

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN AMORTIGUADOR TELESCÓPICO HIDRÁULICO COMO ELEMENTO DE UN PÓRTICO SOMETIDO A CARGAS SÍSMICAS

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

DIEGO PATRICIO CALERO ARELLANO

DAVID SEBASTIÁN SALAZAR RIBADENEIRA

DIRECTOR: ING. JOSÉ PEREZ

CODIRECTOR: ING. FERNANDO OLMEDO

Sangolquí, 2008- 03 – 13

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN AMORTIGUADOR TELESCÓPICO HIDRÁULICO COMO ELEMENTO DE UN PÓRTICO SOMETIDO A CARGAS SÍSMICAS” fue realizado en su totalidad por Diego Patricio Calero Arellano y David Sebastián Salazar Ribadeneira, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. José Pérez

DIRECTOR

Ing. Fernando Olmedo

CODIRECTOR

Sangolquí, 2008-02-29

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

**“ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN
AMORTIGUADOR TELESCÓPICO HIDRÁULICO COMO ELEMENTO DE UN
PÓRTICO SOMETIDO A CARGAS SÍSMICAS”**

ELABORADO POR:

Diego Calero Arellano

David Salazar Ribadeneira

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Crnl. Ing. Juan Díaz

COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Sangolquí, 2008 – 03 – 13

DEDICATORIA

A mi madre cuyo anhelo empieza con este trabajo, y a mi padre cuyo esfuerzo me ayudó a culminarlo.

Diego

A mis padres por haberme brindado su apoyo incondicional y su cariño durante todos estos años.

David

AGRADECIMIENTOS

Queremos hacer llegar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que colaboraron con la realización de este proyecto, de manera especial a nuestro director y codirector Ingenieros José Pérez y Fernando Olmedo por toda la asistencia brindada; a nuestros compañeros Pato Gato Romero y León Juan Pablo Carrión, por su ayuda en todo momento; al Ingeniero Douglas P. Taylor, por su colaboración profesional; a nuestras familias, Carlos, Antonia y amigos, que en todo momento nos ofrecieron su ayuda desinteresadamente y nos alentaron a culminar exitosamente este trabajo. Finalmente queremos agradecer a Dios por ser la fuerza motriz de nuestras vidas.

Diego Calero Arellano
David Salazar Ribadeneira

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
RESUMEN.....	xxiv

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	2
1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	4
1.5 OBJETIVOS.....	5
1.5.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.6 ALCANCE.....	5

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 AMORTIGUADORES TIPO TELESCOPICO HIDRAULICO.....	7
2.1.1 INTRODUCCIÓN.....	7
2.1.2 FUNDAMENTOS DE AMORTIGUACIÓN.....	8
2.1.2.1 Vibraciones mecánicas.....	8
2.1.2.2 Vibración libre no amortiguada.....	9
2.1.2.3 Vibración libre con amortiguamiento viscoso.....	10
2.1.2.4 Vibración forzada con carga armónica no amortiguada.....	12

2.1.2.5 Vibración forzada con carga armónica amortiguada.....	14
2.1.3 CARACTERÍSTICAS DEL AMORTIGUADOR.....	15
2.1.3.1 Principio de funcionamiento.....	15
2.1.3.2 Comportamiento histerético básico.....	16
2.1.3.3 Amortiguador telescópico hidráulico.....	18
2.1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS AMORTIGUADORES.....	21
2.1.4.1 Amortiguador hidráulico telescópico de doble tubo.....	21
2.1.4.2 Amortiguador hidráulico telescópico monotubo.....	25
2.1.5 APLICACIONES.....	27
2.2 CARGAS SÍSMICAS.....	30
2.2.1 INTRODUCCIÓN.....	30
2.2.2 ANÁLISIS DE CARGAS EN PÓRTICOS.....	31
2.2.2.1 Características de los pórticos.....	31
2.2.2.2 Análisis por distribución de momentos.....	34
2.2.2.3 Diseño elástico de pórticos.....	35
2.2.2.4 Diseño plástico de pórticos continuos.....	37
2.2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISMOS.....	41
2.2.3.1 Origen y propagación de los movimientos sísmicos.....	41
2.2.3.2 Medición de los movimientos sísmicos.....	43
2.2.3.3 Espectrografía sísmica.....	47
2.2.4 CRITERIOS DE DISEÑO PARA CARGAS SÍSMICAS.....	52
2.2.4.1 Consideraciones de diseño para estructuras antisísmicas.....	52
2.2.4.2 Tipos de estructuras sismorresistentes.....	54
2.2.5 ANÁLISIS ESTÁTICO.....	55
2.2.5.1 Diseño por factores de carga y resistencia (método LRFD).....	55
2.2.5.2 Procedimiento estático de cálculo de fuerzas.....	58
2.2.6 ANÁLISIS DINÁMICO.....	62
2.2.6.1 Respuesta dinámica.....	62
2.2.6.2 Análisis espectral.....	65
2.2.6.3 Consideraciones energéticas para el diseño antisísmico.....	66
2.2.6.4 Técnicas de control de la energía sísmica.....	68

CAPÍTULO 3

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN AMORTIGUADOR TELESCÓPICO HIDRÁULICO

3.1 SELECCION DE UN AMORTIGUADOR TIPO TELESCOPICO HIDRÁULICO COMO ELEMENTO ADICIONAL DE UN PÓRTICO SOMETIDO A CARGAS SÍSMICAS.....	71
3.1.1 PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DEL AMORTIGUADOR	71
3.1.1.1 Simulación y características preliminares	71
3.1.1.2 Evaluación preliminar de la relación de amortiguamiento y energía disipada	72
3.1.1.3 Selección de propiedades preliminares del amortiguador	74
3.1.1.4 Procedimiento iterativo y comprobación.....	75
3.1.2 CARACTERÍSTICAS DEL AMORTIGUADOR SELECCIONADO.....	76
3.2 ANÁLISIS DEL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS A SER UTILIZADOS PARA LOS ENSAYOS.	78
3.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO.....	78
3.2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	80
3.2.3 PARÁMETROS DE OPERACIÓN	81
3.3 CARACTERIZACIÓN Y ELABORACIÓN DE PROCEDIMIENTOS PARA ENSAYOS EN AMORTIGUADORES TIPO TELESCÓPICO HIDRÁULICOS CON CARGAS SÍSMICAS SIMULADAS	82
3.3.1 PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS EN AMORTIGUADORES PARA CARGAS SÍSMICAS.....	82
3.3.1.1 Ensayos para dispositivos de aislamiento sísmico	82
3.3.1.2 Ensayos para dispositivos de amortiguamiento viscoso.....	84
3.3.2 ENSAYOS A REALIZARSE	86
3.4 ENSAYOS MECÁNICOS.....	88
3.4.1 PROCEDIMIENTO REALIZADO	88
3.4.2 RESULTADOS OBTENIDOS	90
3.5 ENSAYOS DINÁMICOS	97
3.5.1 PROCEDIMIENTO REALIZADO	97

3.5.2 RESULTADOS OBTENIDOS	99
3.6 DETERMINACIÓN DE LA FIABILIDAD Y EFICIENCIA DEL AMORTIGUADOR.....	106
3.6.1 CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES.....	106
3.6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	109

CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN DE PÓRTICOS SOMETIDOS A CARGAS SÍSMICAS

4.1 SELECCION DEL SOFTWARE ESPECIALIZADO	111
4.2 DISEÑO DE DISPOSICIONES Y DIMENSIONES.....	112
4.2.1 DISEÑO DE DISPOSICIONES.....	112
4.2.2 DIMENSIONES DEL PÓRTICO	113
4.3 ANÁLISIS ESTÁTICO Y DINÁMICO DEL PÓRTICO SIN AMORTIGUADOR	114
4.3.1 ANÁLISIS ESPECTRAL.....	114
4.3.2 FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE	117
4.3.3 ANÁLISIS POR HISTORIA DEL TIEMPO	119
4.4 ANÁLISIS ESTÁTICO Y DINÁMICO DEL PÓRTICO CON AMORTIGUADOR.....	121
4.4.1 ANÁLISIS ESPECTRAL.....	121
4.4.2 FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE	122
4.4.3 ANÁLISIS POR HISTORIA DEL TIEMPO	124
4.5 SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL PÓRTICO SIN AMORTIGUADOR SOMETIDO A CARGAS SÍSMICAS EN EL SOFTWARE SELECCIONADO	125
4.6 SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL PÓRTICO CON AMORTIGUADOR SOMETIDO A CARGAS SÍSMICAS EN EL SOFTWARE SELECCIONADO	139

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 RESULTADOS OBTENIDOS.....	149
5.1.1 RESPUESTA DE LAS UNIONES	149
5.1.2 RESPUESTA DE LOS ELEMENTOS	150
5.1.3 RESPUESTA DE LOS AMORTIGUADORES.....	152
5.1.4 ANÁLISIS ESPECTRAL.....	153
5.1.5 ANÁLISIS ENERGÉTICO	155
5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	157
5.2.1 RESPUESTA DE LAS UNIONES	157
5.2.2 RESPUESTA DE LOS ELEMENTOS	162
5.2.3 RESPUESTA DE LOS AMORTIGUADORES.....	168
5.2.4 ANÁLISIS ESPECTRAL.....	171
5.2.5 ANÁLISIS ENERGÉTICO	173
5.3 ADAPTACIÓN DE RESULTADOS A ESTRUCTURAS REALES	175
5.3.1 DISPOSITIVOS UTILIZADOS ACTUALMENTE	175
5.3.2 ADAPTACIÓN PARA EL AMORTIGUADOR DE ENSAYO.....	178

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS ECONÓMICO – FINANCIERO

6.1 ANALISIS ECONOMICO.....	187
6.1.1 COSTOS INDIRECTOS.....	187
6.1.1.1 Misceláneos.....	187
6.1.2 COSTOS DIRECTOS.....	187
6.1.2.1 Materiales Directos.....	187
6.1.2.2 Remuneraciones	187
6.2 ANÁLISIS FINANCIERO.....	188
6.2.1 COSTOS Y GASTOS.....	188
6.2.2 INGRESOS.....	189
6.2.3 DEPRECIACIÓN.....	189
6.2.4 INVERSIONES Y VALOR RESIDUAL.....	190

6.2.5 FLUJO DE CAJA.....	190
6.2.6 CÁLCULO DEL VALOR ACTUAL NETO CON TASA DE DESCUENTO DE 5%.....	191
6.2.7 CÁLCULO DE LA TASA INTERNA DE RETORNO.....	191

CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES	193
7.2 RECOMENDACIONES.....	196

TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1 Escala Modificada de Mercalli.....	43
Tabla 2.2 Factores de resistencia característicos.....	57
Tabla 2.3 Coeficiente de suelo S y Coeficiente C_m	59
Tabla 2.4 Factor de reducción de respuesta estructural.....	59
Tabla 2.5 Factor de importancia.....	61

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1 Elasticidad efectiva ensayo mecánico (lector digital)	91
Tabla 3.2 Amortiguamiento efectivo ensayo mecánico (lector digital)	91
Tabla 3.3 Medidas de los bucles ensayo mecánico.....	95
Tabla 3.4 Elasticidad efectiva ensayo mecánico (gráficas).....	95
Tabla 3.5 Amortiguamiento efectivo ensayo mecánico (gráficas).....	96
Tabla 3.6 Elasticidad efectiva ensayo dinámico (lector digital)	99
Tabla 3.7 Amortiguamiento efectivo ensayo dinámico (lector digital)	100
Tabla 3.8 Medidas de los bucles ensayo dinámico.....	104
Tabla 3.9 Elasticidad efectiva ensayo dinámico (gráficas)	105
Tabla 3.10 Amortiguamiento efectivo ensayo dinámico (gráficas).....	105
Tabla 3.11 Masas de los amortiguadores hidráulicos	107
Tabla 3. 12 Exponentes de amortiguamiento.....	108
Tabla 3.13 Valores a utilizar en la simulación	109
Tabla 3.14 Valores a utilizar en la simulación (ejemplo).....	110

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1 Relaciones de amortiguamiento típico para estructuras.....	116
Tabla 4.2 Factores de amplificación para curvas espectrales.....	116
Tabla 4.3 Coeficiente para el amortiguamiento B_{v+1}	123

CAPÍTULO 5

Tabla 5.1 Fuerza axial amortiguador (datos de laboratorio)	153
Tabla 5.2 Fuerza axial amortiguador (datos preliminares).....	153
Tabla 5.3 Análisis espectral – Pórtico sin amortiguador	154
Tabla 5.4 Análisis espectral – Pórtico con amortiguador (datos de laboratorio)	154
Tabla 5.5 Análisis espectral – Pórtico con amortiguador (datos preliminares)	154
Tabla 5.6 Análisis energético – Pórtico sin amortiguador	155
Tabla 5.7 Análisis energético – Pórtico con amortiguador (datos de laboratorio)	156
Tabla 5.8 Análisis energético – Pórtico con amortiguador (datos preliminares)	156
Tabla 5.9 Valores a utilizar en la simulación (modificación amortiguador de ensayo).....	182
Tabla 5.10 Fuerza axial amortiguador (modificación).....	182
Tabla 5.11 Análisis espectral – Pórtico con amortiguador (modificación)	183
Tabla 5.12 Análisis energético – Pórtico con amortiguador (modificación)	185

CAPÍTULO 6

Tabla 6.1 Descripción de costos misceláneos.....	187
Tabla 6.2 Descripción de costos de materiales directos.....	187
Tabla 6.3 Descripción de costos de remuneraciones.....	187
Tabla 6.4 Resumen de costos	188
Tabla 6.5 Descripción de costos y gastos.....	188
Tabla 6.6 Descripción de ingresos	189
Tabla 6.7 Valores de depreciación de activos	189
Tabla 6.8 Descripción de inversiones y valor residual.....	190
Tabla 6.9 Flujo de caja	190
Tabla 6.10 Cálculo del VAN.....	191
Tabla 6.11 Cálculo del TIR.....	191

FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 Vibración libre sin amortiguamiento.....	10
Figura 2.2 Tipos de movimiento.....	11
Figura 2.3 Efecto del amortiguamiento vibración libre.....	12
Figura 2.4 Sistema no amortiguado con carga armónica	13
Figura 2.5 Sistema no amortiguado $\omega=\omega_n$	13
Figura 2.6 Sistema amortiguado con carga armónica.....	14
Figura 2.7 Sistema amortiguado $\omega=\omega_n$	14
Figura 2.8 Fuerza y velocidad para los diferentes valores de α	16
Figura 2.9 Comportamiento histerético de un amortiguador lineal	17
Figura 2.10 Curvas para distintos valores de α	17
Figura 2.11 Esquema del amortiguador hidráulico.....	18
Figura 2.12 Funcionamiento de un amortiguador telescópico hidráulico	19
Figura 2.13 Diagrama fuerza – velocidad	19
Figura 2.14 Comportamiento del amortiguador	20
Figura 2.15 Elementos del amortiguador	21
Figura 2.16 Amortiguador doble tubo	22
Figura 2.17 Partes de un amortiguador doble tubo.....	23
Figura 2.18 Amortiguador monotubo.....	25
Figura 2.19 Esquema completo de un amortiguador mono tubo.....	26
Figura 2.20 Sistema de suspensión de un vehículo.....	28
Figura 2.21 Amortiguador de fluido viscoso	29
Figura 2.22 Esquema de un disipador viscoso.....	29
Figura 2.23 Estructura de un pórtico	31
Figura 2.24 Elementos de una estructura.....	32
Figura 2.25 Ejemplo de distribución de momentos	35
Figura 2.26 Diseño elástico de pórticos.....	36
Figura 2.27 Mecanismo de viga.....	39
Figura 2.28 Mecanismo de tablero.....	40
Figura 2.29 Mecanismo combinado.....	40

Figura 2.30 Propagación de las ondas sísmicas	42
Figura 2.31 Esquema de un sismógrafo	45
Figura 2.32 Componente N-S, sismo “El Centro”, California.....	46
Figura 2.33 Método de determinación del espectro de respuesta	48
Figura 2.34 Espectros de respuesta para distintos factores de amortiguamiento	50
Figura 2.35 Valores espectrales en la representación combinada	51
Figura 2.36 Estructuras sismorresistentes.....	54
Figura 2.37 Sistema simple de un grado de libertad.....	63
Figura 2.38 Interpolación lineal	64
Figura 2.39 Espectro sísmico elástico utilizado	66
Figura 2.40 Ciclo de histéresis en un sistema estructural.....	67
Figura 2.41 Idealización de mecanismos de disipación de energía sísmica	68
Figura 2.42 Clasificación de los sistemas de protección sísmica.....	69

