realizar un análisis dinámico no-lineal. A pesar de que el programa SAP2000 permite realizarlo, éste no resulta ser del todo eficiente, dado a que no permite conocer la energía inelástica de la estructura, sino que se presume, se encuentra considerada dentro de la energía modal de amortiguamiento (Modal Damping

Energy). Conocer la energía inelástica de la estructura para el registro sísmico permite tener una idea del nivel de amortiguamiento que podría establecer para los disipadores, de tal forma que el daño asociado se vea reducido al igual que la deformación permanente de la misma. Para ello, se recomienda el uso de programas como el OpenSees o el Perform 3D.

Si se desea tener una idea del posible daño que pudiera tener un elemento estructural frente a un sismo, resulta útil elaborar un diagrama de momento-curvatura para observar que tanto se va a ver esforzado el elemento.

RECOMENDACIONES

En capítulos anteriores se lo mencionó, pero se vuelve a hacer énfasis en que los disipadores de fluido viscoso, a pesar de que están fuera de fase con la estructura, tienen un funcionamiento óptimo especialmente en estructuras flexibles. En estructuras rígidas, como los edificios de hormigón armado, resultan útiles, pero se requieren valores altos de amortiguamiento crítico para poder generar reducciones considerables en los efectos de un sismo. Más aún, si el uso de los disipadores tiene como otra finalidad, generar ahorro en cuanto a la reducción de las secciones de los elementos estructurales, esto se puede ver mermado por el gran costo de los dispositivos requeridos. Los disipadores de fluido viscoso no son elementos económicos como los disipadores histéricos metálicos.

A manera de criterio personal, el autor considera que en la práctica se justifica más el uso de estos dispositivos para edificios con periodos similares al periodo del suelo blando de la ciudad, lo que comprendería estructuras de 8 y 12 pisos. Para las estructuras menores a 8 pisos, un buen diseño sismo-resistente sería suficiente para garantizar un desempeño adecuado frente a los eventos sísmicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar Falconí, R. (2008). *Análisis Sísmico de Edificios* (Primera ed.). Quito, Ecuador: Centro de Investigaciones Científicas.
- Alonso González, J. (5 de Agosto de 2011). *Sismo de Bahía de Caráquez: 4 de Agosto de 1998*. Recuperado el 27 de Septiembre de 2013, de Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional: <http://www.igeqn.edu.ec/>
- Alonso González, J. (30 de Enero de 2012). *Terremoto de Esmeraldas de 1906 - Uno de los sismos más grandes de la historia reciente*. Recuperado el 27 de Septiembre de 2013, de Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional: <http://www.igeqn.edu.ec/>
- American Concrete Institute. (2008). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario*. American Concrete Institute.
- American Society of Civil Engineers. (2010). ASCE 7-10. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Estados Unidos.
- Argudo Rodríguez, J., Arellano Izaguirre, M. E., Peña Pozo, J., Villacrés Sánchez, A., & Mera Ortiz, W. (s.f.). *Volumen I: Reporte Final a la Secretaría del IDNDR de las Naciones Unidas*. Guayaquil.
- Bozorgnia, Y., & Bertero, V. V. (2004). *Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*. (Y. Bozorgnia, & V. V. Bertero, Edits.) CRC Press.
- Bozzo, L. M., & Barbat, A. H. (2004). *Diseño sismorresistente de edificios*. Barcelona, España: Reverté S.A.
- Campoverde Córdova, M. (2013). *Correlación empírica para la obtención de los valores del índice de compresión primaria C_c para los suelos de la ciudad de Guayaquil*. Guayaquil: Universidad Católica Santiago de Guayaquil.
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of Structures-Theory and Applications to Earthquake Engineering* (4 ed.). Pearson.

- Computers and Structures. (s.f.). *Link*. Recuperado el 20 de 02 de 2014, de CSI Knowledge Base: <https://wiki.csiamerica.com/display/kb/Link>
- Crisafulli, F., & Villafañe, E. (2002). *Espectros de Respuesta y de Diseño*.
- Das, B. M. (2008). *Principios de Ingeniería de Cimentaciones* (5 ed.). (R. C. Chávez, Ed.) México: Cengage Learning.
- Federal Emergency Management Agency. (1997). *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 273)*. Washington D.C.
- Hwang, J.-S. (2002). *Seismic Design of Structures with Viscous Dampers*, 15.
- Instituto de Geofísica (UNAM). (25 de Septiembre de 1985). *El Sismo del 19 de Septiembre de 1985*. Recuperado el 15 de 12 de 2013, de Informe y Evaluación Preliminar: http://www2.ssn.unam.mx:8080/website/jsp/Sismo85/sismo85_inf.htm
- Kelly, T. E. (2001). *In-Structure Damping and Energy Dissipation*. Wellington, New Zealand: Holmes Consulting Group.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1972). *Mecánica de Suelos*. México: Limusa-Wiley S.A.
- Nava, A. (1998). *Terremotos* (3 ed.). México: Fondos de Cultura Económica. Recuperado el 1 de Diciembre de 2013, de Terremotos: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/34/html/sec_11.html
- Nitsche, C. M. (Noviembre de 2011). *Protección Sísmica de Estructuras* (29 ed.). Santiago, Chile: Corporación de Desarrollo Tecnológico.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2013). NEC-11. *Capítulo 2: Peligro Sísmico y Requisitos de Diseño Sismo-resistente*, 89. Ecuador.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2013). NEC-11. *Capítulo 1: Cargas y Materiales*, 34. Ecuador.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2013). NEC-11. *Cap. 4: Estructuras de Hormigón Armado*. Ecuador.
- Oviedo , J. A., & Duque , M. P. (2006). Sistemas de Control de Respuesta Sísmica en Edificaciones. *Revista EIA*(ISSN 1794-1237 (6)), 105-120.

- Pardo Verdugo, J. P. (2007). *Control de la respuesta dinámica de estructuras mediante el uso de disipadores de energía de fluido viscoso del tipo lineal*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Soong, T. T., & Dargush, G. F. (1997). *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*. Wiley.
- Taylor Devices. (s.f.). *Damper Mounting Dimensions*. Recuperado el 03 de 03 de 2014, de Seismic Dampers and Seismic Protection Products: <http://taylordevices.com/dampers-seismic-protection.html>
- Taylor Devices. (s.f.). *Seismic Devices and Seismic Protection Products*. Recuperado el 15 de 02 de 2014, de <http://taylordevices.com/dampers-seismic-protection.html>
- Villacrés Sánchez, A., Argudo Rodríguez, J., Peña Pozo, J., & Vera, S. (s.f.). *Evaluación Volumen II: del Peligro Sísmico, Definición del Sismo adoptado para el Escenario Sísmico de Radius y Evaluación de Peligros Colaterales*. Guayaquil.
- Villareal Castro, G., & Oviedo Sarmiento, R. (2009). *Edificaciones con Disipadores de Energía*. Lima, Perú.
- Villaverde, R. (2009). *Fundamental Concepts of Earthquake Engineering*. CRC Press Taylor & Francis Group.

ANEXOS

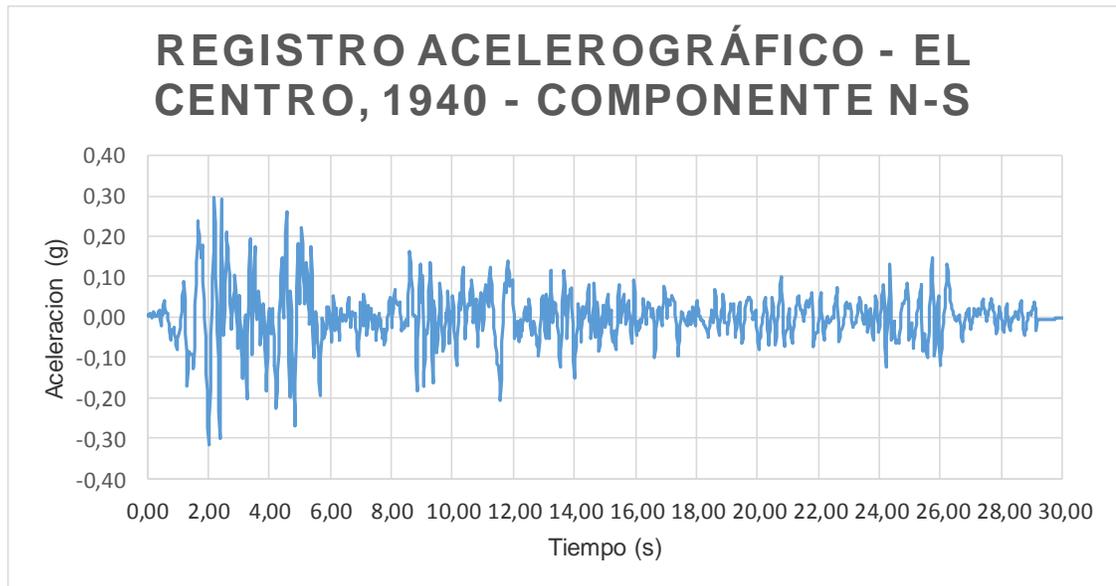
**Anexo 1: Resultados de perforaciones en suelos de la ciudad de Guayaquil
(Via La Costa), proporcionado por la Empresa Geocimientos S.A.**