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Amortiguadores utilizados para el ensayo.....	77
Figura 3.2 Características del amortiguador Monro - Matic.....	78
Figura 3.3 Control de la máquina de ensayos universales	79
Figura 3.4 Instalaciones fijas y móviles de la máquina.....	80
Figura 3.5 Pruebas de amortiguador viscoso Taylor Devices	85
Figura 3.6 Amortiguador instalado en la máquina.....	88
Figura 3.7 Variación de la carga en el tiempo	89
Figura 3.8 Carga 5000 N, Desplazamiento 10 mm.....	92
Figura 3.9 Carga 10000 N, Desplazamiento 30 mm.....	92
Figura 3.10 Carga 25000 N, Desplazamiento 40 mm	92
Figura 3.11 Carga 50000 N, Desplazamiento 50 mm.....	92
Figura 3.12 Carga 5000 N, Desplazamiento 2 mm.....	93
Figura 3.13 Carga 10000 N, Desplazamiento 5 mm.....	93
Figura 3.14 Carga 25000 N, Desplazamiento 7,5 mm	93
Figura 3.15 Carga 50000 N, Desplazamiento 10 mm.....	93
Figura 3.16 Carga 5000 N, Desplazamiento 1 mm.....	94

Figura 3.17 Carga 10000 N, Desplazamiento 1,5 mm.....	94
Figura 3.18 Carga 25000 N, Desplazamiento 2 mm.....	94
Figura 3.19 Carga 50000 N, Desplazamiento 2,5 mm.....	94
Figura 3.20 Comportamiento del amortiguador a distintas frecuencias	97
Figura 3.21 Variación del desplazamiento	98
Figura 3.22 0,15 Hz, escala X 2%.....	101
Figura 3.23 1,5 Hz, escala X 1%.....	101
Figura 3.24 15 Hz, escala X 1%.....	101
Figura 3.25 30 Hz, escala X 1%.....	101
Figura 3.26 0,15 Hz, escala X 2%.....	101
Figura 3.27 1,5 Hz, escala X 1%.....	102
Figura 3.28 15 Hz, escala X 1%.....	102
Figura 3.29 30 Hz, escala X 1%.....	102
Figura 3.30 0,15 Hz, escala X 5%.....	102
Figura 3.31 1,5 Hz, escala X 2%.....	102
Figura 3.32 15 Hz, escala X 1%.....	103
Figura 3.33 30 Hz, escala X 1%.....	103
Figura 3.34 0,15 Hz, escala X 5%.....	103
Figura 3.35 1,5 Hz, escala X 1%.....	103
Figura 3.36 15 Hz, escala X 1%.....	104
Figura 3.37 30 Hz, escala X 1%.....	104

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 Disposición física del pórtico.....	113
Figura 4.2 Espectro sísmico de acuerdo a la norma CEC 2000.....	115
Figura 4.3 Acelerograma del sismo “El Centro”.....	120
Figura 4.4 Comportamiento del amortiguador en los análisis	124
Figura 4.5 Ventana SAP 2000 – Programa seleccionado.....	125
Figura 4.6 Selección de unidades y disposiciones.....	126
Figura 4.7 Selección de dimensiones y secciones.....	127
Figura 4.8 Ventana SAP2000 – Pantalla dividida.	127

Figura 4.9 Selección de apoyos del pórtico.....	128
Figura 4.10 Espectro sísmico definido por el usuario.....	129
Figura 4.11 Espectro sísmico de acuerdo a la norma CEC 2000.....	130
Figura 4.12 Espectro sísmico UBC 94.....	131
Figura 4.13 Acelerograma en función del tiempo	132
Figura 4.14 Selección Acelerograma sismo “El Centro”	133
Figura 4.15 Definición de casos de análisis	134
Figura 4.16 Definición de parámetros para análisis de carga muerta.....	135
Figura 4.17 Definición de parámetros para análisis modal	135
Figura 4.18 Definición de parámetros para análisis espectral CEC 2000	137
Figura 4.19 Definición de parámetros para análisis lineal por medio de un acelerograma.....	139
Figura 4.20 Selección de elemento amortiguador.....	140
Figura 4.21 Definición de propiedades del amortiguador	141
Figura 4.22 Definición de propiedades direccionales del amortiguador para los casos de análisis	142
Figura 4.23 Selección del elemento a ser dibujado	143
Figura 4.24 Pórtico con elemento amortiguador.....	143
Figura 4.25 Restricción de análisis estructural a dos dimensiones	144
Figura 4.26 Verificación casos especificados de la simulación	144
Figura 4.27 Botones para fijar casos de análisis en la simulación.....	145
Figura 4.28 Selección del tipo de carga para observar la estructura deformada	145
Figura 4.29 Selección del tipo de carga para observar las fuerzas y esfuerzos a los que está sometida el pórtico.....	146
Figura 4.30 Selección de variables a ser presentadas en la tabla de resultados	147
Figura 4.31 Selección de variables y cargas a ser presentadas en la gráfica de resultados.....	148

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 Posición de las uniones.....	149
Figura 5.2 Sistema de coordenadas locales SAP2000	149
Figura 5.3 Posición de los elementos.....	150
Figura 5.4 Fuerza axial y torque SAP 2000.....	151
Figura 5.5 Momento y cortante en el plano 1 – 2 SAP 2000.....	151
Figura 5.6 Momento y cortante en el plano 1 – 3 SAP 2000.....	151
Figura 5.7 Reacciones del amortiguador SAP2000	152
Figura 5.8 Desplazamiento de las uniones – Pórtico sin amortiguador.....	157
Figura 5.9 Desplazamiento de las uniones – Pórtico con amortiguador (datos laboratorio).....	158
Figura 5.10 Desplazamiento de las uniones – Pórtico con amortiguador (datos preliminares)	158
Figura 5.11 Desplazamientos de las uniones.....	159
Figura 5.12 Velocidades de las uniones	160
Figura 5.13 Aceleraciones de las uniones	160
Figura 5.14 Reacciones del apoyo 1	161
Figura 5.15 Reacciones del apoyo 3	161
Figura 5.16 Momento de los apoyos	162
Figura 5.17 Fuerzas axiales máximas - columnas.....	163
Figura 5.18 Fuerzas cortantes máximas columnas.....	163
Figura 5.19 Momento flector CEC 2000 - columnas	164
Figura 5.20 Momento flector UBC 94 - columnas	164
Figura 5.21 Momento flector El Centro lineal - columnas	165
Figura 5.22 Momento flector El Centro no lineal - columnas.....	165
Figura 5.23 Fuerzas axiales máximas - viga.....	166
Figura 5.24 Fuerzas cortantes máximas - viga.....	166
Figura 5.25 Momento flector CEC 2000 - viga.....	167
Figura 5.26 Momento flector UBC 94 - viga	167
Figura 5.27 Momento flector El Centro lineal - viga	168
Figura 5.28 Momento flector El Centro no lineal - viga.....	168
Figura 5.29 Comportamiento histerético amortiguador (datos laboratorio).....	169

Figura 5.30 Comportamiento histerético amortiguador (datos preliminares) ..	169
Figura 5.31 Deformaciones axial de los amortiguadores.....	170
Figura 5.32 Fuerzas de extensión de los amortiguadores.....	170
Figura 5.33 Fuerzas de compresión de los amortiguadores.....	171
Figura 5.34 Amortiguamiento de la estructura.....	171
Figura 5.35 Aceleración espectral de la estructura.....	172
Figura 5.36 Cortante Basal.....	173
Figura 5.37 Variación de la energía en el tiempo – Pórtico sin amortiguador.	173
Figura 5.38 Variación de la energía en el tiempo – Pórtico con amortiguador (datos de laboratorio).....	174
Figura 5.39 Variación de la energía en el tiempo – Pórtico con amortiguador (datos preliminares)	175
Figura 5.40 Modelo del amortiguador y el arriostamiento transversal	177
Figura 5.41 Amortiguador de fluido viscoso – 50000 libras	177
Figura 5.42 Control del fluido viscoso.....	178
Figura 5.43 Viscosidad del aceite hidráulico en función de la temperatura....	179
Figura 5.44 Propiedades de la silicona fluida.....	180
Figura 5.45 Amortiguadores Serie M Taylor Devices.....	181
Figura 5.46 Fuerza axial amortiguadores (extensión)	183
Figura 5.47 Amortiguamiento de la estructura (solo amortiguadores)	184
Figura 5.48 Aceleración espectral de la estructura (solo amortiguadores).....	184
Figura 5.49 Variación de la energía en el tiempo – Pórtico con amortiguador (modificación).....	185
Figura 5.50 Cortante basal (solo amortiguadores).....	186

NOMENCLATURA

<i>AISC</i>	American Institute of Steel Construction
<i>ASCE</i>	American Society of Civil Engineers
A_R	Aceleración del suelo
A_T	Área de la sección
α	Exponente de amortiguamiento
β_{eff}	Amortiguamiento efectivo
B_{v+1}	Coficiente numérico amortiguador
c	Coficiente de amortiguamiento
c_{cr}	Coficiente de amortiguamiento crítico
C	Coficiente de respuesta sísmica
C_m	Coficiente de respuesta sísmica máxima
C_{eff}	Coficiente de amortiguamiento efectivo
<i>CEC</i>	Código Ecuatoriano de la Construcción
<i>CQC</i>	Método cuadrático de combinación modal
Δ	Desplazamiento columna
$\Delta^{+/-}$	Desplazamiento amortiguador máximo mínimo
ε	Relación de amortiguamiento
E	Carga sísmica
E_R	Energía Liberada en el sismo
E_K	Energía cinética
E_D	Energía de amortiguamiento viscoso
E_S	Energía Elástica
E_P	Energía disipada por dispositivos

E_I	Energía sísmica de entrada al sistema
E_{loop}	Área del bucle histerético
F	Fuerza de salida del amortiguador
g	Gravedad
I	Factor de importancia
I_R	Intensidad sísmica
k	Elasticidad
k_{eff}	Elasticidad efectiva
L	Longitud
m	Masa
M_3	Momento flector
M_P	Carga de momento
M_R	Magnitud sísmica
η	Factor de amplificación espectral
Ω	Matriz diagonal eigen valores
P	Fuerza Axial
$P(t)$	Carga armónica dependiente del tiempo
ρ_A	Densidad del acero
ϕ	Coefficiente de configuración
Φ	Matriz de eigen vectores (formas modales)
R	Factor de reducción de respuestas
R_U	Resistencia última
R_n	Resistencia nominal
S	Factor de suelo
S_S	Aceleración espectral
SAP	Software for Structural Analysis and Design

T	Período
τ	Incremento del tiempo
u	Desplazamiento del sistema
$U_{1,2,3}$	Coordenadas locales
UBC	Uniform Building Code
$\ddot{u}_g(t)$	Aceleración sísmica del suelo en función del tiempo
v	Velocidad de amortiguador
V	Cortante Basal
V_2	Fuerza Cortante
W	Peso para carga sísmica
ω	Frecuencia de excitación
ω_n	Frecuencia natural
x	Desplazamiento en una dirección
$\ddot{y}(t)$	Aceleración medida en acelerómetro
Z	Factor de zona sísmica

ANEXOS

ANEXO A: CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES Y DE INSTALACIÓN DEL AMORTIGUADOR DE ENSAYO

ANEXO B: PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO MECÁNICO Y DINÁMICO

ANEXO C: HOJAS DE DATOS OBTENIDAS EN LOS ENSAYOS

ANEXO D: GRÁFICAS OBTENIDAS EN LOS ENSAYOS

ANEXO E: PLANOS ESTRUCTURALES DEL PÓRTICO

ANEXO F: ASPECTOS IMPORTANTES DEL CÓDIGO ECUATORIANO DE LA CONSTRUCCIÓN (CEC)

ANEXO G: TABLAS DE DATOS DE RESPUESTA DE LAS UNIONES

ANEXO H: TABLAS DE DATOS DE DEFORMACIONES DE LOS AMORTIGUADORES

ANEXO I: DIAGRAMAS DE FUERZA AXIAL, CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR DE LOS ELEMENTOS DEL PÓRTICO

ANEXO J: TABLAS DE DATOS DE CORTANTES BASALES

RESUMEN

Nuestro país se encuentra ubicado en una zona de actividad sísmica importante, lo cual históricamente ha traído consecuencias catastróficas a las poblaciones más propensas debido al ineficaz diseño de sus estructuras. Actualmente son contados los estudios realizados acerca del manejo de la energía liberada en un sismo, razón por la cual se ha desarrollado el presente proyecto, en el cual se busca encontrar un método de disipación de la energía sísmica que afecta a estructuras metálicas por medio de la utilización de amortiguadores telescópicos hidráulicos.

La realización del presente proyecto tiene como objetivo básico el determinar si los amortiguadores anteriormente mencionados, son capaces o no de disipar la suficiente energía sísmica que entra a una estructura metálica, para evitar que los elementos de la estructura sufran deformaciones plásticas, es decir, permanentes.

Para elaborar la investigación se ha decidido realizar ensayos en amortiguadores telescópicos hidráulicos, para posteriormente simular su comportamiento actuando como un elemento adicional de un pórtico sometido a cargas sísmicas, ya que un pórtico es el elemento fundamental de cualquier estructura.

El desarrollo del proyecto se divide en dos partes fundamentales las cuales son:

- Simulación de cargas sísmicas sobre la estructura metálica por medio de software especializado (SAP2000): Aceleraciones Espectrales y Aceleraciones que varían con el tiempo.
- Ensayos mecánicos y dinámicos en amortiguadores telescópicos hidráulicos: Realizados en la máquina de ensayos universales MTS 810 del Laboratorio de Mecánica de Materiales de la ESPE.

Estas dos partes fundamentales del proyecto permitirán determinar resultados acorde a la realidad. Dichos resultados serán decisivos en el momento de aprobar o descartar el funcionamiento del elemento amortiguador, actuando

como disipador de energía sísmica, por medio de la comparación de los análisis: energético, amortiguamiento global y respuesta de la estructura.

La presente investigación cronológicamente se ha desarrollado de la siguiente manera: Primeramente, se realizaron consultas bibliográficas y se ampliaron conceptos generales acerca del tema. A continuación se realizaron simulaciones y ensayos de manera conjunta con el propósito de que los datos utilizados estén en concordancia. Finalmente se analizaron los resultados obtenidos y se obtuvieron las conclusiones.

El beneficio que la presente investigación ofrece es muy amplio, ya que la misma permite sentar las bases para futuras investigaciones, así como amplía el conocimiento en los campos de: estructuras metálicas, ingeniería sísmica y dinámica de elementos.

El resultado más relevante que se obtuvo, implica que los amortiguadores telescópicos hidráulicos no son capaces de disipar la suficiente energía sísmica de entrada a la estructura, como para protegerla de un sismo de gran magnitud.

En conclusión se obtuvo un resultado negativo, pero de la misma manera se investigó acerca del tema, y se llegó a la conclusión de que modificando el fluido de trabajo por silicona, así como el funcionamiento de las válvulas del amortiguador, se puede mejorar en gran medida el desempeño de dicho elemento actuando como disipador de energía sísmica.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Las eventualidades sísmicas son fenómenos que han existido siempre, y con los cuáles el hombre debe aprender a convivir. Durante mucho tiempo, se han realizado varias investigaciones con el propósito de determinar características cuantitativas del movimiento sísmico y evitar los daños causados por los mismos. Este es el caso de las estructuras metálicas, ya que en este campo de la ingeniería se han ido desarrollando nuevas estrategias, procedimientos y soluciones para enfrentar los problemas causados por los sismos.

En vista de esto se han diseñado estructuras flexibles con gran capacidad de absorción de energía, basadas en el amplio estudio de la dinámica estructural, así como también se han desarrollado nuevos materiales que gracias a su ductilidad y capacidad de amortiguación natural, son útiles para la construcción de una estructura antisísmica.

En el campo de las estructuras metálicas para la construcción, se han desarrollado varios métodos para contrarrestar las cargas sísmicas; y en muchos casos se ha optado por incluir elementos adicionales a la estructura metálica conformada, para que actúen como disipadores de la energía liberada en un sismo. Por ejemplo se puede enumerar los siguientes elementos: disipadores de energía viscoelásticos, péndulos, amortiguadores, etc. que cumplen la función de dar mayor resistencia a la estructura con la que interactúan.

En nuestro país, se han utilizado varias técnicas para mermar los efectos de un sismo en las estructuras metálicas, entre las más comunes está el reforzamiento, pero aún no se han realizado investigaciones acerca de cuáles serían los efectos en una estructura metálica, cuyo elemento disipador de energía sea un amortiguador telescópico hidráulico utilizado comúnmente para aplicaciones automotrices, en donde cumple la función de absorber las irregularidades del terreno y mantener la geometría adecuada de conducción.

Es por tal razón que el presente proyecto está orientado a sentar las bases para el análisis e investigación del comportamiento de un amortiguador telescópico hidráulico como elemento disipador de energía sísmica en un pórtico, realizando ensayos que simulen las características sísmicas en un amortiguador para obtener resultados que nos ayuden a encontrar la factibilidad de su uso en el pórtico analizado.

Para este propósito se deben relacionar las características más importantes encontradas en los sismos con la energía que se transmite en forma de cargas o movimiento al pórtico analizado, utilizando o no el amortiguador. Como complemento se podrá realizar una comparación del comportamiento del disipador

utilizado en el proyecto con otros usos más comúnmente, así como establecer la factibilidad de utilizar este tipo de amortiguadores en estructuras reales mediante un análisis práctico de los parámetros que se puedan encontrar en aplicaciones estructurales.

1.2 ANTECEDENTES

En un sismo terrestre la tierra vibra en una dirección horizontal X y la dirección vertical Y, los desplazamientos y aceleraciones en la dirección horizontal son muchos más notorios respecto a los verticales, por lo tanto el efecto del sismo en la dirección vertical se puede despreciar.

Debido a que en la vibración horizontal se generan desplazamientos y aceleraciones, esto significa liberación de energía sísmica, que para el caso de un pórtico (Estructura formada por nudos rígidos, los cuales además de cargas axiales, transmiten momento flector), y que para efecto de que se cumpla la ley de conservación de la energía, esta energía sísmica debe ser absorbida por cada uno de los elementos que forman parte del pórtico.

En vista que la energía sísmica tiene valores tremendamente altos, la misma provoca que los elementos que forman el pórtico rebasen los rangos elásticos y funcionen dentro del rango plástico produciéndose la falla de los elementos y por consiguiente de la estructura.

Para evitar la falla de estos elementos sería necesario incorporar en el pórtico un elemento que sea capaz de absorber gran cantidad de energía, haciendo que el resto de los elementos del pórtico puedan trabajar dentro del rango elástico. Este elemento que absorbe gran cantidad de energía se lo conoce como un amortiguador, cuyo funcionamiento dentro del pórtico es similar al funcionamiento de un sistema de amortiguamiento de un vehículo cuando recorre caminos irregulares.

El presente proyecto analizará el comportamiento mecánico de un amortiguador telescópico hidráulico utilizado comúnmente en vehículos, como un elemento adicional de un pórtico. Es necesario mencionar que para pórticos se utilizan amortiguadores de tipo visco elástico, que realizan la misma función, pero su estructura física es distinta.

En vista de lo anteriormente mencionado se realizarán ensayos de cargas fluctuantes, que simularán las cargas sísmicas que se transmiten al elemento de un pórtico, sobre un amortiguador telescópico hidráulico para lo cual se utilizarán los equipos del Laboratorio de Mecánica de Materiales del Departamento de Energía y Mecánica. Para dicho propósito adicionalmente se estudiará los procedimientos de operación de la máquina para simular exactamente las cargas sísmicas.

Dichos ensayos servirán para obtener, además de otros datos, el factor de amortiguamiento y el diagrama fuerza – desplazamiento, los cuales se introducirán como datos en la simulación de un pórtico. Para este

propósito se utilizará un software adecuado que podría ser: SAP 2000, FOGAL, ABAQUS, SOLIDWORKS, etc.

En esta simulación se realizará el análisis del comportamiento de un pórtico sin considerar el amortiguador telescópico hidráulico, simulando las cargas sísmicas tal y como se presentan en la realidad. También se realizará un análisis del pórtico adicionando el amortiguador telescópico hidráulico como elemento disipador de energía.

1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La esencia del presente proyecto es determinar la factibilidad de utilizar un amortiguador telescópico hidráulico en un pórtico como disipador de energía, basándonos en la comparación de las dos simulaciones a ser realizadas.

En base a esto el problema es determinar la siguiente hipótesis alternativa: El amortiguador telescópico hidráulico como elemento de un pórtico, es capaz de absorber la suficiente energía para permitir a los demás elementos trabajar dentro del rango elástico. La hipótesis nula se plantea como: El amortiguador, no absorbe la suficiente energía para que los demás elementos trabajen dentro del rango elástico.

1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Se ha visto que se han realizado pocas investigaciones desde el punto de vista de la ingeniería mecánica, acerca de las causas y efectos de las fuerzas sísmicas sobre pórticos metálicos. Por otra parte, no se han realizado investigaciones basadas en considerar un amortiguador telescópico hidráulico como elemento de un pórtico para minimizar los efectos de las fuerzas sísmicas sobre dicho pórtico.

El presente proyecto permitirá ampliar el desarrollo de la investigación en nuestro país acerca del comportamiento de un amortiguador tipo telescópico hidráulico, y determinar su utilidad para minimizar los efectos de las cargas sísmicas en pórticos.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar, mediante análisis y simulación, el comportamiento mecánico de un amortiguador telescópico hidráulico como elemento de un pórtico sometido a cargas sísmicas.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar desde un punto de vista mecánico el comportamiento de amortiguadores telescópico hidráulico como elementos controladores de energía.
- Analizar el comportamiento de los elementos de un pórtico sometido a cargas sísmicas.
- Determinar las propiedades mecánicas de un amortiguador telescópico hidráulico mediante la realización de ensayos simulando cargas sísmicas reales.
- Simular mediante software especializado el comportamiento de pórticos sometidos a cargas sísmicas en diferentes condiciones.
- Analizar los resultados obtenidos para determinar la eficiencia y fiabilidad de la utilización del amortiguador.
- Realizar un Análisis Económico – Financiero para determinar los costos y desembolsos de la investigación.

1.6 ALCANCE

Mediante el presente proyecto se pretende determinar si es factible la utilización de un amortiguador telescópico hidráulico como elemento adicional de una estructura metálica (pórtico) con el propósito de minimizar el efecto de las cargas sísmicas sobre el resto de los elementos de dicha estructura, es decir para que los mismos funcionen dentro del rango elástico. Esta comprobación se realizará mediante la simulación de un pórtico sometido a cargas sísmicas en un software especializado, y comparando los efectos sobre los elementos del pórtico, sin y con el amortiguador. Para determinar el comportamiento de dicho amortiguador ante cargas sísmicas se realizarán ensayos mecánicos sobre un amortiguador telescópico hidráulico simulando en la máquina de ensayos las cargas a ser simuladas para el funcionamiento dentro de dicho pórtico. Previamente se requerirá un estudio de las cargas sísmicas en pórticos y las características del amortiguador a ser utilizado para los ensayos.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 AMORTIGUADORES TIPO TELESCÓPICO HIDRÁULICO

2.1.1 INTRODUCCIÓN

La amortiguación es el efecto de debilitar procesos oscilatorios y se debe a la pérdida constante de energía. Entre las causas del amortiguamiento se encuentran la resistencia que ofrecen ciertos materiales y fluidos (como el caucho y el aire por ejemplo) a la propagación de las vibraciones y por lo tanto su reducción progresiva. Otra de las causas de la reducción de la amplitud de oscilación es el rozamiento del elemento lo que causa disipación de energía.

Un amortiguador es un dispositivo que sirve para disminuir o compensar el efecto de impactos, movimientos o vibraciones en aparatos mecánicos o estructuras, mediante la disipación o pérdida de energía. Entre los amortiguadores más utilizados se encuentran aquellos que utilizan sólidos de propiedades elásticas (caucho), y los que utilizan fluidos con alta viscosidad o resistencia a fluir (aceite, gas comprimido).

Entre las aplicaciones más importantes de los amortiguadores se encuentran la maquinaria industrial en donde se desea evitar la propagación del movimiento al suelo u otros mecanismos. Igualmente, como ya se ha visto, son utilizados en estructuras metálicas para disminuir los efectos de los movimientos sísmicos. La utilización más común se da dentro del funcionamiento de un automóvil en la parte de la suspensión.

El amortiguador de la suspensión de un automóvil es un dispositivo que mejora la comodidad y seguridad de marcha en los vehículos al reducir las oscilaciones producidas por la elasticidad de la suspensión y las irregularidades

del camino. Además ayuda a soportar la carga del vehículo y mantiene una correcta alineación y geometría del vehículo.

Los amortiguadores de suspensión usados comúnmente son aquellos de funcionamiento telescópico hidráulico. Estos constan de un cilindro lleno de aceite, un pistón de doble efecto y el vástago correspondiente. Los extremos libres del amortiguador se fijan en las partes móviles del automóvil. La reducción de la amplitud de las oscilaciones está dada por la resistencia que ofrece el aceite al pasar por una serie de orificios cuando se presenta cualquier movimiento dado en el automóvil por las vibraciones o irregularidades del terreno.

Se han dado avances tecnológicos para evitar problemas propios de los fluidos, como la cavitación y el desgaste, utilizando diferentes variantes en la construcción de amortiguadores, entre estos se puede notar la utilización de gas comprimido o aplicaciones eléctricas y neumáticas para la suspensión. Esto nos da una amplia variedad de amortiguadores que pueden ser implementados según ciertas características de movimiento o disposiciones geométricas.

Gracias a esta variedad se pueden encontrar distintas características de amortiguación, parámetros de disipación de energía y diferentes dimensiones que nos pueden ayudar a relacionar estas características dadas, con las requeridas para su implementación dentro de una estructura antisísmica, mediante ensayos realizados sobre un amortiguador y cálculos posteriores dentro de la estructura.

2.1.2 FUNDAMENTOS DE AMORTIGUACIÓN

2.1.2.1 Vibraciones mecánicas

Cuando se habla de vibraciones se refiere a los movimientos de los cuerpos y a las fuerzas asociadas con ellos. Todos los cuerpos que poseen masa y elasticidad, son capaces de vibrar. Una vibración mecánica es el movimiento de una partícula o cuerpo que oscila alrededor de

una posición de equilibrio. La mayoría de las máquinas y estructuras experimentan vibraciones hasta cierto grado por lo que su diseño requiere la consideración de este efecto dinámico debido a que ocasiona un aumento en los esfuerzos y tensiones.

La vibración se produce cuando el sistema en cuestión es desplazado desde una posición de equilibrio estable, el sistema tiende a retornar a dicha posición, bajo la acción de fuerzas de restitución elásticas o gravitacionales, moviéndose de un lado a otro hasta alcanzar su posición de equilibrio. El intervalo de tiempo necesario para que el sistema efectúe un ciclo completo de movimiento se llama periodo de vibración, el número de ciclos por unidad de tiempo define la frecuencia y el desplazamiento máximo del sistema desde su posición de equilibrio se denomina amplitud de vibración.

Existen dos clases de vibraciones, las libres y las forzadas. La vibración libre es causada por un impulso inicial, donde el movimiento es mantenido únicamente por las fuerzas de restitución inherentes al mismo. El sistema bajo vibración libre vibrará en una o más de sus frecuencias naturales, dependientes de la distribución de su masa y rigidez.

Cuando al sistema se le aplica fuerzas perturbadoras externas, el movimiento resultante es una vibración forzada. Cuando la excitación es oscilatoria, ya sea periódica o no, como la de un sismo, el sistema es obligado a vibrar a la frecuencia de excitación, si ésta coincide con una de las frecuencias naturales del sistema se produce resonancia.

2.1.2.2 Vibración libre no amortiguada

La ecuación que representa el movimiento de un sistema lineal de un solo grado de libertad sin la acción de fuerzas externas es:

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (2.1)$$

que se puede escribir como:

$$\ddot{u} + \omega_n^2 u = 0 \quad (2.2)$$

donde

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.3)$$

donde m , k y ω_n son la masa, constante elástica y frecuencia fundamental del sistema respectivamente.

La Figura 2.1 representa la solución a la ecuación (2.2), la cual es una función de característica sinusoidal que depende de la frecuencia natural del sistema y del tiempo de vibración.

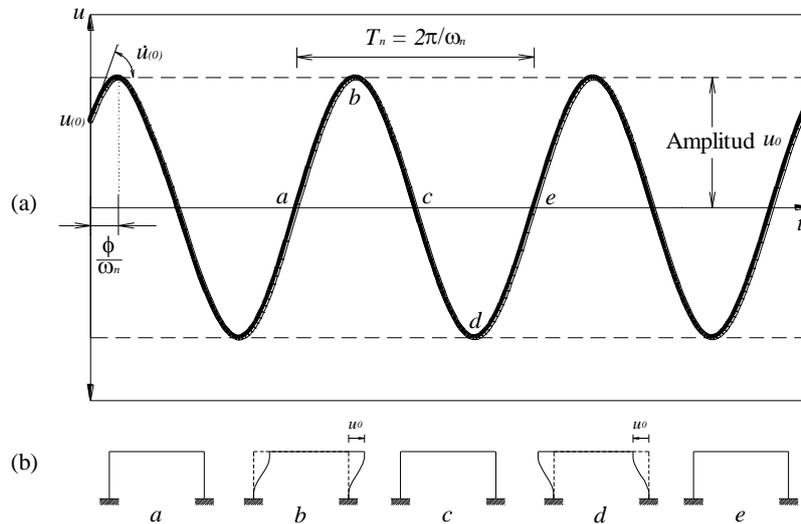


Figura 2.1 Vibración libre sin amortiguamiento*

El tiempo requerido para completar un ciclo de vibración se denomina período natural de vibración T y es:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (2.4)$$

2.1.2.3 Vibración libre con amortiguamiento viscoso

La ecuación de movimiento que representa un sistema vibrando libremente con amortiguamiento viscoso es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0 \quad (2.5)$$

dividiendo para la masa se obtiene:

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = 0 \quad (2.6)$$

donde la relación de amortiguamiento es:

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} \quad (2.7)$$

* www.gueandpartners.com.my

c es el coeficiente de amortiguamiento del sistema y c_{cr} es el coeficiente de amortiguamiento crítico igual a:

$$c_{cr} = 2m\omega_n \quad (2.8)$$

La relación de amortiguamiento determina el tipo de movimiento del sistema, que se ilustra en la Figura 2.2

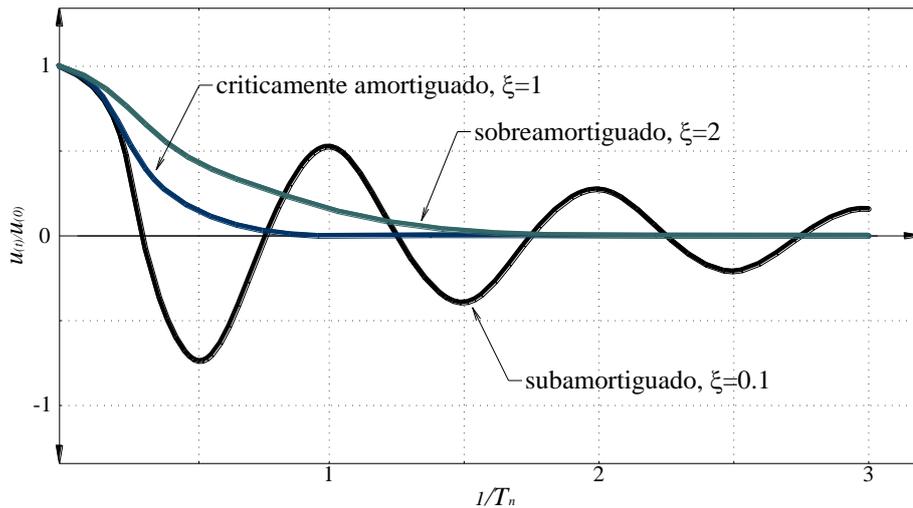


Figura 2.2 Tipos de movimiento*

Los tipos de movimiento pueden ser:

- Cuando $c = c_{cr}$ ó $\xi = 1$ el sistema retorna a su posición inicial de equilibrio sin oscilar, por tal razón es llamado sistema críticamente amortiguado o sistema con amortiguamiento crítico.
- Cuando $c > c_{cr}$ ó $\xi > 1$ el sistema no oscila pero retorna a su posición de equilibrio lentamente, por tal motivo es denominado sistema sobreamortiguado
- Cuando $c < c_{cr}$ ó $\xi < 1$ el sistema oscila alrededor de la posición de equilibrio con una amplitud que decrece progresivamente, y es llamado sistema subamortiguado.