ING. FRANCISCO GRAU Ingeniero Geotécnico		NOMENCLATURA		SIMBOLOGÍA		OBRA :		Estudio de Factibilidad - Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Vía a la Costa													
Laboratorio de Suelos, Hormigón y Asfalto Perforaciones y Sondeos Diseño de Pavimentos Fiscalizaciones		ω	Humedad Natural	RELLENO	+++++	UBICACIÓN		Vía a la Costa - Prov. del Guayas													
Dirección : Cdla. Villamil Mz. J. Villa 7 Teléfonos: 2581816 - 2330910 - 2444875 email: fjgrau@hotmail.com		LL	Límite Líquido	GRAVA		SONDEO :		3													
		LP	Límite Plástico	ARENA		SOLICITADO POR :		Hidroestudios S.A.													
		IP	Índice Plástico	LIMO		REVISADO POR :		Ing. Francisco Grau A.													
		Gs	Gravedad Específica	ARCILLA		FECHA :		02 / Septiembre / 2011													
		γ	Peso Específico	TURBA		NIVEL FREÁTICO :		No se reportó													
		qu	Resist. Compr. Simple			COORDENADAS :		9757849 N 607117 E													
		ϵ	Deformación			OBSERVACIONES :															
		Su. Torv	Resist. Corte TorVane																		
		Su. Vel	Resist. Corte Vetea																		
		N	Número de Golpes (SPT)																		
PROF (m)	CAMBIO DE ESTRATO	DESCRIPCION DE MATERIAL	ESTRATIG.	MUESTRA		SUCS	ω %	LL %	LP %	IP %	Gs	γ T/m ³	qu T/m ²	ϵ %	Su. Torv T/m ²	Su. Vel T/m ²	# 4 %	# 10 %	# 40 %	# 200 %	N SPT
1				1	0,50 a 1,00	CH	14	83	23	60		2,14	63,0	3,5			100	100	100	95	
2	2,00			2	1,50 a 2,00	CH	21	62	24	38		1,76	24,3	4,2			100	100	100	90	
3				3	2,50 a 3,00	GW-GM	11	NP	NP	NP							31	15	8	6	29
4				4	3,50 a 4,00	GP-GM	10	NP	NP	NP							28	24	9	6	31
5	5,00			5	4,50 a 5,00	GP-GM	10	NP	NP	NP							32	20	12	10	36
6		FIN DEL SONDEO																			
7																					
8																					
9																					
10																					

Anexo 2: Resultado de perforaciones en suelos de la ciudad de Guayaquil (Av. Barcelona), proporcionado por la Empresa Geocimientos S.A.

FRANCISCO GRAU AROSTEGUI INGENIERO GEOTECNICO LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES Ciudadela Los Almendros Mz. G, Villa 25 TELEFONO 2580613 - 2852536 (FAX)		NOMENCLATURA		SIMBOLOGIA		UBICACION		Estudio Geotecnico	
		HUMEDAD		RELENO		UBICACION:		Estudio Geotecnico	
		W1	Wp	GRAVA	ARENA	As. Marginal del Salado			
		IP	qu	ARCILLA	LIMO	1			
		E	Y	TURBA		Ing. Victor Naques			
		N	Gs			ING. FRANCISCO GRAU			
		Gs	IP			Abril del 2003			
		Su. Tor	Wp			1.10 m			
		Su. Vel	W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						
			qu						
			Y						
			Gs						
			IP						
			Wp						
			W1						
			Wp						
			IP						

Anexo 3: Registro Acelerográfico de la componente N-S del Sismo de Imperial Valley (El Centro, California 1940)



Tiempo (s)	Aceleración	0,360	0,00867	0,740	-0,03365
0,000	0,00630	0,380	0,01290	0,760	-0,05723
0,020	0,00364	0,400	0,01713	0,780	-0,04534
0,040	0,00099	0,420	-0,00343	0,800	-0,03346
0,060	0,00428	0,440	-0,02400	0,820	-0,03201
0,080	0,00758	0,460	-0,00992	0,840	-0,03056
0,100	0,01087	0,480	0,00416	0,860	-0,02911
0,120	0,00682	0,500	0,00528	0,880	-0,02766
0,140	0,00277	0,520	0,01653	0,900	-0,04116
0,160	-0,00128	0,540	0,02779	0,920	-0,05466
0,180	0,00368	0,560	0,03904	0,940	-0,06816
0,200	0,00864	0,580	0,02449	0,960	-0,08166
0,220	0,01360	0,600	0,00995	0,980	-0,06846
0,240	0,00727	0,620	0,00961	1,000	-0,05527
0,260	0,00094	0,640	0,00926	1,020	-0,04208
0,280	0,00420	0,660	0,00892	1,040	-0,04259
0,300	0,00221	0,680	-0,00486	1,060	-0,04311
0,320	0,00021	0,700	-0,01864	1,080	-0,02428
0,340	0,00444	0,720	-0,03242	1,100	-0,00545

1,120	0,01338	1,860	0,04196	2,600	0,20820
1,140	0,03221	1,880	-0,00314	2,620	0,18973
1,160	0,05104	1,900	-0,04824	2,640	0,17125
1,180	0,06987	1,920	-0,09334	2,660	0,13759
1,200	0,08870	1,940	-0,13843	2,680	0,10393
1,220	0,04524	1,960	-0,18353	2,700	0,07027
1,240	0,00179	1,980	-0,22863	2,720	0,03661
1,260	-0,04167	2,000	-0,27372	2,740	0,00295
1,280	-0,08513	2,020	-0,31882	2,760	-0,03071
1,300	-0,12858	2,040	-0,25024	2,780	-0,00561
1,320	-0,17204	2,060	-0,18166	2,800	0,01948
1,340	-0,12908	2,080	-0,11309	2,820	0,04458
1,360	-0,08613	2,100	-0,04451	2,840	0,06468
1,380	-0,08902	2,120	0,02407	2,860	0,08478
1,400	-0,09192	2,140	0,09265	2,880	0,10487
1,420	-0,09482	2,160	0,16123	2,900	0,05895
1,440	-0,09324	2,180	0,22981	2,920	0,01303
1,460	-0,09166	2,200	0,29839	2,940	-0,03289
1,480	-0,09478	2,220	0,23197	2,960	-0,07882
1,500	-0,09789	2,240	0,16554	2,980	-0,03556
1,520	-0,12902	2,260	0,09912	3,000	0,00771
1,540	-0,07652	2,280	0,03270	3,020	0,05097
1,560	-0,02401	2,300	-0,03372	3,040	0,01013
1,580	0,02849	2,320	-0,10014	3,060	-0,03071
1,600	0,08099	2,340	-0,16656	3,080	-0,07156
1,620	0,13350	2,360	-0,23299	3,100	-0,11240
1,640	0,18600	2,380	-0,29941	3,120	-0,15324
1,660	0,23850	2,400	-0,00421	3,140	-0,11314
1,680	0,21993	2,420	0,29099	3,160	-0,07304
1,700	0,20135	2,440	0,22380	3,180	-0,03294
1,720	0,18277	2,460	0,15662	3,200	0,00715
1,740	0,16420	2,480	0,08943	3,220	-0,06350
1,760	0,14562	2,500	0,02224	3,240	-0,13415
1,780	0,16143	2,520	-0,04495	3,260	-0,20480
1,800	0,17725	2,540	0,01834	3,280	-0,12482
1,820	0,13215	2,560	0,08163	3,300	-0,04485
1,840	0,08705	2,580	0,14491	3,320	0,03513

3,340	0,11510	4,080	-0,00021	4,820	-0,22369
3,360	0,19508	4,100	0,02104	4,840	-0,27177
3,380	0,12301	4,120	-0,01459	4,860	-0,15851
3,400	0,05094	4,140	-0,05022	4,880	-0,04525
3,420	-0,02113	4,160	-0,08585	4,900	0,06802
3,440	-0,09320	4,180	-0,12148	4,920	0,18128
3,460	-0,02663	4,200	-0,15711	4,940	0,14464
3,480	0,03995	4,220	-0,19274	4,960	0,10800
3,500	0,10653	4,240	-0,22837	4,980	0,07137
3,520	0,17311	4,260	-0,18145	5,000	0,03473
3,540	0,11283	4,280	-0,13453	5,020	0,09666
3,560	0,05255	4,300	-0,08761	5,040	0,15860
3,580	-0,00772	4,320	-0,04069	5,060	0,22053
3,600	0,01064	4,340	0,00623	5,080	0,18296
3,620	0,02900	4,360	0,05316	5,100	0,14538
3,640	0,04737	4,380	0,10008	5,120	0,10780
3,660	0,06573	4,400	0,14700	5,140	0,07023
3,680	0,02021	4,420	0,09754	5,160	0,03265
3,700	-0,02530	4,440	0,04808	5,180	0,06649
3,720	-0,07081	4,460	-0,00138	5,200	0,10033
3,740	-0,04107	4,480	0,05141	5,220	0,13417
3,760	-0,01133	4,500	0,10420	5,240	0,10337
3,780	0,00288	4,520	0,15699	5,260	0,07257
3,800	0,01709	4,540	0,20979	5,280	0,04177
3,820	0,03131	4,560	0,26258	5,300	0,01097
3,840	-0,02278	4,580	0,16996	5,320	-0,01983
3,860	-0,07686	4,600	0,07734	5,340	0,04438
3,880	-0,13095	4,620	-0,01527	5,360	0,10860
3,900	-0,18504	4,640	-0,10789	5,380	0,17281
3,920	-0,14347	4,660	-0,20051	5,400	0,10416
3,940	-0,10190	4,680	-0,06786	5,420	0,03551
3,960	-0,06034	4,700	0,06479	5,440	-0,03315
3,980	-0,01877	4,720	0,01671	5,460	-0,10180
4,000	0,02280	4,740	-0,03137	5,480	-0,07262
4,020	-0,00996	4,760	-0,07945	5,500	-0,04344
4,040	-0,04272	4,780	-0,12753	5,520	-0,01426
4,060	-0,02147	4,800	-0,17561	5,540	0,01492