El coeficiente de amortiguamiento crítico, c_{cr} , llamado así debido a que es un valor pequeño de c que inhibe completamente la oscilación y representa la línea de división entre el movimiento oscilatorio y de una sola oscilación.

* www.gueandpartners.com.my

Las estructuras civiles son sistemas subamortiguados por lo que se estudia su comportamiento para incrementar dicha relación de amortiguamiento.

El efecto del amortiguamiento es ilustrado en la Figura 2.3. La frecuencia de vibración par un sistema subamortiguado es:

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.9)$$

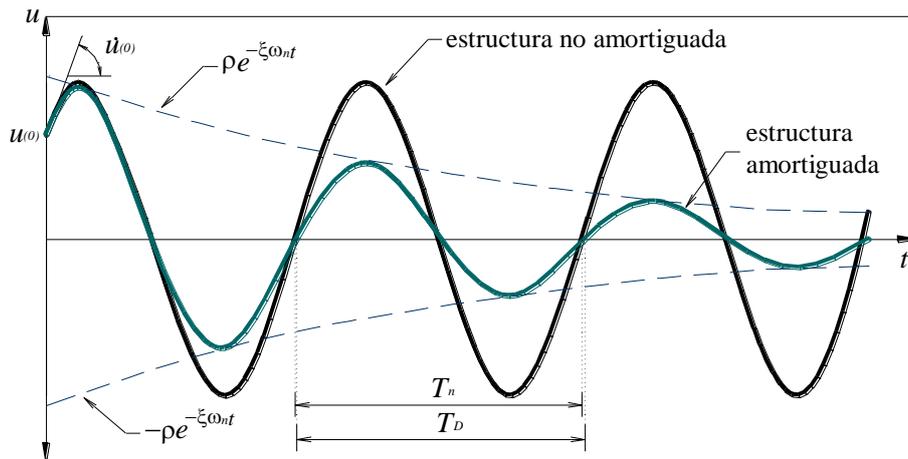


Figura 2.3 Efecto del amortiguamiento vibración libre*

2.1.2.4 Vibración forzada con carga armónica no amortiguada

Estableciendo una carga armónica dependiente del tiempo t y frecuencia ω con la siguiente ecuación:

$$p(t) = p_0 \sin \omega t \quad (2.10)$$

se obtiene la ecuación de un sistema no amortiguado sometido a vibración forzada:

$$m\ddot{u} + ku = p_0 \sin \omega t \quad (2.10)$$

La Figura 2.4 muestra la respuesta total de la ecuación anterior.

* www.gueandpartners.com.my

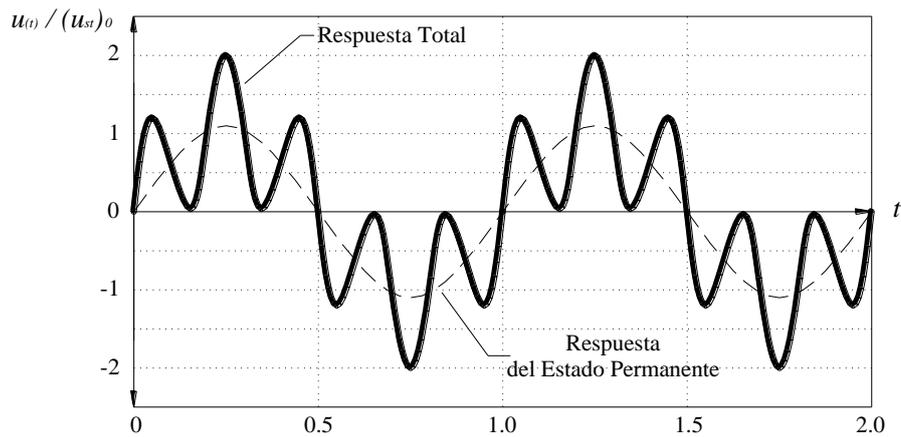


Figura 2.4 Sistema no amortiguado con carga armónica *

Para $\omega/\omega_n < 1$ el desplazamiento está en fase con la fuerza aplicada, para $\omega/\omega_n > 1$ el sistema estará fuera de fase con la fuerza aplicada. Cuando $\omega = \omega_n$ en sistemas no amortiguados se cambia de respuesta (Figura 2.5) por lo que se produce resonancia deformando el sistema a su valor máximo.

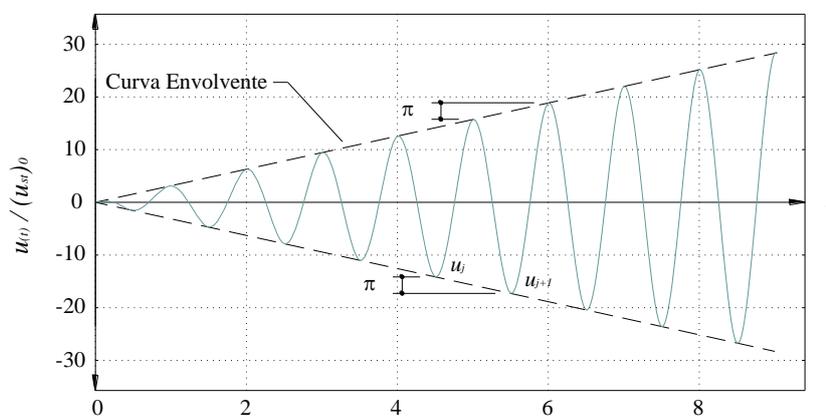


Figura 2.5 Sistema no amortiguado $\omega=\omega_n$ *

2.1.2.5 Vibración forzada con carga armónica amortiguada

Incluyendo el coeficiente de amortiguamiento en la ecuación (2.10) se tiene:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p_0 \sin \omega t \quad (2.11)$$

La solución de esta ecuación se muestra en la Figura 2.6.

* www.gueandpartners.com.my

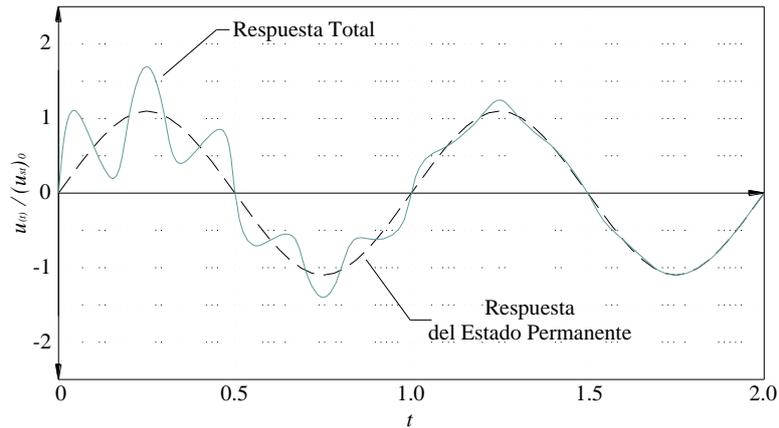


Figura 2.6 Sistema amortiguado con carga armónica *

Cuando $\omega = \omega_n$ el sistema tiene la respuesta mostrada en la Figura 2.7.

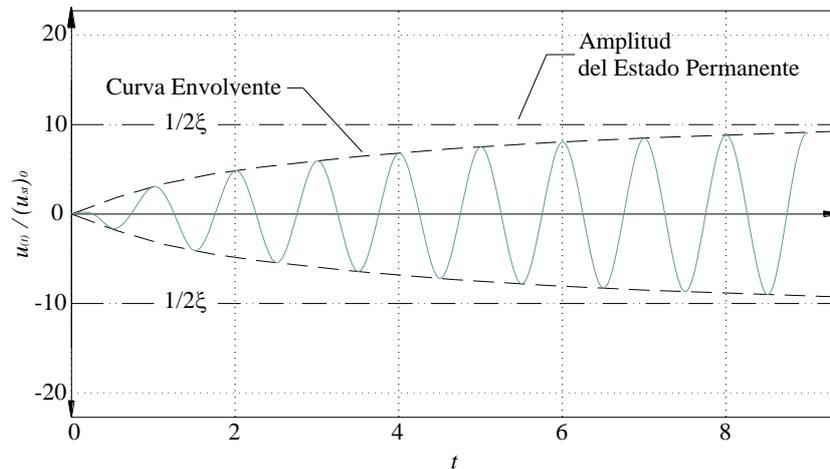


Figura 2.7 Sistema amortiguado $\omega = \omega_n$ *

Para $\omega/\omega_n \ll 1$ (la fuerza varía lentamente) la deformación de la respuesta no depende del amortiguamiento, para $\omega/\omega_n \gg 1$ el la respuesta es controlada por la masa del sistema. Cuando $\omega \approx \omega_n$ la respuesta depende directamente del amortiguamiento de la estructura, por lo tanto es un dato a considerar.

La frecuencia resonante está definida como la frecuencia de excitación en la cual se obtiene la amplitud máxima de respuesta. Para un sistema no amortiguado la frecuencia resonante para el desplazamiento, velocidad y aceleración es ω_n . En un sistema amortiguado la frecuencia resonante para el desplazamiento es:

* www.gueandpartners.com.my

$$\omega = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \quad (2.12)$$

Para la velocidad:

$$\omega = \omega_n \quad (2.13)$$

Para la aceleración:

$$\omega = \frac{\omega_n}{\sqrt{1 - 2\xi^2}} \quad (2.14)$$

2.1.3 CARACTERÍSTICAS DEL AMORTIGUADOR

2.1.3.1 Principio de funcionamiento

Los amortiguadores hidráulicos convencionales basan su funcionamiento en la conversión de energía cinética (movimiento) en energía térmica (calor). Para este objetivo el aceite debe pasar por una serie de orificios reducidos y un sistema de válvulas. La resistencia hidráulica resultante en el movimiento del pistón define la mayor o menor rigidez en la amortiguación.

La fuerza de amortiguación que producen los amortiguadores como reacción ante movimientos de vibración, esta en función de la velocidad que adquiere la estructura lo que incrementa su capacidad de amortiguación. La expresión generalizada para amortiguadores de cualquier fluido es:

$$F = CV^\alpha + A \quad (2.15)$$

donde F es la fuerza aplicada al pistón del amortiguador, V es la velocidad del pistón, C , A y α dependen de las propiedades del fluido y del circuito respectivamente. El exponente α tiene valores desde 0.3 hasta 1. La variación de la fuerza y velocidad se indican en la Figura 2.8.

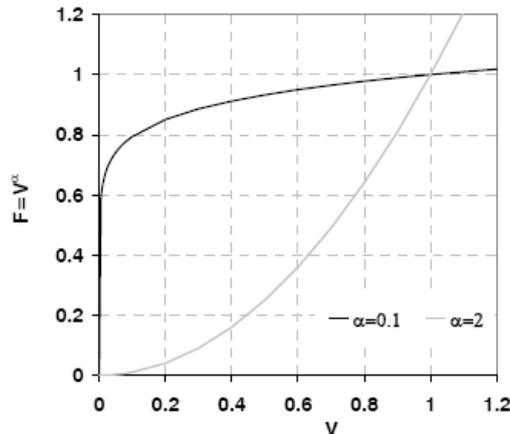


Figura 2.8 Fuerza y velocidad para los diferentes valores de α^*

Estas curvas características son producto de la calibración de los orificios y válvulas que son elementos funcionales del amortiguador. Si la curva característica se encuentra por debajo de los límites establecidos se define como amortiguador blando, si se encuentra por encima se define como amortiguador duro.

2.1.3.2 Comportamiento histerético básico

Para entender la respuesta histerética básica de un amortiguador, se lo somete a una variación de desplazamiento axial de ecuación:

$$x(t) = X_0 \sin \omega t \quad (2.16)$$

donde x es el desplazamiento relativo en los dos extremos del amortiguador, X_0 es el desplazamiento inicial y ω la frecuencia de oscilación para dicha variación de desplazamiento.

La ecuación básica para un amortiguador lineal es:

$$F = C\dot{x} \quad (2.17)$$

donde C es el coeficiente de amortiguamiento y F la fuerza de salida. La solución de la ecuación anterior se puede expresar como:

$$\frac{F}{X_0 C \omega} = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{x}{X_0}\right)^2} \quad (2.18)$$

* CASAROTTI CH. Bridge Isolation and Dissipation Devices

La ecuación anterior describe un bucle histerético elíptico como el de la Figura 2.9. En sistemas de varios grados de libertad, el amortiguador tiene diversas respuestas para cada frecuencia. Por lo tanto la energía disipada por el amortiguador para cada frecuencia de oscilación es:

$$E_D = \int_0^{2\pi/\omega} F(t)xd(t) = \pi C \omega X_0^2 \quad (2.19)$$

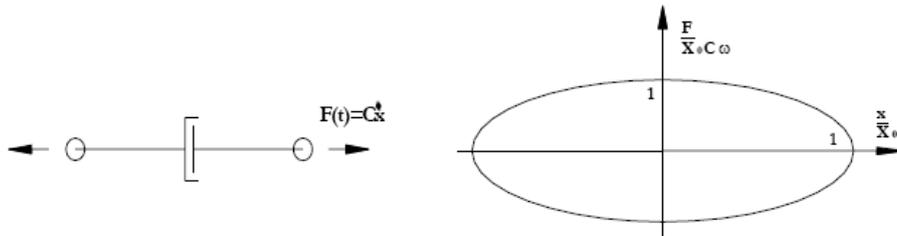


Figura 2.9 Comportamiento histerético de un amortiguador lineal*

Cuando el amortiguador presenta un comportamiento no lineal la fuerza de salida presenta la siguiente ecuación:

$$F = C\dot{x}^\alpha \quad (2.20)$$

Donde α es el exponente de amortiguamiento que puede variar según el tipo de amortiguador (normalmente desde 0.2 hasta 1). La curva que describe tiene una ecuación compleja y se muestra en la Figura 2.10

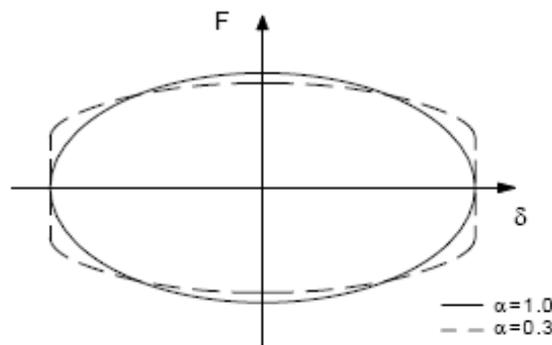


Figura 2.10 Curvas para distintos valores de α *

La relación entre los coeficientes de amortiguamiento para el comportamiento lineal y no lineal se describe mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{C_{NL}}{C_L} \cong \frac{\sqrt{\pi}}{2} (\omega X_0)^{1-\alpha} \quad (2.21)$$

* CASAROTTI CH. Bridge Isolation and Dissipation Devices

2.1.3.3 Amortiguador telescópico hidráulico

Los amortiguadores son básicamente bombas de aceite. Hay un pistón sujeto al extremo de la barra del pistón y dicho pistón funciona contra el fluido hidráulico en el tubo de presión (Figura 2.11). A medida que el vástago se desplaza hacia arriba y hacia abajo, el fluido hidráulico es forzado a través de pequeños agujeros, llamados orificios, ubicados en el interior del pistón. Sin embargo, estos orificios dejan pasar solamente una pequeña cantidad de fluido a través del pistón. Esto reduce la velocidad de movimiento del pistón, lo cual a su vez reduce la velocidad de movimiento de los resortes y de la suspensión.

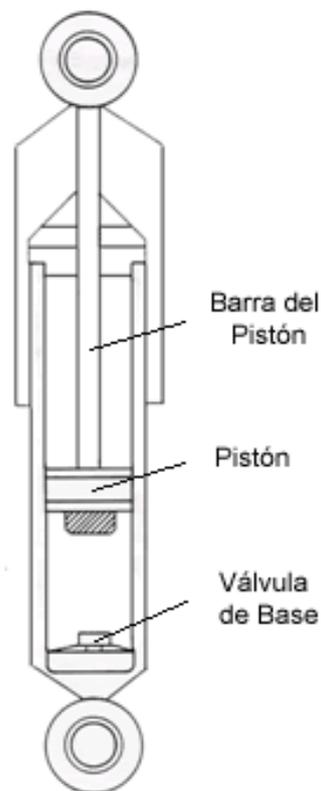


Figura 2.11 Esquema del amortiguador hidráulico *

Normalmente los orificios son fijos y restringen el flujo del aceite. Para que las válvulas abran es necesario ejercer una presión determinada. Mientras mayor es esta mayor es la apertura de las válvulas. En algunos casos este paso es regulable. El funcionamiento detallado se explica en la Figura 2.12.

* URBIETA J. Amortiguadores y Suspensión

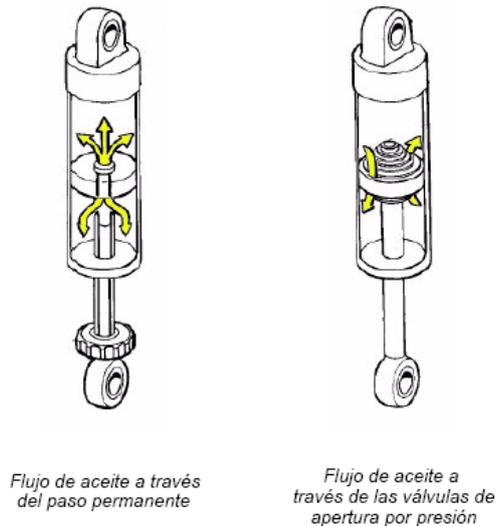


Figura 2.12 Funcionamiento de un amortiguador telescópico hidráulico*

Cuando la velocidad en ambos extremos es baja, las válvulas permanecen cerradas y el aceite pasa a través del orificio permanente. Si la presión sobre las válvulas aumenta, estas se abren hasta obtener la máxima apertura y nuevamente el comportamiento del amortiguador depende del paso del aceite a través del orificio permanente.

Las válvulas de extensión y compresión son diferentes, por lo que el esfuerzo de compresión es menor para una misma velocidad. Esto es para evitar las grandes fuerzas compresivas en amortiguadores de automóviles donde interesa tener un comportamiento blando en compresión (Figura 2.13).

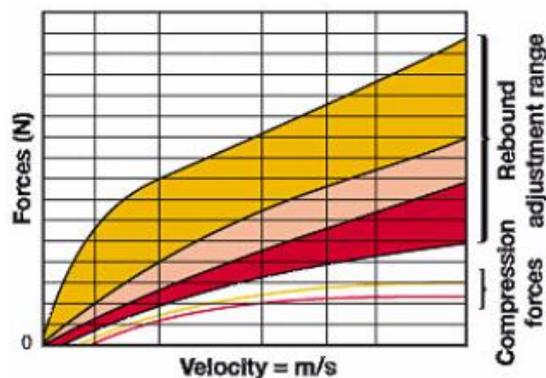


Figura 2.13 Diagrama fuerza – velocidad*

Los amortiguadores funcionan sobre el principio del desplazamiento de los fluidos tanto en el ciclo de compresión como en el de extensión. El ciclo de compresión controla el movimiento del peso no soportado por los resortes de un vehículo, mientras que la extensión controla el peso

* URBIETA J. Amortiguadores y Suspensión

soportado por los resortes, que es más grande. Un detalle del funcionamiento se presenta en la Figura 2.14

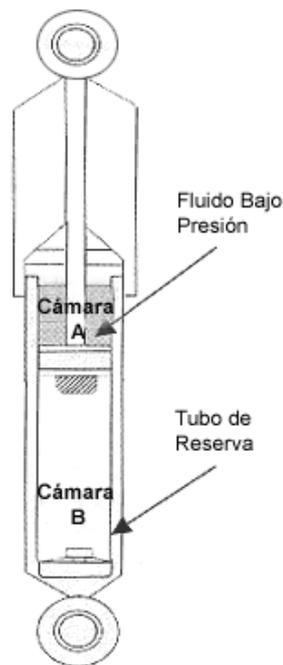


Figura 2.14 Comportamiento del amortiguador*

Durante el tiempo de compresión o movimiento hacia abajo, un poco de fluido circula a través del pistón, de la cámara B a la cámara A, y un poco a través de la válvula de compresión, al tubo de reserva. Para controlar el flujo, hay tres etapas de valvulado tanto en el pistón como en la válvula de compresión.

Durante el ciclo de extensión a medida que el pistón y la barra se mueven hacia arriba, hacia la parte superior del tubo de presión, el volumen de la cámara A se reduce y por lo tanto está a una presión más alta que la cámara B. Debido a esta presión más alta, el fluido circula hacia abajo, a través de la válvula de extensión de tres etapas del pistón, a la cámara B.

En la Figura 2.15 se muestra el detalle del valvulado de apertura por presión y la aguja que sirve para regular dicha abertura, si es del caso. Si se ajusta la dureza del amortiguador para ablandarlo, la aguja abrirá el orificio facilitando el paso del aceite y disminuyendo la rigidez del amortiguador.

* www.monroe.com



Figura 2.15 Elementos del amortiguador*

Los dos tipos de diseños de amortiguadores telescópicos más comunes son los monotubo y los de doble tubo o también llamados bitubo.

2.1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS AMORTIGUADORES

2.1.4.1 Amortiguador hidráulico telescópico de doble tubo

El diseño bitubo básico tiene un tubo interior, conocido como el tubo de trabajo o tubo de presión, y un tubo exterior conocido como el tubo de reserva. El tubo exterior se utiliza para almacenar el exceso de fluido hidráulico. Un ejemplo se observa en la Figura 2.16

Existen varios tipos de montaje de amortiguadores. Algunos utilizan bujes de caucho entre el amortiguador y el bastidor o suspensión del automóvil. Estos bujes son flexibles para permitir el movimiento de la suspensión.

* URBIETA J. Amortiguadores y Suspensión

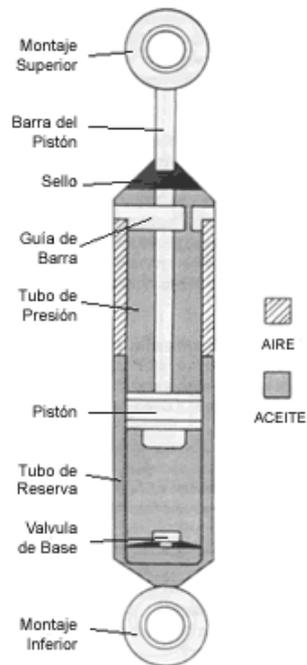


Figura 2.16 Amortiguador doble tubo*

La barra del pistón pasa a través de una guía de barra y un sello en el extremo superior del tubo de presión. La guía de barra mantiene la barra en línea con el tubo de presión y permite que el pistón se mueva libremente en el interior. El sello mantiene el aceite hidráulico en el interior libre de contaminación.

La válvula de base o de pie ubicada en la parte inferior del tubo de presión se conoce como válvula de compresión. Controla el movimiento del fluido durante el ciclo de compresión.

Los elementos básicos que componen un amortiguador telescópico bitubo no presurizado (A) y presurizado (B), son detallados en la Figura 2.17:

- Vástago (1)
- Pistón (2)
- Guía de Vástago (3)
- Acoplamientos Superior e Inferior (4)
- Tubo y Cámara interior o cilindro (5)
- Tubo y Cámara exterior o de reserva (6)
- Válvula de Base (7)

* www.monroe.com

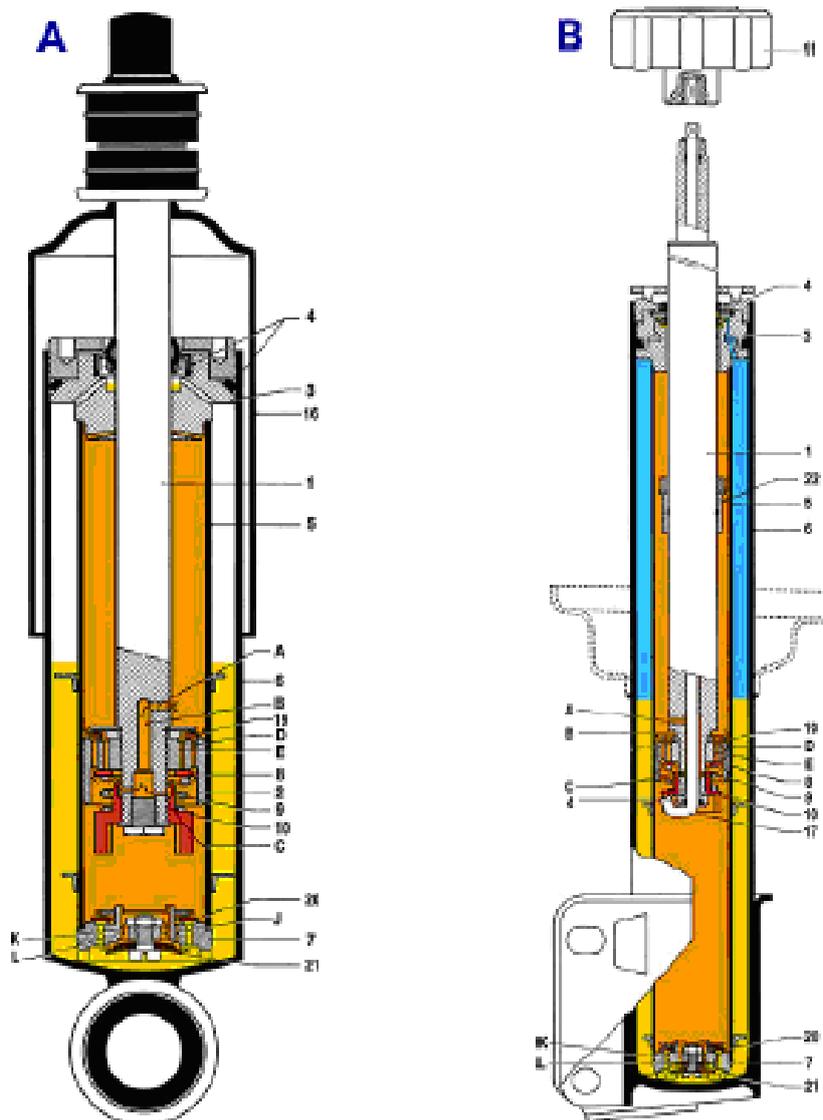


Figura 2.17 Partes de un amortiguador doble tubo *

El diámetro interior es el diámetro del pistón y el interior del tubo de presión. Generalmente cuanto más grande sea la unidad, más altos serán los niveles potenciales de control, debido al mayor desplazamiento del pistón y las áreas de presión más grandes. Cuando más grande sea el área del pistón, más pequeñas serán la presión de funcionamiento y las temperaturas internas. Esto proporciona capacidades de amortiguación más altas.

* URBIETA J. Amortiguadores y Suspensión

Los ingenieros de suspensiones seleccionan valores de valvulado para un vehículo específico con el fin de lograr unas características óptimas de equilibrio y estabilidad en la suspensión.

El funcionamiento de este tipo de amortiguadores se divide en dos procesos:

- Carrera de Compresión
- Carrera de Extensión

En la carrera de compresión el vástago inicia el funcionamiento y el aceite que se encuentra dentro de la cámara interior fluye a través de los orificios y de la válvula de no retorno hacia el espacio libre que se encuentra al otro lado del pistón. Al mismo tiempo, el vástago que va tomando espacio dentro de la cámara interior, desplaza una cierta cantidad de aceite, el cual obligadamente atraviesa la válvula de pie hasta llegar a la cámara de reserva la cuál por lo general se encuentra llena de aire a presión atmosférica y en ciertos casos llena de nitrógeno. La fuerza de amortiguamiento es función de la resistencia que la válvula de pie presenta al flujo de aceite.

Por otro lado en la carrera de extensión, en el momento en que el vástago empieza a salir, el aceite que se encuentra sobre la parte superior del pistón es comprimido y de esta manera fluye a través de las válvulas que se encuentran en él. La resistencia que se presenta en el momento en que el aceite fluye a través de dichas válvulas, es la fuerza de amortiguamiento en la carrera de extensión. El aceite que se encontraba en la cámara de reserva regresa sin ningún tipo de resistencia por la válvula de pie hacia la cámara interior para equilibrar a todo el sistema.

En general existen dos tipos de diseños para estos amortiguadores:

- No presurizados
- Presurizados

Los primeros, llamados no presurizados, funcionan solamente con aceite como fluido de trabajo, mientras que los presurizados trabajan con dos fluidos distintos, aceite y gas.

La diferencia entre los amortiguadores presurizados y los no presurizados es la de que los presurizados por su sistema más complejo de funcionamiento

presentan respuestas más sensibles y mayor suavidad en el proceso de amortiguamiento.

Existen amortiguadores cuya función es sensible tanto a la aceleración como a la posición del pistón para esto se divide todo su mecanismo en zonas donde se controla o se da comodidad al manejo de la suspensión.

2.1.4.2 Amortiguador hidráulico telescópico monotubo

Estos amortiguadores son amortiguadores cargados con gas a alta presión con un solo tubo, el tubo de presión. Dentro del tubo de presión hay dos pistones: un pistón divisor y un pistón de trabajo como lo muestra la Figura 2.18. El pistón de trabajo y la barra son muy similares al diseño del amortiguador bitubo. La diferencia en la aplicación real es que un amortiguador monotubo se puede montar en posición invertida o en posición al derecho y funcionará de cualquiera las dos maneras. Además de su flexibilidad de montaje, los amortiguadores monotubo son un componente significativo, junto con el resorte, para soportar el peso del vehículo.