5,560	-0,02025	6,300	-0,05698	7,040	-0,00231
5,580	-0,05543	6,320	-0,01826	7,060	-0,02235
5,600	-0,09060	6,340	0,02046	7,080	0,01791
5,620	-0,12578	6,360	0,00454	7,100	0,05816
5,640	-0,16095	6,380	-0,01138	7,120	0,03738
5,660	-0,19613	6,400	-0,00215	7,140	0,01660
5,680	-0,14784	6,420	0,00708	7,160	-0,00418
5,700	-0,09955	6,440	0,00496	7,180	-0,02496
5,720	-0,05127	6,460	0,00285	7,200	-0,04574
5,740	-0,00298	6,480	0,00074	7,220	-0,02071
5,760	-0,01952	6,500	-0,00534	7,240	0,00432
5,780	-0,03605	6,520	-0,01141	7,260	0,02935
5,800	-0,05259	6,540	0,00361	7,280	0,01526
5,820	-0,04182	6,560	0,01863	7,300	0,01806
5,840	-0,03106	6,580	0,03365	7,320	0,02086
5,860	-0,02903	6,600	0,04867	7,340	0,00793
5,880	-0,02699	6,620	0,03040	7,360	-0,00501
5,900	0,02515	6,640	0,01213	7,380	-0,01795
5,920	0,01770	6,660	-0,00614	7,400	-0,03089
5,940	0,02213	6,680	-0,02441	7,420	-0,01841
5,960	0,02656	6,700	0,01375	7,440	-0,00593
5,980	0,00419	6,720	0,01099	7,460	0,00655
6,000	-0,01819	6,740	0,00823	7,480	-0,02519
6,020	-0,04057	6,760	0,00547	7,500	-0,05693
6,040	-0,06294	6,780	0,00812	7,520	-0,04045
6,060	-0,02417	6,800	0,01077	7,540	-0,02398
6,080	0,01460	6,820	-0,00692	7,560	-0,00750
6,100	0,05337	6,840	-0,02461	7,580	0,00897
6,120	0,02428	6,860	-0,04230	7,600	0,00384
6,140	-0,00480	6,880	-0,05999	7,620	-0,00129
6,160	-0,03389	6,900	-0,07768	7,640	-0,00642
6,180	-0,00557	6,920	-0,09538	7,660	-0,01156
6,200	0,02274	6,940	-0,06209	7,680	-0,02619
6,220	0,00679	6,960	-0,02880	7,700	-0,04082
6,240	-0,00915	6,980	0,00448	7,720	-0,05545
6,260	-0,02509	7,000	0,03777	7,740	-0,04366
6,280	-0,04103	7,020	0,01773	7,760	-0,03188

7,780	-0,06964	8,520	-0,02123	9,260	0,09883
7,800	-0,05634	8,540	0,01523	9,280	0,13350
7,820	-0,04303	8,560	0,05170	9,300	0,05924
7,840	-0,02972	8,580	0,08816	9,320	-0,01503
7,860	-0,01642	8,600	0,12463	9,340	-0,08929
7,880	-0,00311	8,620	0,16109	9,360	-0,16355
7,900	0,01020	8,640	0,12987	9,380	-0,06096
7,920	0,02350	8,660	0,09864	9,400	0,04164
7,940	0,03681	8,680	0,06741	9,420	0,01551
7,960	0,05011	8,700	0,03618	9,440	-0,01061
7,980	0,02436	8,720	0,00495	9,460	-0,03674
8,000	-0,00139	8,740	0,00420	9,480	-0,06287
8,020	-0,02714	8,760	0,00345	9,500	-0,08899
8,040	-0,00309	8,780	0,00269	9,520	-0,05430
8,060	0,02096	8,800	-0,05922	9,540	-0,01961
8,080	0,04501	8,820	-0,12112	9,560	0,01508
8,100	0,06906	8,840	-0,18303	9,580	0,04977
8,120	0,05773	8,860	-0,12043	9,600	0,08446
8,140	0,04640	8,880	-0,05782	9,620	0,05023
8,160	0,03507	8,900	0,00479	9,640	0,01600
8,180	0,03357	8,920	0,06740	9,660	-0,01823
8,200	0,03207	8,940	0,13001	9,680	-0,05246
8,220	0,03057	8,960	0,08373	9,700	-0,08669
8,240	0,03250	8,980	0,03745	9,720	-0,06769
8,260	0,03444	9,000	0,06979	9,740	-0,04870
8,280	0,03637	9,020	0,10213	9,760	-0,02970
8,300	0,01348	9,040	-0,03517	9,780	-0,01071
8,320	-0,00942	9,060	-0,17247	9,800	0,00829
8,340	-0,03231	9,080	-0,13763	9,820	-0,00314
8,360	-0,02997	9,100	-0,10278	9,840	0,02966
8,380	-0,03095	9,120	-0,06794	9,860	0,06246
8,400	-0,03192	9,140	-0,03310	9,880	-0,00234
8,420	-0,02588	9,160	-0,03647	9,900	-0,06714
8,440	-0,01984	9,180	-0,03984	9,920	-0,04051
8,460	-0,01379	9,200	-0,00517	9,940	-0,01388
8,480	-0,00775	9,220	0,02950	9,960	0,01274
8,500	-0,01449	9,240	0,06417	9,980	0,00805

10,000	0,03024	10,740	0,02611	11,480	-0,11521
10,020	0,05243	10,760	0,04543	11,500	-0,11846
10,040	0,02351	10,780	0,01571	11,520	-0,12170
10,060	-0,00541	10,800	-0,01402	11,540	-0,12494
10,080	-0,03432	10,820	-0,04374	11,560	-0,16500
10,100	-0,06324	10,840	-0,07347	11,580	-0,20505
10,120	-0,09215	10,860	-0,03990	11,600	-0,15713
10,140	-0,12107	10,880	-0,00633	11,620	-0,10921
10,160	-0,08450	10,900	0,02724	11,640	-0,06129
10,180	-0,04794	10,920	0,06080	11,660	-0,01337
10,200	-0,01137	10,940	0,03669	11,680	0,03455
10,220	0,02520	10,960	0,01258	11,700	0,08247
10,240	0,06177	10,980	-0,01153	11,720	0,07576
10,260	0,04028	11,000	-0,03564	11,740	0,06906
10,280	0,01880	11,020	-0,00677	11,760	0,06236
10,300	0,04456	11,040	0,02210	11,780	0,08735
10,320	0,07032	11,060	0,05098	11,800	0,11235
10,340	0,09608	11,080	0,07985	11,820	0,13734
10,360	0,12184	11,100	0,06915	11,840	0,12175
10,380	0,06350	11,120	0,05845	11,860	0,10616
10,400	0,00517	11,140	0,04775	11,880	0,09057
10,420	-0,05317	11,160	0,03706	11,900	0,07498
10,440	-0,03124	11,180	0,02636	11,920	0,08011
10,460	-0,00930	11,200	0,05822	11,940	0,08524
10,480	0,01263	11,220	0,09009	11,960	0,09037
10,500	0,03457	11,240	0,12196	11,980	0,06208
10,520	0,03283	11,260	0,10069	12,000	0,03378
10,540	0,03109	11,280	0,07943	12,020	0,00549
10,560	0,02935	11,300	0,05816	12,040	-0,02281
10,580	0,04511	11,320	0,03689	12,060	-0,05444
10,600	0,06087	11,340	0,01563	12,080	-0,04030
10,620	0,07663	11,360	-0,00564	12,100	-0,02615
10,640	0,09239	11,380	-0,02690	12,120	-0,01201
10,660	0,05742	11,400	-0,04817	12,140	-0,02028
10,680	0,02245	11,420	-0,06944	12,160	-0,02855
10,700	-0,01252	11,440	-0,09070	12,180	-0,06243
10,720	0,00680	11,460	-0,11197	12,200	-0,03524

12,220	-0,00805	12,960	0,05301	13,700	0,04078
12,240	-0,04948	12,980	0,03176	13,720	0,00387
12,260	-0,03643	13,000	0,01051	13,740	0,00284
12,280	-0,02337	13,020	-0,01073	13,760	0,00182
12,300	-0,03368	13,040	-0,03198	13,780	-0,05513
12,320	-0,01879	13,060	-0,05323	13,800	0,04732
12,340	-0,00389	13,080	0,00186	13,820	0,05223
12,360	0,01100	13,100	0,05696	13,840	0,05715
12,380	0,02589	13,120	0,01985	13,860	0,06206
12,400	0,01446	13,140	-0,01726	13,880	0,06698
12,420	0,00303	13,160	-0,05438	13,900	0,07189
12,440	-0,00840	13,180	-0,01204	13,920	0,02705
12,460	0,00463	13,200	0,03031	13,940	-0,01779
12,480	0,01766	13,220	0,07265	13,960	-0,06263
12,500	0,03069	13,240	0,11499	13,980	-0,10747
12,520	0,04372	13,260	0,07237	14,000	-0,15232
12,540	0,02165	13,280	0,02975	14,020	-0,12591
12,560	-0,00042	13,300	-0,01288	14,040	-0,09950
12,580	-0,02249	13,320	0,01212	14,060	-0,07309
12,600	-0,04456	13,340	0,03711	14,080	-0,04668
12,620	-0,03638	13,360	0,03517	14,100	-0,02027
12,640	-0,02819	13,380	0,03323	14,120	0,00614
12,660	-0,02001	13,400	0,01853	14,140	0,03255
12,680	-0,01182	13,420	0,00383	14,160	0,00859
12,700	-0,02445	13,440	0,00342	14,180	-0,01537
12,720	-0,03707	13,460	-0,02181	14,200	-0,03932
12,740	-0,04969	13,480	-0,04704	14,220	-0,06328
12,760	-0,05882	13,500	-0,07227	14,240	-0,03322
12,780	-0,06795	13,520	-0,09750	14,260	-0,00315
12,800	-0,07707	13,540	-0,12273	14,280	0,02691
12,820	-0,08620	13,560	-0,08317	14,300	0,01196
12,840	-0,09533	13,580	-0,04362	14,320	-0,00300
12,860	-0,06276	13,600	-0,00407	14,340	0,00335
12,880	-0,03018	13,620	0,03549	14,360	0,00970
12,900	0,00239	13,640	0,07504	14,380	0,01605
12,920	0,03496	13,660	0,11460	14,400	0,02239
12,940	0,04399	13,680	0,07769	14,420	0,04215

14,440	0,06191	15,180	-0,00201	15,920	0,01380
14,460	0,08167	15,200	0,01589	15,940	0,05359
14,480	0,03477	15,220	-0,01024	15,960	0,09338
14,500	-0,01212	15,240	-0,03636	15,980	0,05883
14,520	-0,01309	15,260	-0,06249	16,000	0,02429
14,540	-0,01407	15,280	-0,04780	16,020	-0,01026
14,560	-0,05274	15,300	-0,03311	16,040	-0,04480
14,580	-0,02544	15,320	-0,04941	16,060	-0,01083
14,600	0,00186	15,340	-0,06570	16,080	-0,01869
14,620	0,02916	15,360	-0,08200	16,100	-0,02655
14,640	0,05646	15,380	-0,04980	16,120	-0,03441
14,660	0,08376	15,400	-0,01760	16,140	-0,02503
14,680	0,01754	15,420	0,01460	16,160	-0,01564
14,700	-0,04869	15,440	0,04680	16,180	-0,00626
14,720	-0,02074	15,460	0,07900	16,200	-0,01009
14,740	0,00722	15,480	0,04750	16,220	-0,01392
14,760	0,03517	15,500	0,01600	16,240	0,01490
14,780	-0,00528	15,520	-0,01550	16,260	0,04372
14,800	-0,04572	15,540	-0,00102	16,280	0,03463
14,820	-0,08617	15,560	0,01347	16,300	0,02098
14,840	-0,06960	15,580	0,02795	16,320	0,00733
14,860	-0,05303	15,600	0,04244	16,340	-0,00632
14,880	-0,03646	15,620	0,05692	16,360	-0,01997
14,900	-0,01989	15,640	0,03781	16,380	0,00767
14,920	-0,00332	15,660	0,01870	16,400	0,03532
14,940	0,01325	15,680	-0,00041	16,420	0,03409
14,960	0,02982	15,700	-0,01952	16,440	0,03287
14,980	0,01101	15,720	-0,00427	16,460	0,03164
15,000	-0,00781	15,740	0,01098	16,480	0,02403
15,020	-0,02662	15,760	0,02623	16,500	0,01642
15,040	-0,00563	15,780	0,04148	16,520	0,00982
15,060	0,01536	15,800	0,01821	16,540	0,00322
15,080	0,03635	15,820	-0,00506	16,560	-0,00339
15,100	0,05734	15,840	-0,00874	16,580	0,02202
15,120	0,03159	15,860	-0,03726	16,600	-0,01941
15,140	0,00584	15,880	-0,06579	16,620	-0,06085
15,160	-0,01992	15,900	-0,02600	16,640	-0,10228

16,660	-0,07847	17,400	-0,09592	18,140	-0,00258
16,680	-0,05466	17,420	-0,07745	18,160	-0,00486
16,700	-0,03084	17,440	-0,05899	18,180	-0,00713
16,720	-0,00703	17,460	-0,04052	18,200	-0,00941
16,740	0,01678	17,480	-0,02206	18,220	-0,01168
16,760	0,01946	17,500	-0,00359	18,240	-0,01396
16,780	0,02214	17,520	0,01487	18,260	-0,01750
16,800	0,02483	17,540	0,01005	18,280	-0,02104
16,820	0,01809	17,560	0,00523	18,300	-0,02458
16,840	-0,00202	17,580	0,00041	18,320	-0,02813
16,860	-0,02213	17,600	-0,00441	18,340	-0,03167
16,880	-0,00278	17,620	-0,00923	18,360	-0,03521
16,900	0,01656	17,640	-0,01189	18,380	-0,04205
16,920	0,03590	17,660	-0,01523	18,400	-0,04889
16,940	0,05525	17,680	-0,01856	18,420	-0,03559
16,960	0,07459	17,700	-0,02190	18,440	-0,02229
16,980	0,06203	17,720	-0,00983	18,460	-0,00899
17,000	0,04948	17,740	0,00224	18,480	0,00431
17,020	0,03692	17,760	0,01431	18,500	0,01762
17,040	-0,00145	17,780	0,00335	18,520	0,00714
17,060	0,04599	17,800	-0,00760	18,540	-0,00334
17,080	0,04079	17,820	-0,01856	18,560	-0,01383
17,100	0,03558	17,840	-0,00737	18,580	0,01314
17,120	0,03037	17,860	0,00383	18,600	0,04011
17,140	0,03626	17,880	0,01502	18,620	0,06708
17,160	0,04215	17,900	0,02622	18,640	0,04820
17,180	0,04803	17,920	0,01016	18,660	0,02932
17,200	0,05392	17,940	-0,00590	18,680	0,01043
17,220	0,04947	17,960	-0,02196	18,700	-0,00845
17,240	0,04502	17,980	-0,00121	18,720	-0,02733
17,260	0,04056	18,000	0,01953	18,740	-0,04621
17,280	0,03611	18,020	0,04027	18,760	-0,03155
17,300	0,03166	18,040	0,02826	18,780	-0,01688
17,320	0,00614	18,060	0,01625	18,800	-0,00222
17,340	-0,01937	18,080	0,00424	18,820	0,01244
17,360	-0,04489	18,100	0,00196	18,840	0,02683
17,380	-0,07040	18,120	-0,00031	18,860	0,04121

18,880	0,05559	19,620	0,02254	21,840	-0,07220
18,900	0,03253	19,640	0,03747	21,860	-0,06336
18,920	0,00946	19,660	0,04001	21,880	-0,05451
18,940	-0,01360	19,680	0,04256	21,900	-0,04566
18,960	-0,01432	19,700	0,04507	21,920	-0,03681
18,980	-0,01504	19,720	0,04759	21,940	-0,03678
19,000	-0,01576	19,740	0,05010	21,960	-0,03675
19,020	-0,04209	19,760	0,04545	21,980	-0,03672
19,040	-0,02685	19,780	0,04080	22,000	-0,01765
19,060	-0,01161	19,800	0,02876	22,020	0,00143
19,080	0,00363	19,820	0,01671	22,040	0,02051
19,100	0,01887	19,840	0,00467	22,060	0,03958
19,120	0,03411	19,860	-0,00738	22,080	0,05866
19,140	0,03115	19,880	-0,00116	22,100	0,03556
19,160	0,02819	19,900	0,00506	22,120	0,01245
19,180	0,02917	19,920	0,01128	22,140	-0,01066
19,200	0,03015	19,940	0,01750	22,160	-0,03376
19,220	0,03113	19,960	-0,00211	22,180	-0,05687
19,240	0,00388	19,980	-0,02173	22,200	-0,04502
19,260	-0,02337	20,000	-0,04135	22,220	-0,03317
19,280	-0,05062	20,020	-0,06096	22,240	-0,02131
19,300	-0,03820	20,040	-0,08058	22,260	-0,00946
19,320	-0,02579	20,060	-0,06995	22,280	0,00239
19,340	-0,01337	20,080	-0,05931	22,300	-0,00208
19,360	-0,00095	20,100	-0,04868	22,320	-0,00654
19,380	0,01146	20,120	-0,03805	22,340	-0,01101
19,400	0,02388	20,140	-0,02557	22,360	-0,01548
19,420	0,03629	20,160	-0,01310	22,380	-0,01200
19,440	0,01047	20,180	-0,00063	22,400	-0,00851
19,460	-0,01535	20,200	0,01185	22,420	-0,00503
19,480	-0,04117	20,220	0,02432	22,440	-0,00154
19,500	-0,06699	20,240	0,03680	22,460	0,00195
19,520	-0,05207	20,260	0,04927	22,480	0,00051
19,540	-0,03715	20,280	0,02974	22,500	-0,00092
19,560	-0,02222	20,300	0,01021	22,520	0,01135
19,580	-0,00730	20,320	-0,00932	22,540	0,02363
19,600	0,00762	20,340	-0,02884	22,560	0,03590

22,580	0,04818	23,320	0,02835	24,060	0,02210
22,600	0,06045	23,340	0,03836	24,080	0,03707
22,620	0,07273	23,360	0,04838	24,100	0,05204
22,640	0,02847	23,380	0,03749	24,120	0,06701
22,660	-0,01579	23,400	0,02660	24,140	0,08198
22,680	-0,06004	23,420	0,01571	24,160	0,03085
22,700	-0,05069	23,440	0,00482	24,180	-0,02027
22,720	-0,04134	23,460	-0,00607	24,200	-0,07140
22,740	-0,03199	23,480	-0,01696	24,220	-0,12253
22,760	-0,03135	23,500	-0,00780	24,240	-0,08644
22,780	-0,03071	23,520	0,00136	24,260	-0,05035
22,800	-0,03007	23,540	0,01052	24,280	-0,01426
22,820	-0,01863	23,560	0,01968	24,300	0,02183
22,840	-0,00719	23,580	0,02884	24,320	0,05792
22,860	0,00425	23,600	-0,00504	24,340	0,09400
22,880	0,01570	23,620	-0,03893	24,360	0,13009
22,900	0,02714	23,640	-0,02342	24,380	0,03611
22,920	0,03858	23,660	-0,00791	24,400	-0,05787
22,940	0,02975	23,680	0,00759	24,420	-0,04802
22,960	0,02092	23,700	0,02310	24,440	-0,03817
22,980	0,02334	23,720	0,00707	24,460	-0,02832
23,000	0,02576	23,740	-0,00895	24,480	-0,01846
23,020	0,02819	23,760	-0,02498	24,500	-0,00861
23,040	0,03061	23,780	-0,04100	24,520	-0,03652
23,060	0,03304	23,800	-0,05703	24,540	-0,06444
23,080	0,01371	23,820	-0,02920	24,560	-0,06169
23,100	-0,00561	23,840	-0,00137	24,580	-0,05894
23,120	-0,02494	23,860	0,02645	24,600	-0,05618
23,140	-0,02208	23,880	0,05428	24,620	-0,06073
23,160	-0,01923	23,900	0,03587	24,640	-0,06528
23,180	-0,01638	23,920	0,01746	24,660	-0,04628
23,200	-0,01353	23,940	-0,00096	24,680	-0,02728
23,220	-0,01261	23,960	-0,01937	24,700	-0,00829
23,240	-0,01170	23,980	-0,03778	24,720	0,01071
23,260	-0,00169	24,000	-0,02281	24,740	0,02970
23,280	0,00833	24,020	-0,00784	24,760	0,03138
23,300	0,01834	24,040	0,00713	24,780	0,03306