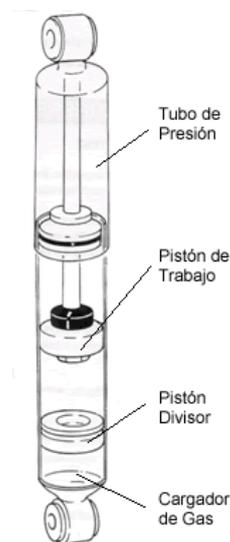


Figura 2.18 Amortiguador monotubo*

Sus elementos principales detallados en la Figura 2.19 son:

- Vástago (1)
- Pistón (2)
- Guía del Vástago (3)
- Acoplamiento Superior e Inferior (4)
- Pistón Flotante (15)

* URBIETA J. Amortiguadores y Suspensión

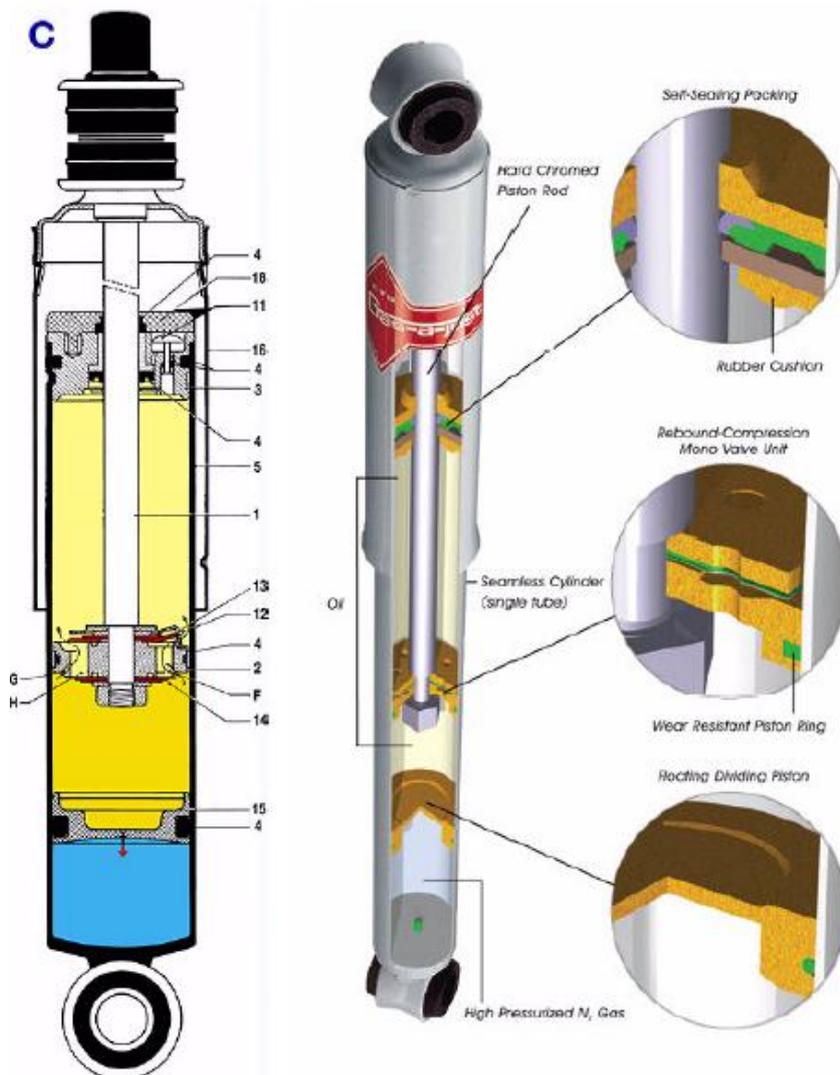


Figura 2.19 Esquema completo de un amortiguador mono tubo*

El funcionamiento se describe en dos partes:

- Carrera de compresión
- Carrera de extensión

En la carrera de compresión, el pistón flotante divide la cámara interior en dos zonas, una de ellas será la zona de aceite y a otra será la zona llena de gas presurizado entre 20 y 30 bares. En el instante en que el vástago es empujado hacia dentro, la zona de gas se comprime debido a la presión que el aceite ejerce sobre dicho elemento, y de esta manera la presión en ambos lugares se incrementa, por tal motivo el aceite fluye por medio de los orificios y válvulas del pistón, y de esta manera la fuerza de amortiguamiento se determina gracias a la resistencia que las válvulas presentan sobre el aceite que fluye.

* URBIETA J. Amortiguadores y Suspensión

En la carrera de extensión, el vástago empieza a salir, y por tal efecto el aceite que se encontraba encima del pistón se comprime y pasa por los orificios y válvulas que se encuentran sobre el pistón. La fuerza de amortiguamiento se determina por medio de la resistencia que dichas válvulas presentan al flujo del aceite. Al terminar el proceso todos los elementos regresan a su posición inicial o de equilibrio.

Un amortiguador mono tubo presenta las siguientes ventajas:

- Sistema de refrigeración eficiente
- Presiones de operación bajas
- Niveles de aceite constantes
- No presenta problemas de cavitación
- Montaje sencillo

Como desventajas se tiene:

- Mayores costos de fabricación
- Valvulería compleja
- No se adaptan a estructuras bitubo
- Fuerza de extensión en la posición nominal

2.1.5 APLICACIONES

Las aplicaciones más comunes o más conocidas de los amortiguadores son como parte del sistema de suspensión de vehículos como el mostrado en la Figura 2.20. Conjuntamente con un componente elástico, la suspensión sirve para absorber las desigualdades del terreno y mantener las ruedas en contacto con éste. Entre las funciones principales se tiene:

- Reducción de las fuerzas causadas por las irregularidades del terreno
- Control de la dirección del vehículo
- Mantenimiento de la adherencia de los neumáticos a la carretera
- Mantenimiento de la correcta alineación de las ruedas
- Soporte de la carga del vehículo
- Mantenimiento de la altura óptima del vehículo

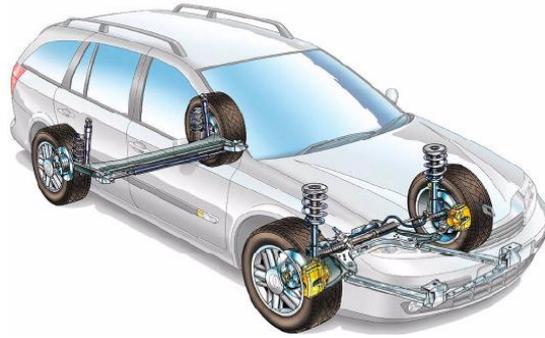


Figura 2.20 Sistema de suspensión de un vehículo*

Además de otras aplicaciones en que se absorbe vibraciones de máquinas y otros elementos, una de las más conocidas y que sirve de interés para el presente estudio es la de amortiguación de cargas sísmicas y de viento (como el ejemplo es mostrado en la Figura 2.21).

Los disipadores de fluidos viscosos se basan en la respuesta elástica de un líquido viscoso ya sea aceite o silicona fluido compresible. Al generarse un desplazamiento interno del pistón, el fluido es forzado a pasar por un grupo de pequeños orificios, lo que da como resultado disipación de energía.

Este dispositivo es muy eficiente, puesto que cubre un amplio rango de frecuencias, así que sirve para un mayor rango de sismos. Estos dispositivos son similares a los amortiguadores de un automóvil (analizados anteriormente), pero operan con un mayor nivel de fuerzas y son fabricados con materiales más durables para lograr un mayor tiempo de vida útil. La Figura 2.22 muestra el esquema general de un disipador tipo viscoso. Estos dispositivos incrementan el amortiguamiento de las estructuras hasta el 50% del amortiguamiento crítico. Además tienen un mayor control de los esfuerzos causados en los elementos y temperaturas de operación.

* URBIETA J. Amortiguadores y Suspensión



Figura 2.21 Amortiguador de fluido viscoso *

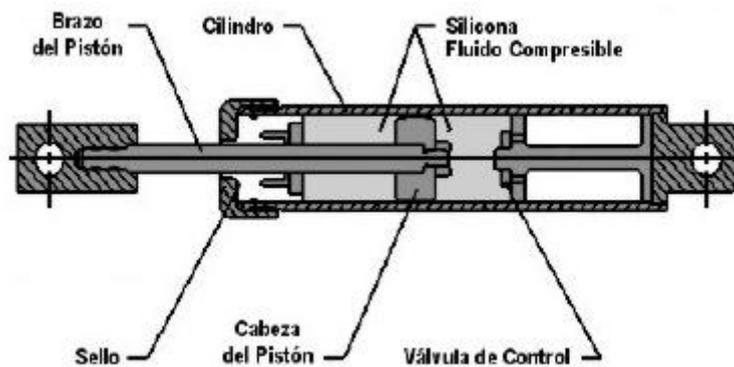


Figura 2.22 Esquema de un disipador viscoso *

2.2 CARGAS SÍSMICAS

2.2.1 INTRODUCCIÓN

* CASAROTTI CH. Bridge Isolation and Dissipation Devices

Los fenómenos sísmicos han sido objeto de estudio desde tiempos remotos y ha sido interpretado de diferentes maneras por la ciencia. El avance tecnológico en la ciencia sismológica ha ido avanzando tanto en el campo de la detección de estos fenómenos con la invención de aparatos de medición y escalas de clasificación, como en los diferentes métodos para minimizar o contrarrestar los efectos de dichos fenómenos.

Los sismos como se verá a continuación, son producidos por la característica de constante cambio en la morfología de la corteza terrestre presentada desde su formación hace millones de años. Este cambio implica liberación de energía, la cual se manifiesta de diferentes formas en la superficie terrestre, siendo la más importante y de mayor análisis el movimiento del suelo y aquello que se encuentre sobre él.

La relación entre la energía liberada en un sismo y el movimiento que produce en las estructuras montadas sobre el suelo ha sido estudiada en diferentes campos de la ciencia, siendo la dinámica de estructuras y la resistencia de materiales los que más han podido explicar la transmisión de la energía liberada en un movimiento telúrico hacia los elementos que conforman una estructura.

Se han utilizado diferentes criterios de diseño de estructuras sismo - resistentes. Algunas normas para la construcción de estructuras metálicas se basan en los efectos que causan tomando como parámetro principal las cargas y las deformaciones, por lo que se lo podría considerar como un análisis estático de los efectos sísmicos. Este análisis trata de encontrar materiales más resistentes o elementos reforzados para dichas estructuras.

El otro criterio de análisis busca disminuir los efectos del movimiento causado por los sismos. Este movimiento se expresa como velocidad y aceleración. Para este objetivo se ha estudiado dichas estructuras analizando su comportamiento dinámico, encontrando diferentes parámetros útiles para minimizar la energía transmitida. Esta energía puede ser controlada o disipada mediante diferentes métodos que han sido aplicados con éxito según el tipo de

estructura. Entre estos métodos se encuentran los amortiguadores viscoelásticos y de fluido viscoso los cuales se colocan como elementos adicionales en las estructuras.

Estos criterios de análisis indicarán los parámetros importantes, tanto estáticos y dinámicos, considerados en el estudio de un pórtico simple sometido a cargas sísmicas. También podrán dar una serie de condiciones que se deberán cumplir para la selección de métodos, cargas y materiales para las pruebas y simulaciones posteriores.

2.2.2 ANÁLISIS DE CARGAS EN PÓRTICOS

2.2.2.1 Características de los pórticos

Un pórtico es una estructura continua formada por nudos rígidos como indica la Figura 2.23, los cuales además de transmitir cargas axiales, transmiten momento flector.

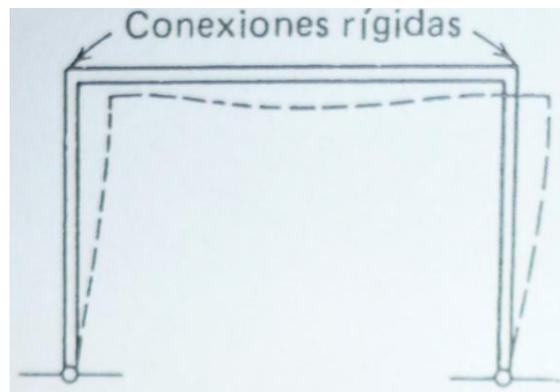


Figura 2.23 Estructura de un pórtico*

Por lo general en edificios o en estructuras de gran magnitud un pórtico es la estructura básica o más simple de dicha composición (Figura 2.24). En este caso los pórticos se encuentran formados por elementos metálicos como vigas, columnas u otros; el caso más común es en el cual los elementos horizontales de un pórtico se comporten como vigas y los elementos verticales trabajen como columnas. En otros casos existen elementos inclinados en vez de elementos horizontales, y así de muchas formas se pueden presentar distintos arreglos estructurales.

* CRAWLER S., DILLON R. Estructuras de Acero

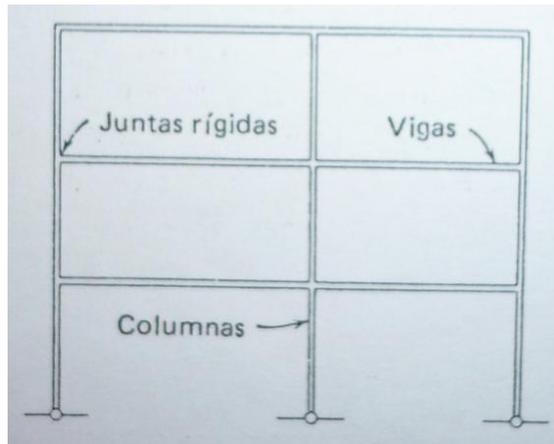


Figura 2.24 Elementos de una estructura*

Para el diseño de un pórtico se realiza un análisis desde un miembro individual hacia toda la estructura completa; y de acuerdo a este análisis se pueden determinar las relaciones y el comportamiento de cada uno de los miembros de la estructura.

Este tipo de estructuras cuentan con la ventaja de ser continuas, lo cual les permite reducir flexiones, se reducen de igual manera las fuerzas laterales por lo cual se puede prescindir de arriostramientos especiales para este tipo de fuerzas, y de la misma manera las estructuras continuas presentan una mayor resistencia al colapso último originados por cargas sísmicas.

Para el análisis y diseño de pórticos es importante tomar en cuenta las normas ya existentes, las cuales permiten desarrollar procedimientos preestablecidos con el propósito de analizar el comportamiento de un pórtico.

Normas como la AISC, establecen que se puede utilizar dos tipos de procedimientos los cuales deben ser seleccionados de acuerdo a las condiciones a las que se encuentre sometido el pórtico, a su geometría y a los materiales que lo compongan. Estos dos tipos de análisis son:

- Análisis elástico
- Análisis plástico

Un análisis elástico, va a permitir realizar un análisis de fuerzas internas en pórticos que son estáticamente indeterminados, en este caso la resistencia límite de la estructura (pórtico) es controlada por la capacidad de la sección que se encuentra sometida a las fuerzas más grandes.

Un análisis plástico es utilizado cuando la sección transversal de los elementos que componen el pórtico, es compacta y si el miembro se encuentra adecuadamente arriostrado; en este caso el límite estructural del pórtico se encuentra regido por la formación de un mecanismo

* CRAWLER S., DILLON R. Estructuras de Acero

cinemático, el cual se encuentra determinado de manera que se permita el colapso de toda la estructura.

En ciertos casos especiales, se puede determinar el comportamiento de una estructura continua por medio de métodos convencionales de análisis de estructuras, como son el método de distribución de momentos.

De la misma manera ciertas normas cuentan con valores tabulados y tablas con el comportamiento estructural de ciertos arreglos que son comúnmente utilizados. En otros casos se puede recurrir también al uso de software especializado para el análisis estructural de ciertos pórticos.

2.2.2.2 Análisis por distribución de momentos

El análisis por distribución de momentos se basa en un proceso iterativo y es un método sencillo que permite determinar los momentos en los nudos y en los soportes de una estructura continua. El objetivo de este análisis es encontrar los momentos existentes en los nudos y en los apoyos estructurales para posteriormente encontrar otras fuerzas o reacciones puntuales aplicando simple estática.

El análisis de estructuras continuas por medio de distribución de momentos es aplicable de una forma muy sencilla a pórticos que se encuentran bajo la acción de fuerzas laterales que puedan ocasionar desplazamientos en dicha dirección.

Vale recalcar que se deben asumir ciertas condiciones para poder realizar este tipo de análisis; la condición más importante es la de que los miembros se encuentran localmente empotrados contra rotación en todos los puntos de soporte y en los nudos.

En general el procedimiento a seguir para realizar un análisis por distribución de momentos se lo presenta a continuación (Como el ejemplo de la Figura 2.25):

- a) Determinar los momentos de empotramiento en cada uno de los apoyos por medio de procedimientos básicos de análisis de estructuras o por medio de información en tablas disponibles.
- b) En el siguiente paso de este proceso se debe liberar los nudos, es decir se realiza un corte para determinar momentos equilibrantes en cada uno de los miembros que llegan al nudo.

- c) El último paso es el de encontrar los momentos en todos los puntos necesarios. En el caso de haber asumido que alguno de los nudos estuviera empotrado, se debe realizar una iteración, y por medio del seguimiento de los pasos anteriores encontrar los momentos reales en dichos puntos.

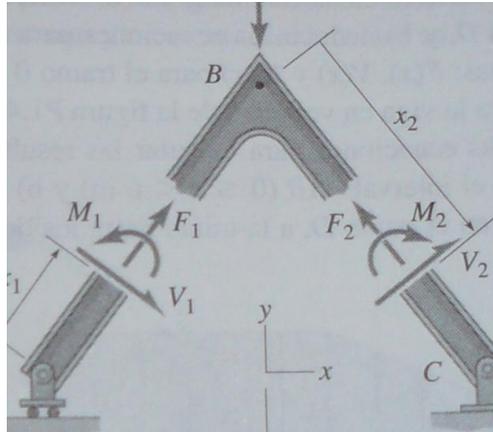


Figura 2.25 Ejemplo de distribución de momentos *

2.2.2.3 Diseño elástico de pórticos

El diseño elástico se basa en determinar la capacidad de la estructura, la cual está determinada por la resistencia de la sección transversal en la posición del momento máximo, el cual es calculado suponiendo un comportamiento elástico en la estructura.