24,800	0,03474	25,540	-0,07590	26,280	0,08982
24,820	0,03642	25,560	-0,08738	26,300	0,06969
24,840	0,04574	25,580	-0,09885	26,320	0,04955
24,860	0,05506	25,600	-0,06798	26,340	0,04006
24,880	0,06439	25,620	-0,03710	26,360	0,03056
24,900	0,07371	25,640	-0,00623	26,380	0,02107
24,920	0,08303	25,660	0,02465	26,400	0,01158
24,940	0,03605	25,680	0,05553	26,420	0,00780
24,960	-0,01092	25,700	0,08640	26,440	0,00402
24,980	-0,05790	25,720	0,11728	26,460	0,00024
25,000	-0,04696	25,740	0,14815	26,480	-0,00354
25,020	-0,03602	25,760	0,08715	26,500	-0,00732
25,040	-0,02508	25,780	0,02615	26,520	-0,01110
25,060	-0,01414	25,800	-0,03485	26,540	-0,00780
25,080	-0,03561	25,820	-0,09584	26,560	-0,00450
25,100	-0,05708	25,840	-0,07100	26,580	-0,00120
25,120	-0,07855	25,860	-0,04616	26,600	0,00210
25,140	-0,06304	25,880	-0,02132	26,620	0,00540
25,160	-0,04753	25,900	0,00353	26,640	-0,00831
25,180	-0,03203	25,920	0,02837	26,660	-0,02203
25,200	-0,01652	25,940	0,05321	26,680	-0,03575
25,220	-0,00102	25,960	-0,00469	26,700	-0,04947
25,240	0,00922	25,980	-0,06258	26,720	-0,06319
25,260	0,01946	26,000	-0,12048	26,740	-0,05046
25,280	0,02970	26,020	-0,09960	26,760	-0,03773
25,300	0,03993	26,040	-0,07872	26,780	-0,02500
25,320	0,05017	26,060	-0,05784	26,800	-0,01227
25,340	0,06041	26,080	-0,03696	26,820	0,00046
25,360	0,07065	26,100	-0,01608	26,840	0,00482
25,380	0,08089	26,120	0,00480	26,860	0,00919
25,400	-0,00192	26,140	0,02568	26,880	0,01355
25,420	-0,08473	26,160	0,04656	26,900	0,01791
25,440	-0,07032	26,180	0,06744	26,920	0,02228
25,460	-0,05590	26,200	0,08832	26,940	0,00883
25,480	-0,04148	26,220	0,10920	26,960	-0,00462
25,500	-0,05296	26,240	0,13008	26,980	-0,01807
25,520	-0,06443	26,260	0,10995	27,000	-0,03152

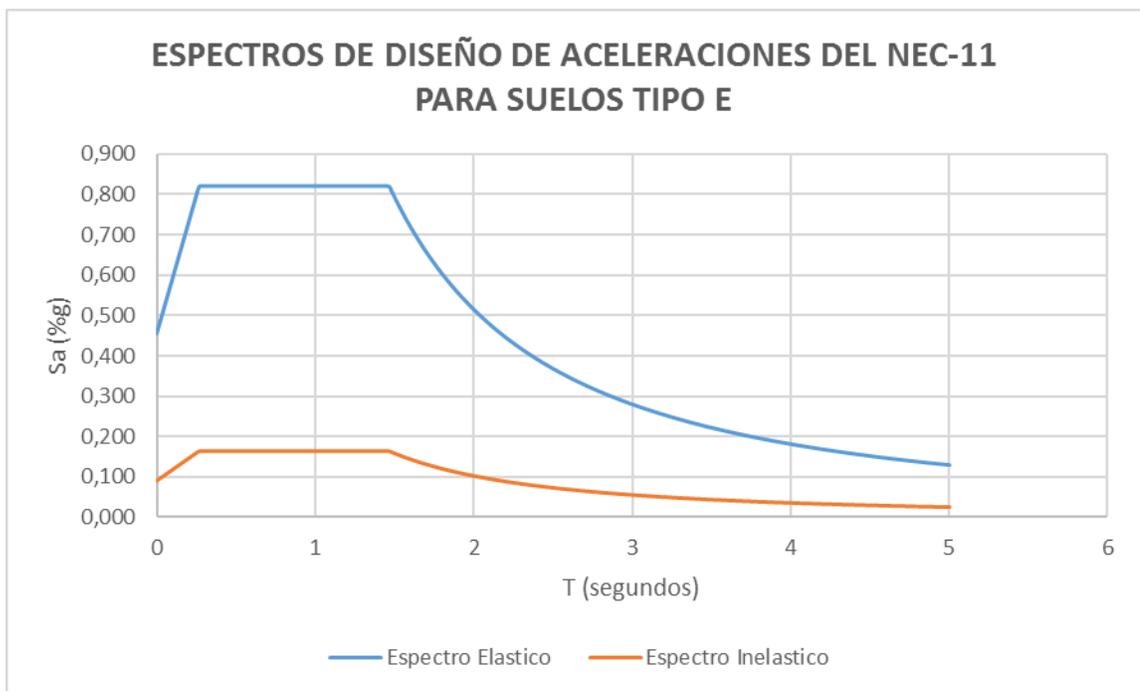
27,020	-0,02276	27,760	0,00974	28,500	0,00791
27,040	-0,01401	27,780	0,00086	28,520	0,00093
27,060	-0,00526	27,800	-0,01333	28,540	-0,00605
27,080	0,00350	27,820	-0,02752	28,560	0,00342
27,100	0,01225	27,840	-0,04171	28,580	0,01288
27,120	0,02101	27,860	-0,02812	28,600	0,02235
27,140	0,01437	27,880	-0,01453	28,620	0,03181
27,160	0,00773	27,900	-0,00094	28,640	0,04128
27,180	0,00110	27,920	0,01264	28,660	0,02707
27,200	0,00823	27,940	0,02623	28,680	0,01287
27,220	0,01537	27,960	0,01690	28,700	-0,00134
27,240	0,02251	27,980	0,00756	28,720	-0,01554
27,260	0,01713	28,000	-0,00177	28,740	-0,02975
27,280	0,01175	28,020	-0,01111	28,760	-0,04395
27,300	0,00637	28,040	-0,02044	28,780	-0,03612
27,320	0,01376	28,060	-0,02977	28,800	-0,02828
27,340	0,02114	28,080	-0,03911	28,820	-0,02044
27,360	0,02852	28,100	-0,02442	28,840	-0,01260
27,380	0,03591	28,120	-0,00973	28,860	-0,00476
27,400	0,04329	28,140	0,00496	28,880	0,00307
27,420	0,03458	28,160	0,01965	28,900	0,01091
27,440	0,02587	28,180	0,03434	28,920	0,00984
27,460	0,01715	28,200	0,02054	28,940	0,00876
27,480	0,00844	28,220	0,00674	28,960	0,00768
27,500	-0,00027	28,240	-0,00706	28,980	0,00661
27,520	-0,00898	28,260	-0,02086	29,000	0,01234
27,540	-0,00126	28,280	-0,03466	29,020	0,01807
27,560	0,00645	28,300	-0,02663	29,040	0,02380
27,580	0,01417	28,320	-0,01860	29,060	0,02953
27,600	0,02039	28,340	-0,01057	29,080	0,03526
27,620	0,02661	28,360	-0,00254	29,100	0,02784
27,640	0,03283	28,380	-0,00063	29,120	0,02042
27,660	0,03905	28,400	0,00128	29,140	0,01300
27,680	0,04527	28,420	0,00319	29,160	-0,03415
27,700	0,03639	28,440	0,00510	29,180	-0,00628
27,720	0,02750	28,460	0,00999	29,200	-0,00621
27,740	0,01862	28,480	0,01488	29,220	-0,00615

29,240	-0,00609	29,980	-0,00374	30,720	-0,00139
29,260	-0,00602	30,000	-0,00368	30,740	-0,00133
29,280	-0,00596	30,020	-0,00361	30,760	-0,00127
29,300	-0,00590	30,040	-0,00355	30,780	-0,00120
29,320	-0,00583	30,060	-0,00349	30,800	-0,00114
29,340	-0,00577	30,080	-0,00342	30,820	-0,00108
29,360	-0,00571	30,100	-0,00336	30,840	-0,00101
29,380	-0,00564	30,120	-0,00330	30,860	-0,00095
29,400	-0,00558	30,140	-0,00323	30,880	-0,00089
29,420	-0,00552	30,160	-0,00317	30,900	-0,00082
29,440	-0,00545	30,180	-0,00311	30,920	-0,00076
29,460	-0,00539	30,200	-0,00304	30,940	-0,00070
29,480	-0,00532	30,220	-0,00298	30,960	-0,00063
29,500	-0,00526	30,240	-0,00292	30,980	-0,00057
29,520	-0,00520	30,260	-0,00285	31,000	-0,00051
29,540	-0,00513	30,280	-0,00279	31,020	-0,00044
29,560	-0,00507	30,300	-0,00273	31,040	-0,00038
29,580	-0,00501	30,320	-0,00266	31,060	-0,00032
29,600	-0,00494	30,340	-0,00260	31,080	-0,00025
29,620	-0,00488	30,360	-0,00254	31,100	-0,00019
29,640	-0,00482	30,380	-0,00247	31,120	-0,00013
29,660	-0,00475	30,400	-0,00241	31,140	-0,00006
29,680	-0,00469	30,420	-0,00235		
29,700	-0,00463	30,440	-0,00228		
29,720	-0,00456	30,460	-0,00222		
29,740	-0,00450	30,480	-0,00216		
29,760	-0,00444	30,500	-0,00209		
29,780	-0,00437	30,520	-0,00203		
29,800	-0,00431	30,540	-0,00197		
29,820	-0,00425	30,560	-0,00190		
29,840	-0,00418	30,580	-0,00184		
29,860	-0,00412	30,600	-0,00178		
29,880	-0,00406	30,620	-0,00171		
29,900	-0,00399	30,640	-0,00165		
29,920	-0,00393	30,660	-0,00158		
29,940	-0,00387	30,680	-0,00152		
29,960	-0,00380	30,700	-0,00146		

Anexo 4: Espectro de diseño Elástico e Inelástico según NEC-11 (R=5)

Datos:

Tipo de Suelo	E	
Z=	0,4	(Factor de Zonificación)
Fa=	1,14	(Factor de Sitio)
Fd=	1,6	(Factor de Sitio)
Fs=	1,9	(Factor de comportamiento inelástico del suelo)
η=	1,8	(Relación de amplificación espectral)
T0=	0,27	
Tc=	1,47	
r=	1,5	
R=	5	



T (seg)	Sa (%g)	Sa (%g)
0,000	0,456	0,091
0,270	0,821	0,164
1,460	0,821	0,164
1,470	0,818	0,164
1,500	0,794	0,159
1,600	0,720	0,144
1,700	0,658	0,132
1,800	0,604	0,121
1,900	0,557	0,111
2,000	0,515	0,103
2,100	0,479	0,096
2,200	0,447	0,089
2,300	0,418	0,084
2,400	0,392	0,078
2,500	0,369	0,074
2,600	0,348	0,070
2,700	0,329	0,066
2,800	0,311	0,062
2,900	0,295	0,059
3,000	0,281	0,056
3,100	0,267	0,053
3,200	0,255	0,051
3,300	0,243	0,049
3,400	0,233	0,047
3,500	0,223	0,045
3,600	0,213	0,043
3,700	0,205	0,041
3,800	0,197	0,039
3,900	0,189	0,038
4,000	0,182	0,036
4,100	0,176	0,035
4,200	0,169	0,034
4,300	0,164	0,033
4,400	0,158	0,032
4,500	0,153	0,031
4,600	0,148	0,030
4,700	0,143	0,029
4,800	0,139	0,028
4,900	0,134	0,027
5,000	0,130	0,026

Anexo 5: Resultado del diseño a flexión de las vigas del pórtico de 4 Pisos.

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal Ejes A y F				
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ (negativo)	As total (negativo) (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Varillas	Refuerzo
4	Viga	30	50	4	0,0038	5,08	18	2 ϕ 18mm	-
3	Viga	35	55	4	0,0055	9,42	20	2 ϕ 20mm	1 ϕ 20mm
2	Viga	35	60	4	0,0074	13,88	22 y 20	2 ϕ 20mm	2 ϕ 22mm
1	Viga	35	65	4	0,0076	15,7	20	3 ϕ 20mm	3 ϕ 20mm

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal Ejes B y E				
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ (negativo)	As total (negativo) (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Varillas	Refuerzo
4	Viga	30	50	4	0,0058	7,62	18	2 ϕ 18mm	1 ϕ 18mm
3	Viga	35	55	4	0,0095	16,36	22 y 20	2 ϕ 20mm	1 ϕ 22mm
2	Viga	35	60	4	0,0094	17,68	22 y 20	2 ϕ 20mm	3 ϕ 22mm
1	Viga	35	65	4	0,01	20,82	22 y 20	3 ϕ 20mm	3 ϕ 22mm

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal Ejes C y D				
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ (negativo)	As total (negativo) (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Varillas	Refuerzo
4	Viga	30	50	4	0,0058	7,62	18	2 ϕ 18mm	1 ϕ 18mm
3	Viga	35	55	4	0,0092	15,7	20	2 ϕ 20mm	3 ϕ 20mm
2	Viga	35	60	4	0,0094	17,68	22 y 20	2 ϕ 20mm	3 ϕ 22mm
1	Viga	35	65	4	0,01	20,82	22 y 20	3 ϕ 20mm	3 ϕ 22mm

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal entre Ejes A y F				
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ (positivo)	As total (positivo) (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Varillas	Refuerzo
4	Viga	30	50	4	0,0038	5,08	18	2 ϕ 18mm	-
3	Viga	35	55	4	0,0046	7,82	20 y 14	2 ϕ 20mm	1 ϕ 14mm (Entre los Ejes A-B y E-F)
2	Viga	35	60	4	0,0037	7,09	18 y 16	2 ϕ 18mm	1 ϕ 16mm (Entre los Ejes A-B y E-F)
1	Viga	35	65	4	0,0044	9,16	18 y 14	3 ϕ 18mm	1 ϕ 14mm (Entre los Ejes A-B y E-F)

Anexo 6: Resultado del diseño a flexión de las columnas del pórtico de 4 Pisos.

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal					
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ	As total (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Total de Varillas	Num. Varillas dir. X	Num. Varillas dir. Y
4	Columna Lateral	30	30	4	0,0179	20,1	16	10	3	3
3	Columna Lateral	35	35	4	0,0197	24,12	16	12	4	4
2	Columna Lateral	35	40	4	0,0172	24,12	16	12	4	4
1	Columna Lateral	35	45	4	0,0179	28,14	16	14	5	4

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal					
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ	As total (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Total de Varillas	Num. Varillas dir. X	Num. Varillas dir. Y
4	Columna Central	30	30	4	0,0179	28,14	16	14	5	4
3	Columna Central	35	35	4	0,0161	28,14	16	14	5	4
2	Columna Central	35	40	4	0,0161	28,14	16	14	5	4
1	Columna Central	40	55	4	0,0128	28,14	16	14	5	4

Anexo 7: Resultado del diseño a corte de las vigas y columnas del pórtico de 4 Pisos.

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Transversal (Estribos Cerrados)		
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	Zona de confinamiento (l=2h)	Fuerza de la Zona de Confinamiento	Zona de Traslape
4	Viga	30	50	4	φ10 c/100mm	φ10 c/200mm	φ10 c/100mm
3	Viga	35	55	4	φ10 c/100mm	φ10 c/200mm	φ10 c/100mm
2	Viga	35	60	4	φ10 c/100mm	φ10 c/250mm	φ10 c/100mm
1	Viga	35	65	4	φ10 c/100mm	φ10 c/250mm	φ10 c/100mm

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Transversal (Estribos Cerrados)			
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	Zona de confinamiento (dir. X)	Zona de confinamiento (dir. Y)	Fuerza de la Zona de Confinamiento (dir. X)	Fuerza de la Zona de Confinamiento (dir. Y)
4	Columna Lateral	30	30	4	1φ12mm c/100mm	1φ12mm c/100mm	1φ12mm c/150mm	1φ12mm c/150mm
3	Columna Lateral	35	35	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm	2φ12mm c/150mm
2	Columna Lateral	35	40	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm	2φ12mm c/150mm
1	Columna Lateral	35	45	4	2φ12mm+1 gancho sup. φ12mm c/100mm	2φ12mm c/100mm	2φ12mm+1 gancho sup. φ12mm c/150mm	2φ12mm c/150mm

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Transversal (Estribos Cerrados)			
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	Zona de confinamiento (dir. X)	Zona de confinamiento (dir. Y)	Fuerza de la Zona de Confinamiento (dir. X)	Fuerza de la Zona de Confinamiento (dir. Y)
4	Columna Central	30	30	4	2φ12mm+1 gancho sup. φ12mm c/100mm	2φ12mm c/100mm	2φ12mm+1 gancho sup. φ12mm c/150mm	2φ12mm c/150mm
3	Columna Central	35	35	4	2φ12mm+1 gancho sup. φ12mm c/100mm	2φ12mm c/100mm	2φ12mm+1 gancho sup. φ12mm c/150mm	2φ12mm c/150mm
2	Columna Central	35	40	4	2φ12mm+1 gancho sup. φ12mm c/100mm	2φ12mm c/100mm	2φ12mm+1 gancho sup. φ12mm c/150mm	2φ12mm c/150mm
1	Columna Central	40	55	4	2φ12mm+1 gancho sup. φ12mm c/100mm	2φ12mm c/100mm	2φ12mm+1 gancho sup. φ12mm c/150mm	2φ12mm c/150mm

Anexo 8: Resultado del diseño a flexión de las vigas del pórtico de 8 Pisos.

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal Ejes A y F					
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ (negativo)	As total (negativo) (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Varillas	Refuerzo	Refuerzo (separacion vertical 2,5cm)
8	Viga	30	55	4	0,0043	6,28	20	2 ϕ 20mm	-	-
7	Viga	30	60	4	0,0086	13,88	22 y 20	2 ϕ 20mm	2 ϕ 22mm	-
6	Viga	35	60	4	0,0114	20,82	22 y 20	3 ϕ 20mm	1 ϕ 22mm	2 ϕ 22mm
5	Viga	35	65	4	0,0122	24,62	22 y 20	3 ϕ 20mm	2 ϕ 22mm	2 ϕ 22mm
4	Viga	35	70	4	0,01153	25,02	25 y 22	2 ϕ 22mm	2 ϕ 22mm	2 ϕ 25mm
3	Viga	35	75	4	0,01155	27,24	25 y 22	4 ϕ 25mm	-	2 ϕ 22mm
2	Viga	35	75	4	0,01155	27,24	25 y 22	4 ϕ 25mm	-	2 ϕ 22mm
1	Viga	40	75	4	0,0119	32,15	25 y 22	5 ϕ 25mm	-	2 ϕ 22mm

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal Ejes B y E					
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ (negativo)	As total (negativo) (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Varillas	Refuerzo	Refuerzo (separacion vertical 2,5cm)
8	Viga	30	55	4	0,0043	6,28	20	2 ϕ 20mm	1 ϕ 16mm	-
7	Viga	30	60	4	0,0109	17,02	22 y 20	2 ϕ 20mm	1 ϕ 20mm	2 ϕ 22mm
6	Viga	35	60	4	0,0114	2082	22 y 20	3 ϕ 20mm	1 ϕ 22mm	2 ϕ 22mm
5	Viga	35	65	4	0,0122	24,62	22 y 20	3 ϕ 20mm	2 ϕ 22mm	2 ϕ 22mm
4	Viga	35	70	4	0,01153	25,02	25 y 22	2 ϕ 22mm	2 ϕ 22mm	2 ϕ 25mm
3	Viga	35	75	4	0,01155	27,24	25 y 22	4 ϕ 25mm	-	2 ϕ 22mm
2	Viga	35	75	4	0,01155	27,24	25 y 22	4 ϕ 25mm	-	2 ϕ 22mm
1	Viga	40	75	4	0,01072	29,47	25	5 ϕ 25mm	-	2 ϕ 22mm