Para el diseño elástico de marcos continuos, en este caso, se procederá a desarrollar el procedimiento para un análisis estructural tomando en cuenta las siguientes consideraciones (Figura 2.26):

- Se asume que los momentos, fuerzas cortantes y fuerzas axiales son valores dados, o fueron determinados por métodos manuales de la estática.
- Este diseño brinda atención especial a las columnas que son los elementos de soporte y no tienen continuidad con el pórtico principal.
- Inicialmente en la siguiente demostración se asume que la columna a ser analizada tiene dependencia en las columnas vecinas para que de esta manera exista resistencia lateral en su parte superior.
- La columna 1 se encuentra conectada por medio de un miembro horizontal a la columna 2.

* CRAIG R. Mecánica de Materiales

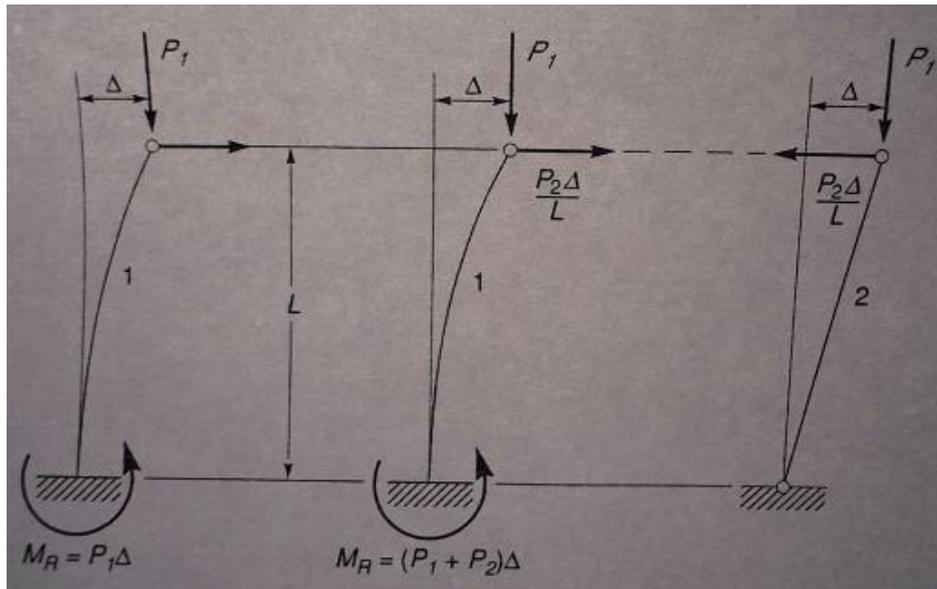


Figura 2.26 Diseño elástico de pórticos *

La columna 1 presenta una deformación debido al pandeo originado por la carga axial P_1 . Para esas condiciones, el momento flector externo $P_1\Delta$ en el empotramiento de la base se encuentra en equilibrio con el momento originado por el elemento en dicha base. Se requiere de la misma manera que exista un soporte lateral que permita a la columna mantenerse en equilibrio, este soporte lateral es determinado tomando momentos respecto a la articulación de la columna en su base y esta resistencia es igual a $P_2\Delta$. La columna 2 en su base proporciona un momento el cual se encarga de resistir la fuerza lateral y de tal manera mantiene el equilibrio requerido. Este momento en la base de la columna 2 está dado por:

$$M_R = (P_1 + P_2)\Delta \quad (2.22)$$

de dicha ecuación se puede concluir que el momento M_R es equivalente al momento resistente que la columna 1 necesitaría para encontrarse en equilibrio si la columna 1 estuviera cargada con las cargas P_1 y P_2 .

Después de haber citado las consideraciones de análisis de este sistema estructural, se puede desarrollar un procedimiento de diseño elástico para pórticos continuos:

- Diseñar las columnas, con articulaciones en sus extremos, de acuerdo a las cargas aplicadas con un factor de apoyos de las columnas $K = 1$.
- Para el caso de columnas que se encuentren empotradas en su base o que sean parte de un pórtico y que se estén conectadas por medio de miembros horizontales a columnas articuladas en sus extremos, de tal forma que las deflexiones en la parte superior sean las mismas en todas las columnas, serán diseñadas con su propia carga (columnas empotradas), más la carga que ejercen las columnas articuladas sobre ellas.

* GALAMBOS T., LIN F., JOHNSTON B. Diseño de Estructuras de Acero con LRFD

Este procedimiento es efectivo cuando se trabaja en el rango elástico de los elementos estructurales; cuando se trabaja dentro de un rango inelástico es un procedimiento muy conservador.

Para realizar un diseño seguro de un pórtico se debe realizar un estudio completo de cada uno de los elementos en los cuales se debe analizar los momentos máximos en cada uno de los elementos, así como las deflexiones de dichos elementos.

Para un estudio completo se deben encontrar los momentos positivos y negativos. Al realizar un estudio completo de toda la estructura formada por varios pórticos se debe tomar un pórtico base a ser analizado y en dicho pórtico debe encontrarse el momento negativo en un soporte interior, ya que es el valor más importante a ser determinado puesto que el mismo es el que condiciona el diseño de la estructura. En el caso de presentarse un momento negativo máximo en un soporte interior, se debe colocar la carga viva en el claro central y también en los laterales; y esta carga provocará un desplazamiento lateral del pórtico debido a su naturaleza asimétrica.

2.2.2.4 Diseño plástico de pórticos continuos

Para el diseño plástico, la capacidad de la estructura se determina en base a la resistencia que presente toda la estructura, es decir la carga que haga colapsar la estructura será la resistencia última de la estructura.

Existen algunos tipos de perfiles que son utilizados con mayor frecuencia en un diseño plástico ya que su geometría les permite trabajar de manera eficiente en una estructura diseñada por el método plástico. Un ejemplo son los perfiles W de patín ancho los cuales cumplen con las especificaciones de sección compacta dentro de la norma AISC. La razón por la cual unos perfiles son más utilizados en el diseño plástico es la de que las secciones compactas permiten una deformación por flexión dentro del intervalo plástico sin perder la resistencia a la compresión debido al pandeo elástico.

Por otra parte, el diseño plástico brinda una gran ventaja, esta es que el análisis estructural se simplifica ya que es estáticamente determinado.

Para el caso de pórticos se recomienda realizar un análisis estructura utilizando el método del mecanismo. En este caso existirá más de un escenario posible de falla que pueda presentarse, y cada mecanismo de falla, dará una carga máxima de colapso, y de todas ellas deberá seleccionarse la mínima, la cuál proporcionará el criterio para la selección del elemento.

El método de desplazamientos virtuales es el más apropiado para realizar un método del mecanismo. Este método basa su desarrollo en el principio de conservación de la energía, ya que el trabajo positivo externo realizado por las fuerzas aplicadas va a ser igual al trabajo negativo realizado internamente.

Para el caso de un mecanismo plástico sometido a una carga de falla, el trabajo interno puede ser determinado por medio de la suma de los productos de cada momento plástico multiplicado por la rotación en la articulación correspondiente.

A continuación se presentan las ecuaciones que permiten determinar el trabajo externo e interno de un elemento estructural en general, cabe destacar que se debe prestar atención y tener cuidado en el momento de determinar a deflexión promedio del elemento:

$$\text{Trabajo Externo} = wL \times \frac{\theta L}{n} \tag{2.23}$$

$$\text{Trabajo Interno} = M_p(n\theta)$$

Después se deben igualar la ecuación de trabajo interno con la de trabajo externo para de esta manera poder determinar M_p .

A continuación se presentan casos específicos de columnas articuladas que permitirán vislumbrar de manera más correcta el procedimiento de diseño plástico de marcos:

Caso 1: Mecanismo de viga, cuyo procedimiento se detalla en la siguiente ecuación y está especificado en la Figura 2.27:

$$\frac{PL\theta}{2} = 4M_p\theta \Rightarrow M_p = \frac{PL}{8} \tag{2.24}$$

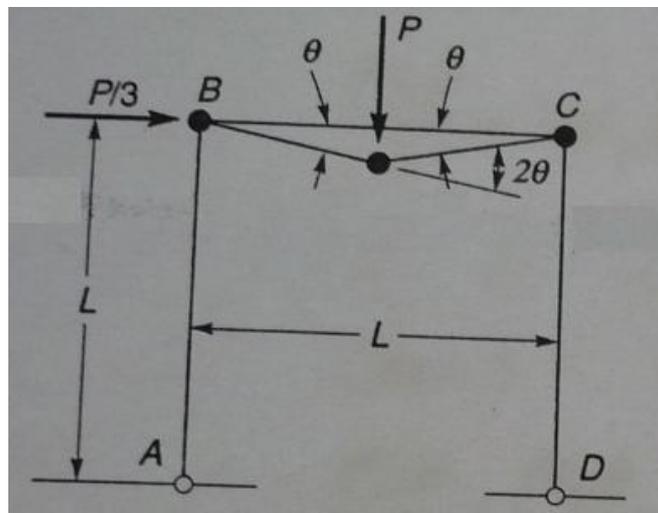


Figura 2.27 Mecanismo de viga*

Caso 2: Mecanismo de tablero, cuyo procedimiento se detalla en la siguiente ecuación y está especificado en la Figura 2.28:

$$\frac{PL\theta}{3} = 2M_p\theta \quad \Rightarrow \quad M_p = \frac{PL}{6} \quad (2.25)$$

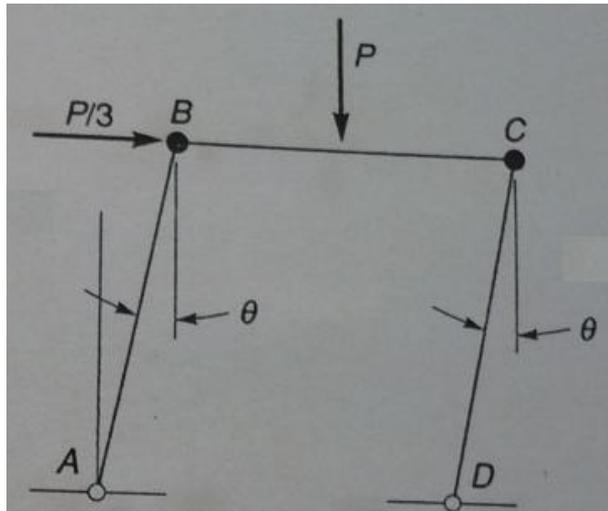


Figura 2.28 Mecanismo de tablero*

Caso 3: Mecanismo combinado, cuyo procedimiento se detalla en la siguiente ecuación y está especificado en la Figura 2.29:

$$\frac{PL\theta}{3} + \frac{PL\theta}{2} = M_p(2\theta + 2\theta) \quad \Rightarrow \quad M_p = \frac{5PL}{24} \quad (2.26)$$

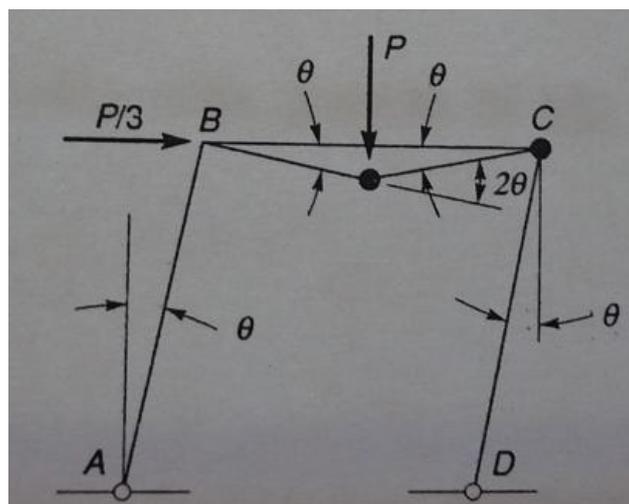


Figura 2.29 Mecanismo combinado*

* GALAMBOS T., LIN F., JOHNSTON B. Diseño de Estructuras de Acero con LRFD
 * GALAMBOS T., LIN F., JOHNSTON B. Diseño de Estructuras de Acero con LRFD

El valor más grande de M_p corresponde a la carga mínima para un M_p dado.

Una vez determinado el M_p se procederá a realizar el análisis independiente de cada columna utilizándolo para obtener la carga nominal según los procedimientos, por ejemplo los citados en la sección B del código de la AISC.

2.2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISMOS

2.2.3.1 Origen y propagación de los movimientos sísmicos

Los movimientos sísmicos pueden ser de origen volcánico o de origen tectónico. Aunque el origen de estos dos tipos de movimientos tiene una misma causa que es la actividad interna de la tierra, sólo los segundos han sido motivo de un análisis más profundo debido a la frecuencia con que se presentan y la cercana ubicación a centros urbanos importantes.

La hipótesis que explica de mejor manera la causa de los sismos es aquella que menciona las fallas geológicas. La tierra desde su formación presenta movimientos internos de convección entre el núcleo líquido, el cual para liberar su calor intenso produce contracciones o dilataciones radiales en el manto, formado por rocas sólidas, malas conductoras del calor, que soportan la corteza, y que al final terminan rompiéndose. La presión generada en las rocas después de la formación de la falla, produce fricciones en diferentes direcciones entre las caras de la grieta formada, almacenando gran cantidad de energía que se libera de manera repentina cuando el esfuerzo cortante vence el rozamiento. Esta energía que puede alcanzar los 10^{24} ergios produce movimiento en la corteza terrestre causando los sismos.

De esta manera los movimientos telúricos son resultado de la liberación repentina de energía acumulada en el manto (foco profundo, hasta 700 km), o en un lecho rocoso dentro de la corteza (foco superficial, hasta 70 km). El término foco se refiere al sitio de origen del sismo. El punto sobre la superficie más cercano al foco es llamado epicentro.

Para definir la forma de propagación de las ondas sísmicas se ha visto la necesidad de recurrir a modelos matemáticos ideales que simulen propiedades definidas para aplicar la teoría ondulatoria y experimentos científicos, difícil de explicar en un medio como el suelo con características particulares (heterogeneidad, anisotropía, plasticidad, etc.). Se puede considerar que la frecuencia y la forma de las ondas son una combinación de las diferentes frecuencias y modos naturales del suelo.

La energía se propaga en todas las direcciones a partir del foco en forma de ondas primarias o de dilatación (ondas P), que viajan en la dirección de propagación a unos 6 km/s, y ondas secundarias o cortantes (ondas S) que se desplazan perpendicularmente a la trayectoria de las primarias, son el doble de lentas pero cinco veces más intensas. Las primeras causan levantamiento y hundimiento del suelo y anticipan la llegada de las segundas que lo sacuden horizontalmente. Un esquema es mostrado en la Figura 2.30

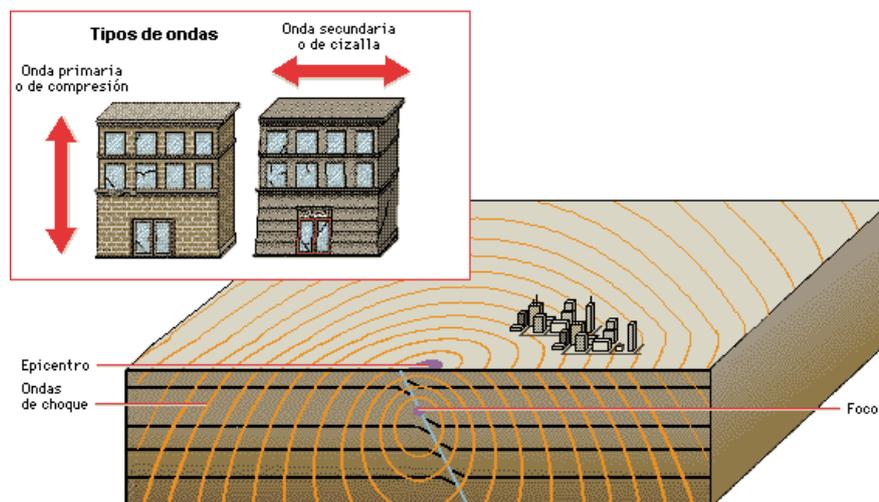


Figura 2.30 Propagación de las ondas sísmicas *

A lo largo de su trayectoria las ondas sufren transformaciones debido a la heterogeneidad y el choque en las diferentes capas del suelo lo que provoca reflexión, refracción, difracción en las ondas produciendo cambios importantes en el suelo como la licuefacción de los asentamientos. Incluso dichas ondas pueden ser guiadas por el suelo provocando ondas de Rayleigh, cuya amplitud

* Enciclopedia Microsoft Encarta 2006

y profundidad puede superar la de las primeras ondas. Estas ondas pierden energía al alejarse del foco debido a la amortiguación del suelo. El movimiento del suelo tiene tres componentes para efectos de diseño: una norte – sur (N-S), otra este – oeste (E-W) y otra vertical (que no se toma en cuenta en esta investigación).