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal Ejes C y D					
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ (negativo)	As total (negativo) (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Varillas	Refuerzo	Refuerzo (separacion vertical 2,5cm)
8	Viga	30	55	4	0,0043	6,28	20	2 ϕ 20mm	1 ϕ 16mm	-
7	Viga	30	60	4	0,0109	17,02	22 y 20	2 ϕ 20mm	1 ϕ 20mm	2 ϕ 22mm
6	Viga	35	60	4	0,0114	2082	22 y 20	3 ϕ 20mm	1 ϕ 22mm	2 ϕ 22mm
5	Viga	35	65	4	0,0122	24,62	22 y 20	3 ϕ 20mm	2 ϕ 22mm	2 ϕ 22mm
4	Viga	35	70	4	0,01153	25,02	25 y 22	2 ϕ 22mm	2 ϕ 22mm	2 ϕ 25mm
3	Viga	35	75	4	0,01155	27,24	25 y 22	4 ϕ 25mm	-	2 ϕ 22mm
2	Viga	35	75	4	0,01155	27,24	25 y 22	4 ϕ 25mm	-	2 ϕ 22mm
1	Viga	40	75	4	0,0103	28,35	25 y 22	5 ϕ 25mm	-	2 ϕ 22mm

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal entre Ejes A y F			
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ (positivo)	As total (positivo) (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Varillas
8	Viga	30	55	4	0,0043	6,28	20	2 ϕ 20mm
7	Viga	30	60	4	0,0039	6,28	20	2 ϕ 20mm
6	Viga	35	60	4	0,00498	9,42	20	3 ϕ 20mm
5	Viga	35	65	4	0,0046	9,42	20	3 ϕ 20mm
4	Viga	35	70	4	0,0051	11,4	22	3 ϕ 22mm
3	Viga	35	75	4	0,0063	15,2	22	4 ϕ 22mm
2	Viga	35	75	4	0,0063	15,2	22	4 ϕ 22mm
1	Viga	40	75	4	0,0083	22,8	22	6 ϕ 22mm

Anexo 9: Resultado del diseño a flexión de las columnas del pórtico de 8 Pisos.

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal					
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ	As total (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Total de Varillas	Num. Varillas dir. X	Num. Varillas dir. Y
8	Columna Lateral	40	40	4	0,0191	30,48	18	12	4	4
7	Columna Lateral	45	45	4	0,0151	30,48	18	12	4	4
6	Columna Lateral	45	45	4	0,0151	30,48	18	12	4	4
5	Columna Lateral	50	50	4	0,0122	30,48	18	12	4	4
4	Columna Lateral	50	50	4	0,0122	30,48	18	12	4	4
3	Columna Lateral	55	55	4	0,0135	40,64	18	16	5	5
2	Columna Lateral	55	55	4	0,0135	40,64	18	16	5	5
1	Columna Lateral	60	60	4	0,0141	50,8	18	20	6	6

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal					
		b (cm)	h (cm)	recubrimiento (cm)	ρ	As total (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Total de Varillas	Num. Varillas dir. X	Num. Varillas dir. Y
8	Columna Central	45	45	4	0,0151	30,48	18	12	4	4
7	Columna Central	50	50	4	0,0122	30,48	18	12	4	4
6	Columna Central	50	50	4	0,0122	30,48	18	12	4	4
5	Columna Central	55	55	4	0,0135	40,64	18	16	5	5
4	Columna Central	55	55	4	0,0135	40,64	18	16	5	5
3	Columna Central	60	60	4	0,0113	40,64	18	16	5	5
2	Columna Central	60	60	4	0,0113	40,64	18	16	5	5
1	Columna Central	65	65	4	0,012	50,8	18	20	6	6

Anexo 10: Resultado del diseño a corte de las vigas y columnas del pórtico de 8 Pisos.

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Transversal (Estribos Cerrados)		
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	Zona de confinamiento (l=2h)	Fuerza de la Zona de Confinamiento	Zona de Traslape
8	Viga	30	55	4	φ10 c/100mm	φ10 c/200mm	φ10 c/100mm
7	Viga	30	60	4	φ10 c/100mm	φ10 c/250mm	φ10 c/100mm
6	Viga	35	60	4	φ10 c/100mm	φ10 c/250mm	φ10 c/100mm
5	Viga	35	65	4	φ10 c/100mm	φ10 c/250mm	φ10 c/100mm
4	Viga	35	70	4	φ10 c/100mm	φ10 c/250mm	φ10 c/100mm
3	Viga	35	75	4	φ10 c/100mm	φ10 c/200mm	φ10 c/100mm
2	Viga	35	75	4	φ10 c/100mm	φ10 c/200mm	φ10 c/100mm
1	Viga	40	75	4	φ10 c/100mm	φ10 c/150mm	φ10 c/100mm

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Transversal (Estribos Cerrados)	
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	Zona de confinamiento	Fuera de la Zona de Confinamiento
8	Columna Lateral	40	40	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
7	Columna Lateral	45	45	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
6	Columna Lateral	45	45	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
5	Columna Lateral	50	50	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
4	Columna Lateral	50	50	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
3	Columna Lateral	55	55	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
2	Columna Lateral	55	55	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
1	Columna Lateral	60	60	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Transversal (Estribos Cerrados)	
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	Zona de confinamiento	Fuera de la Zona de Confinamiento
8	Columna Central	45	45	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
7	Columna Central	50	50	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
6	Columna Central	50	50	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
5	Columna Central	55	55	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
4	Columna Central	55	55	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
3	Columna Central	60	60	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
2	Columna Central	60	60	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
1	Columna Central	65	65	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm

Anexo 11: Resultado del diseño a flexión de las vigas del pórtico de 12 Pisos.

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal Ejes A y F					
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ (negativo)	As total (negativo) (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Varillas	Refuerzo	Refuerzo (separacion vertical 2,5cm)
12	Viga	30	60	4	0,0039	6,28	20	2 ϕ 20mm	-	-
11	Viga	35	65	4	0,00922	19	22	2 ϕ 22mm	3 ϕ 22mm	-
10	Viga	35	65	4	0,00922	19	22	2 ϕ 22mm	3 ϕ 22mm	-
9	Viga	40	70	4	0,01068	27,24	25 y 22	3 ϕ 25mm	2 ϕ 22mm+1 ϕ 25mm	-
8	Viga	40	70	4	0,01068	27,24	25 y 22	3 ϕ 25mm	2 ϕ 22mm+1 ϕ 25mm	-
7	Viga	45	75	4	0,0117	37,06	25 y 22	4 ϕ 25mm	2 ϕ 25mm	2 ϕ 22mm
6	Viga	45	75	4	0,0117	37,06	25 y 22	4 ϕ 25mm	2 ϕ 25mm	2 ϕ 22mm
5	Viga	45	75	4	0,0117	37,06	25 y 22	4 ϕ 25mm	2 ϕ 25mm	2 ϕ 22mm
4	Viga	45	80	4	0,01246	40,34	25 y 22	6 ϕ 25mm	1 ϕ 22mm	2 ϕ 22mm
3	Viga	45	80	4	0,01246	40,34	25 y 22	6 ϕ 25mm	1 ϕ 22mm	2 ϕ 22mm
2	Viga	45	80	4	0,01246	40,34	25 y 22	6 ϕ 25mm	1 ϕ 22mm	2 ϕ 22mm
1	Viga	45	80	4	0,01246	40,34	25 y 22	6 ϕ 25mm	1 ϕ 22mm	2 ϕ 22mm

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal Ejes B y E					
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ (negativo)	As total (negativo) (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Varillas	Refuerzo	Refuerzo (separacion vertical 2,5cm)
12	Viga	30	60	4	0,00512	8,29	20	2 ϕ 20mm	1 ϕ 16mm	-
11	Viga	35	65	4	0,0103	21,24	25 y 22	3 ϕ 22mm	1 ϕ 22mm+2 ϕ 25mm	-
10	Viga	35	65	4	0,0103	21,24	25 y 22	3 ϕ 22mm	1 ϕ 22mm+2 ϕ 25mm	-
9	Viga	40	70	4	0,01068	27,24	25 y 22	3 ϕ 25mm	2 ϕ 22mm+1 ϕ 25mm	-
8	Viga	40	70	4	0,01068	27,24	25 y 22	3 ϕ 25mm	2 ϕ 22mm+1 ϕ 25mm	-
7	Viga	45	75	4	0,0117	37,06	25 y 22	4 ϕ 25mm	2 ϕ 25mm	2 ϕ 22mm
6	Viga	45	75	4	0,0117	37,06	25 y 22	4 ϕ 25mm	2 ϕ 25mm	2 ϕ 22mm
5	Viga	45	75	4	0,0117	37,06	25 y 22	4 ϕ 25mm	2 ϕ 25mm	2 ϕ 22mm
4	Viga	45	80	4	0,012	39,28	25	6 ϕ 25mm	-	2 ϕ 25mm
3	Viga	45	80	4	0,012	39,28	25	6 ϕ 25mm	-	2 ϕ 25mm
2	Viga	45	80	4	0,012	39,28	25	6 ϕ 25mm	-	2 ϕ 25mm
1	Viga	45	80	4	0,012	39,28	25	6 ϕ 25mm	-	2 ϕ 25mm

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal Ejes C y D					
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ (negativo)	As total (negativo) (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Varillas	Refuerzo	Refuerzo (separacion vertical 2,5cm)
12	Viga	30	60	4	0,00512	8,29	20	2 ϕ 20mm	1 ϕ 16mm	-
11	Viga	35	65	4	0,0103	21,24	25 y 22	3 ϕ 22mm	1 ϕ 22mm+2 ϕ 25mm	-
10	Viga	35	65	4	0,0103	21,24	25 y 22	3 ϕ 22mm	1 ϕ 22mm+2 ϕ 25mm	-
9	Viga	40	70	4	0,01068	27,24	25 y 22	3 ϕ 25mm	2 ϕ 22mm+1 ϕ 25mm	-
8	Viga	40	70	4	0,01068	27,24	25 y 22	3 ϕ 25mm	2 ϕ 22mm+1 ϕ 25mm	-
7	Viga	45	75	4	0,0117	37,06	25 y 22	4 ϕ 25mm	2 ϕ 25mm	2 ϕ 22mm
6	Viga	45	75	4	0,0117	37,06	25 y 22	4 ϕ 25mm	2 ϕ 25mm	2 ϕ 22mm
5	Viga	45	75	4	0,0117	37,06	25 y 22	4 ϕ 25mm	2 ϕ 25mm	2 ϕ 22mm
4	Viga	45	80	4	0,012	39,28	25	6 ϕ 25mm	-	2 ϕ 25mm
3	Viga	45	80	4	0,012	39,28	25	6 ϕ 25mm	-	2 ϕ 25mm
2	Viga	45	80	4	0,012	39,28	25	6 ϕ 25mm	-	2 ϕ 25mm
1	Viga	45	80	4	0,012	39,28	25	6 ϕ 25mm	-	2 ϕ 25mm

Anexo 12: Resultado del diseño a flexión de las vigas del pórtico de 12 Pisos.

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal entre Ejes A y F			
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ (positivo)	As total (positivo) (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Varillas
12	Viga	30	60	4	0,0039	6,28	20	2 ϕ 20mm
11	Viga	35	65	4	0,0037	7,6	22	2 ϕ 22mm
10	Viga	35	65	4	0,0037	7,6	22	2 ϕ 22mm
9	Viga	40	70	4	0,0058	14,73	25	3 ϕ 25mm
8	Viga	40	70	4	0,0058	14,73	25	3 ϕ 25mm
7	Viga	45	75	4	0,00794	24,55	25	5 ϕ 25mm
6	Viga	45	75	4	0,00794	24,55	25	5 ϕ 25mm
5	Viga	45	75	4	0,00794	24,55	25	5 ϕ 25mm
4	Viga	45	80	4	0,0088	29,46	25	6 ϕ 25mm
3	Viga	45	80	4	0,0088	29,46	25	6 ϕ 25mm
2	Viga	45	80	4	0,0088	29,46	25	6 ϕ 25mm
1	Viga	45	80	4	0,0088	29,46	25	6 ϕ 25mm

Anexo 13: Resultado del diseño a flexión de las columnas del pórtico de 12 Pisos.

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal					
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ	As total (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Total de Varillas	Num. Varillas dir. X	Num. Varillas dir. Y
12	Columna Lateral	60	60	4	0,014	50,24	20	16	5	5
11	Columna Lateral	60	60	4	0,014	50,24	20	16	5	5
10	Columna Lateral	60	60	4	0,014	50,24	20	16	5	5
9	Columna Lateral	65	65	4	0,0119	50,24	20	16	5	5
8	Columna Lateral	65	65	4	0,0119	50,24	20	16	5	5
7	Columna Lateral	65	65	4	0,0119	50,24	20	16	5	5
6	Columna Lateral	70	70	4	0,0128	62,8	20	20	6	6
5	Columna Lateral	70	70	4	0,0128	62,8	20	20	6	6
4	Columna Lateral	70	70	4	0,0128	62,8	20	20	6	6
3	Columna Lateral	75	75	4	0,0112	62,8	20	20	6	6
2	Columna Lateral	75	75	4	0,0112	62,8	20	20	6	6
1	Columna Lateral	75	75	4	0,0112	62,8	20	20	6	6

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Longitudinal					
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	ρ	As total (cm ²)	Diam. Varilla (mm)	Num. Total de Varillas	Num. Varillas dir. X	Num. Varillas dir. Y
12	Columna Central	65	65	4	0,012	50,24	20	16	5	5
11	Columna Central	65	65	4	0,012	50,24	20	16	5	5
10	Columna Central	65	65	4	0,012	50,24	20	16	5	5
9	Columna Central	70	70	4	0,0128	62,8	20	20	6	6
8	Columna Central	70	70	4	0,0128	62,8	20	20	6	6
7	Columna Central	70	70	4	0,0128	62,8	20	20	6	6
6	Columna Central	75	75	4	0,0112	62,8	20	20	6	6
5	Columna Central	75	75	4	0,0112	62,8	20	20	6	6
4	Columna Central	75	75	4	0,0112	62,8	20	20	6	6
3	Columna Central	80	80	4	0,0118	75,36	20	24	7	7
2	Columna Central	80	80	4	0,0118	75,36	20	24	7	7
1	Columna Central	80	80	4	0,0118	75,36	20	24	7	7

Anexo 14: Resultado del diseño a corte de las vigas del pórtico de 12 Pisos.

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Transversal (Estribos Cerrados)		
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	Zona de confinamiento (l=2h)	Fuerza de la Zona de Confinamiento	Zona de Traslape
12	Viga	30	60	4	φ10 c/100mm	φ10 c/250mm	φ10 c/100mm
11	Viga	35	65	4	φ10 c/100mm	φ10 c/250mm	φ10 c/100mm
10	Viga	35	65	4	φ10 c/100mm	φ10 c/250mm	φ10 c/100mm
9	Viga	40	70	4	φ10 c/100mm	φ10 c/250mm	φ10 c/100mm
8	Viga	40	70	4	φ10 c/100mm	φ10 c/250mm	φ10 c/100mm
7	Viga	45	75	4	φ10 c/100mm	φ10 c/100mm	φ10 c/100mm
6	Viga	45	75	4	φ10 c/100mm	φ10 c/100mm	φ10 c/100mm
5	Viga	45	75	4	φ10 c/100mm	φ10 c/100mm	φ10 c/100mm
4	Viga	45	80	4	φ10 c/80mm	φ10 c/150mm	φ10 c/100mm
3	Viga	45	80	4	φ10 c/80mm	φ10 c/150mm	φ10 c/100mm
2	Viga	45	80	4	φ10 c/80mm	φ10 c/150mm	φ10 c/100mm
1	Viga	45	80	4	φ10 c/80mm	φ10 c/150mm	φ10 c/100mm

Anexo 15: Resultado del diseño a corte de las vigas del pórtico de 12 Pisos.

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Transversal (Estribos Cerrados)	
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	Zona de confinamiento	Fuera de la Zona de Confinamiento
12	Columna Lateral	60	60	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
11	Columna Lateral	60	60	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
10	Columna Lateral	60	60	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
9	Columna Lateral	65	65	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
8	Columna Lateral	65	65	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
7	Columna Lateral	65	65	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
6	Columna Lateral	70	70	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
5	Columna Lateral	70	70	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
4	Columna Lateral	70	70	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
3	Columna Lateral	75	75	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
2	Columna Lateral	75	75	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
1	Columna Lateral	75	75	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm

Pisos	Elemento	Sección			Refuerzo Transversal (Estribos Cerrados)	
		b (cm)	h (cm)	Recubrimiento (cm)	Zona de confinamiento	Fuera de la Zona de Confinamiento
12	Columna Central	65	65	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
11	Columna Central	65	65	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
10	Columna Central	65	65	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
9	Columna Central	70	70	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
8	Columna Central	70	70	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
7	Columna Central	70	70	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
6	Columna Central	75	75	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
5	Columna Central	75	75	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
4	Columna Central	75	75	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
3	Columna Central	80	80	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
2	Columna Central	80	80	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm
1	Columna Central	80	80	4	2φ12mm c/100mm	2φ12mm c/150mm

Anexo 16: Propiedades de los disipadores de fluido viscoso de la empresa TAYLOR DEVICES.

taylor devices inc.
FLUID VISCOUS DAMPERS & LOCK-UP DEVICES

FORCE	SPHERICAL BEARING BORE DIA. (INCHES)	MID-STROKE LENGTH (INCHES)	STROKE (INCHES)	CLEVIS THICKNESS (INCHES)	CLEVIS WIDTH (INCHES)	CLEVIS DEPTH (INCHES)	CYLINDER DIA. (INCHES)	WEIGHT (lbs.)
55 KIP	1.50	34.13	±3	1.63	4 MAX.	3.25	4-1/2 MAX.	90
110 KIP	2.00	42.00	±4	2.13	4-3/4 MAX.	4.00	5-3/4 MAX.	185
165 KIP	2.25	47.00	±4	2.25	6 MAX.	5.10	7-1/4 MAX.	300
220 KIP	2.75	48.75	±4	2.75	7-1/2 MAX.	5.88	8-1/4 MAX.	425
330 KIP	3.00	51.75	±4	3.00	8 MAX.	6.38	9-1/2 MAX.	600
440 KIP	3.50	62.00	±5	3.50	9 MAX.	7.50	11-1/4 MAX.	900
675 KIP	4.00	62.00	±5	4.50	12-3/4 MAX.	8.00	13-3/4 MAX.	1300
900 KIP	5.00	74.00	±5	5.50	12-3/4 MAX.	10.75	16-3/4 MAX.	2650
1450 KIP	6.00	84.00	±5	6.00	13-3/4 MAX.	12.00	20-1/4 MAX.	4100
1800 KIP	7.00	88.25	±5	7.00	16-1/4 MAX.	12.50	22-1/4 MAX.	5500

NOTE: VARIOUS STROKES ARE AVAILABLE, FROM ±2 TO ±36 INCHES. FORCE CAPACITY MAY BE REDUCED FOR STROKE LONGER THAN STROKE LISTED IN TABLE. ANY STROKE CHANGE FROM THE STANDARD STROKE VERSION DEPICTED CHANGES MID-STROKE LENGTH BY FIVE INCHES PER ±1 INCH OF STROKE.

**EXAMPLE: 220 KIP ±4 INCHES STROKE, MID-STROKE LENGTH IS 48.75 INCHES
 220 KIP ±6 INCHES STROKE, 6-4 = 2 TIMES FIVE = 10
 48.75+10 = 58.75 INCHES MID-STROKE LENGTH**

BELLOWS MAY BE REPLACED WITH A STEEL SLEEVE AS DESIRED STROKE LENGTHS INCREASE. CONSULT TAYLOR DEVICES FOR STROKE OVER ± 12 INCHES AND/OR FOR FORCE CAPACITIES FOR STROKE LONGER THAN LISTED IN TABLE.