2.2.3.2 Medición de los movimientos sísmicos

Para determinar la cantidad de energía liberada en un sismo y describirlo de forma cuantitativa se utilizan la intensidad y la magnitud. “Intensidad es la medida relativa que indica el grado en el cual los efectos de un sismo se notan en un lugar”¹. La intensidad disminuye a medida que aumenta la distancia del lugar al epicentro. Se ha encontrado la siguiente ecuación empírica:

$$I_R = 1.5 + 3.0 \log A_R \quad (2.27)$$

donde I_R es la intensidad y A_R es la aceleración de la tierra en cm/s^2 . Si se emplea la aceleración de la tierra en el epicentro se obtiene la intensidad máxima.

La Escala Modificada de Mercalli es otra manera de medir la intensidad de los sismos, y los clasifica en intensidades de 1 a 12, de acuerdo a una evaluación subjetiva de los daños causados, como se indica en la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Escala Modificada de Mercalli

Intensidad	Descripción de los efectos del sismo
I	Detectado únicamente por instrumentos sensibles
II	Algunas personas lo sienten mientras están en reposo, especialmente en los pisos superiores; objetos colgantes delicados se balancean.
III	Se sienten notoriamente adentro, pero no siempre se reconoce como un sismo; los carros parados se balancean un poco; la vibración parece la de un camión pasando cerca.
IV	Se siente adentro y afuera; de noche despierta a algunas

¹Estructuras Antisísmicas, Gabriel Estrada Uribe

	personas; los platos, ventanas y puertas se mueven; los carros se balancean notablemente.
V	Casi todos lo sienten; hay ruptura de platos, ventanas y mampostería; los objetos altos se caen.

Tabla 2.1 Escala Modificada de Mercalli (Continuación)

VI	Todos lo sienten; muchos se asustan y corren para afuera; se cae la mampostería y las chimeneas; daños menores.
VII	Todos corren para afuera; los daños varían según la calidad de la construcción; lo notan los conductores de automóvil.
VIII	Los muros se separan de los marcos de la estructura; caída de muros, monumentos y chimeneas; corre arena y barro; los conductores se distraen.
IX	Los edificios se salen de las fundaciones, se agrietan y se desploman; la tierra se abre, y las tuberías subterráneas se rompen.
X	La mayoría de las estructuras de ladrillo quedan destruidas; la tierra se abre, los rieles se doblan; ocurren deslizamientos.
XI	Las estructuras nuevas permanecen en pie; se destruyen los puentes; la tierra se abre; las tuberías se rompen; los rieles se doblan; ocurren deslizamientos.
XII	Destrucción total; se ven surcos en la tierra; líneas de visión y nivel distorsionadas; se lanzan objetos al aire.

Fuente: Estructuras Antisísmicas, Gabriel Estrada Uribe

“La magnitud, en cambio es una medida absoluta que indica la cantidad de energía liberada por el foco, definiendo así, los movimientos sísmicos, independientemente de la localidad”². Para clasificar los sismos según su magnitud se utiliza la escala de Richter para lo cual se utiliza la siguiente fórmula empírica:

$$M_R = 2.2 + 1.8 \log A_R \quad (2.28)$$

² Estructuras Antisísmicas, Gabriel Estrada Uribe

donde M_R es la magnitud sísmica en escala de Richter y A_R es la aceleración de la tierra en el epicentro en cm/s^2 . En teoría la escala Richter no tiene cota máxima pero la tecnología ha logrado establecer un límite práctico de 9.5.

De la magnitud sísmica se puede determinar la cantidad de energía liberada mediante la siguiente ecuación:

$$\log E_R = 11.8 + 1.5M_R \quad (2.29)$$

donde E_R es la energía liberada en ergios y M_R es la magnitud sísmica en la escala de Richter. Se puede observar que para una magnitud de 7, por ejemplo, la energía liberada es de 10^{22} ergios.

El sismógrafo es un instrumento que detecta las ondas producidas por los sismos y las graba en gráficas en las que se puede estimar la aceleración, velocidad y desplazamiento de la tierra. Este aparato consiste en un oscilador simple amortiguado como el indicado en la Figura 2.31, a cuya masa va unida una pluma que traza sobre una cinta de papel la respuesta del sistema al movimiento sísmico aplicado en la base.

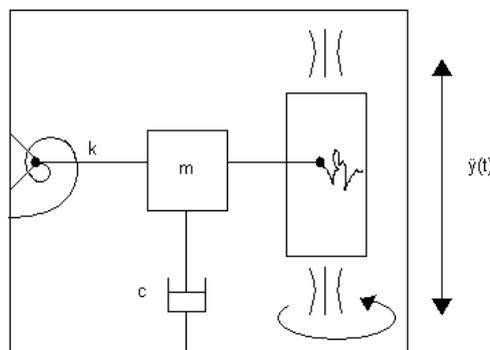


Figura 2.31 Esquema de un sismógrafo

Para este caso la ecuación del movimiento es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{y}(t) \quad (2.30)$$

siendo u el desplazamiento relativo de la masa al soporte, m la masa, c el coeficiente de amortiguamiento, k la constante elástica y $\ddot{y}(t)$ la aceleración de la tierra.

Para bajas frecuencias naturales del sistema en comparación con las de excitación el instrumento sigue fielmente el desplazamiento de la tierra, por lo tanto, se le denomina vibrómetro. Al contrario, si la frecuencia del instrumento es alta en relación con la del sismo el desplazamiento de la pluma es proporcional a la aceleración de la tierra. En este caso el instrumento se denomina acelerómetro.

Deben cumplirse ciertas condiciones para que el instrumento pueda representar con claridad el movimiento sísmico: La relación de amortiguamiento debe estar alrededor del 70% de la amortiguación crítica para poder expandir el rango de frecuencias sísmicas y asegurar la fidelidad del acelerograma en movimientos telúricos de diferentes frecuencias. La sensibilidad o la amplitud de la escala deben ser suficientes para poder observar los picos de aceleración. Generalmente un sismógrafo tiene tres acelerómetros independientes que se registran sobre una misma cinta generalmente magnética para usos posteriores.

En la Figura 2.32 se observan las gráficas de desplazamiento, velocidad y aceleración de la componente N-S del sismo registrado en El Centro, California, el 18 de mayo de 1940, uno de los más severos hasta ahora grabados: $\ddot{y} = 0.32g$ (la aceleración se suele dar como porcentaje de la gravedad g) y que es uno de los más estudiados en ingeniería sísmica. Basta con obtener una sola de las gráficas, ya que las otras dos están relacionadas matemáticamente. Existe menos margen de error si se obtienen las áreas bajo las curvas que midiendo las pendientes en cada punto, por lo que, siendo preferible integrar que derivar se registra comúnmente la aceleración de la tierra.

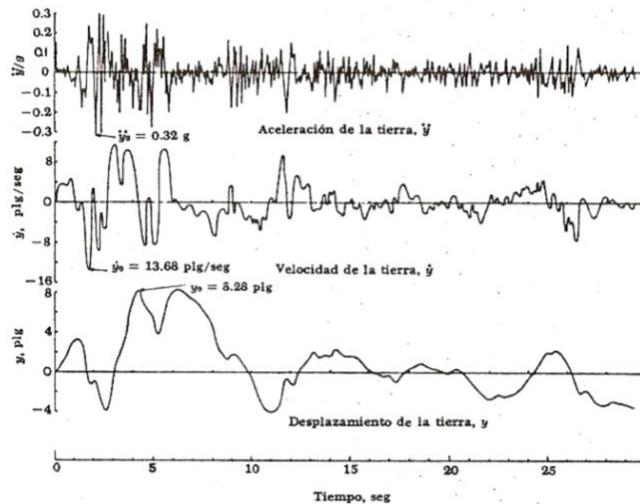


Figura 2.32 Componente N-S, sismo “El Centro”, California*

Estos datos registrados u obtenidos tiene mucha importancia: la aceleración se emplea, directa o indirectamente (a través de espectros) en el análisis dinámico; la velocidad máxima está relacionada con la destrucción causada; y el desplazamiento, indica las deformaciones que pueden sufrir las estructuras, especialmente si son de gran longitud.

Al observar un acelerograma se debe tomar en cuenta, además de los picos de las aceleraciones, el área debajo de éste, que indica la velocidad correspondiente o la severidad del mismo. También se deben revisar las frecuencias y la duración del sismo en las diferentes componentes.

2.2.3.3 Espectrografía sísmica

Los sismólogos pueden encontrar de gran utilidad el acelerograma de la Figura 2.32, pero los ingenieros no ven una idea clara del poder destructor del terremoto, ni pueden utilizarlo como instrumento de análisis en una estructura. Para este objetivo el espectro es de gran importancia ya que provee de aproximaciones prácticas para la dinámica estructural.

Se puede definir espectro, en la parte sísmica, como el lugar geométrico de las respuestas máximas (expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, o cualquier otro parámetro de interés) que produce un movimiento telúrico en una estructura simple u oscilador

* URIBE G. Estructuras Antisísmicas

de un grado de libertad. En estos gráficos, se representa en abscisas el periodo fundamental de la estructura (o la frecuencia) y en ordenadas la respuesta máxima calculada para distintos factores de amortiguamiento ξ .

El procedimiento de construcción de un espectro de respuesta se puede explicar de la siguiente manera: se somete a una serie de estructuras de un grado de libertad u osciladores simples con diferentes periodos de vibración, T , y con igual factor de amortiguamiento, ξ como se indica en la Figura 2.33, a la acción de un mismo movimiento sísmico (utilizando un registro de aceleraciones, $\ddot{u}_g(t)$), cada uno de ellos exhibirá una respuesta diferente, la cual puede representarse en función de la variación de los desplazamientos $u(t)$. Ya calculada la respuesta de los osciladores es posible determinar el máximo (en valor absoluto, dado que el signo no tiene importancia) de cada uno de ellos y representarlos en un gráfico en función del periodo de vibración (o frecuencia), para obtener así un espectro de respuesta. Es decir, que la respuesta máxima de cada oscilador con periodo T representa un punto del espectro.

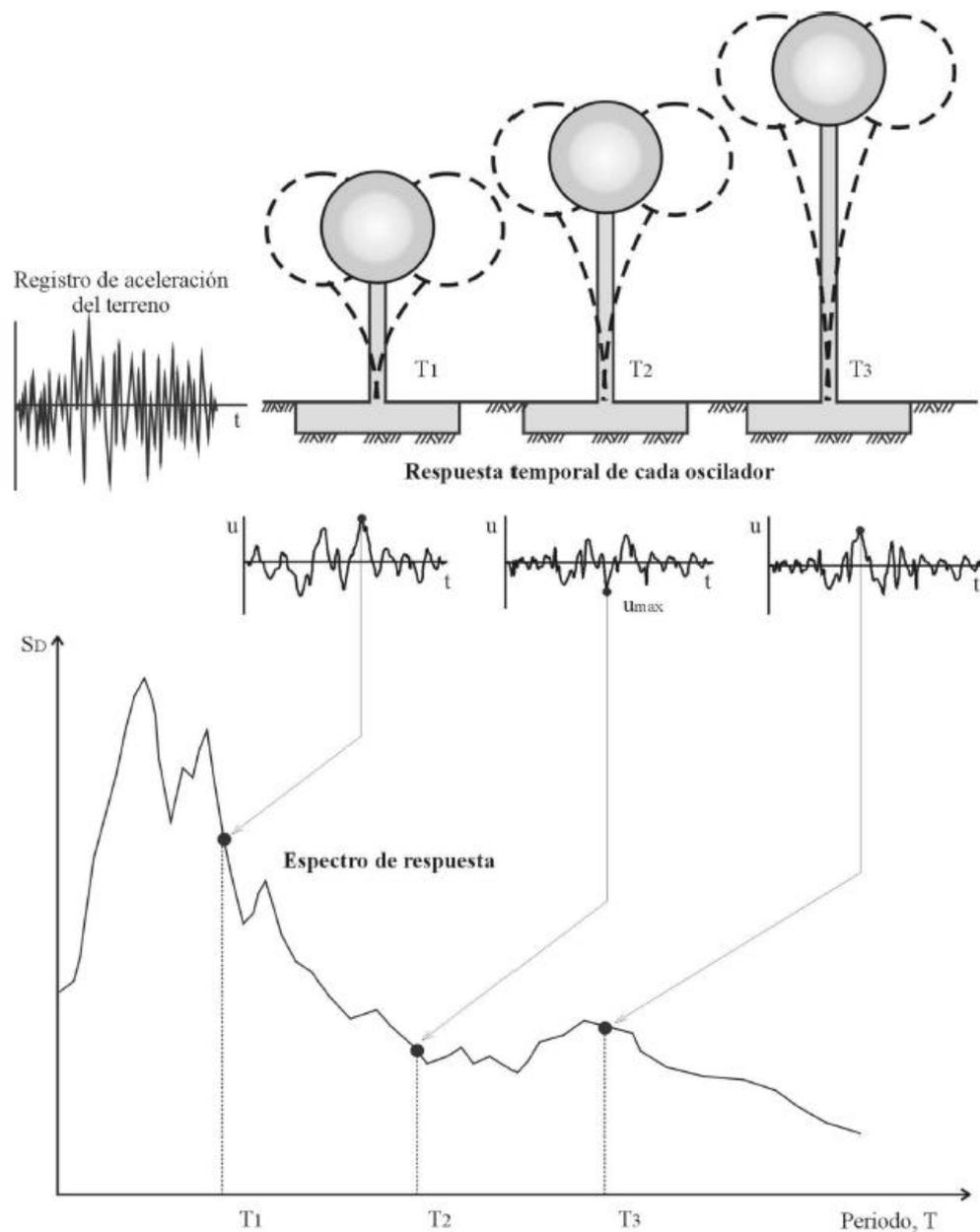


Figura 2.33 Método de determinación del espectro de respuesta *

Los espectros se obtienen directamente de los acelerogramas medio de computadores digitales o analógicos en donde se simula un oscilador simple cuya respuesta a la excitación en la base está dada por la integral de convolución, variando la frecuencia fundamental del sistema o el período, se determinan las respuestas máximas u ordenadas del espectro. Esta operación se puede repetir par diferentes coeficientes de amortiguación ξ , generando así una familia de espectros. También se utilizan los sismocopios para marcar de manera directa los puntos sobre el espectro este aparato es parecido al sismógrafo.

* CRISAFULLI F., VILLAFÑE E. Espectros de Respuesta y Diseño

Las respuestas del sistema simple se pueden expresar en términos de la energía total, desplazamiento, velocidad, aceleración, etc., y diversas maneras dando lugar a distintas clases de espectros como lo indica la Figura 2.34. Si en el momento en que la energía cinética es cero (amplitud máxima), la energía de deformación, que es máxima, se expresa a la manera de energía cinética, se llega al espectro de pseudovelocidad. El prefijo pseudo es utilizado ya que la velocidad de la estructura o sistema V no tiene el mismo valor que la velocidad que se obtiene del sismo \dot{u} , en un registro de velocidad relativa.

Existe una relación matemática definida entre los valores del desplazamiento, D , la velocidad (o pseudovelocidad), V , y la aceleración (o pseudoaceleración) A , del sistema simple:

$$A = \ddot{x}_{m\acute{a}x} = -\omega^2 x_{m\acute{a}x} = -\omega^2 D \quad (2.31)$$

$$V = \dot{x}_{m\acute{a}x} = \omega x_{m\acute{a}x} = \omega D \quad (2.32)$$

donde ω es la frecuencia natural del sistema. Por esta razón se pueden expresar las escalas de aceleración (o pseudoaceleración) y desplazamiento en forma logarítmica dentro del mismo espectro de pseudovelocidad como el mostrado en la Figura 2.5. En algunos casos las escalas se suelen hacer adimensionales dividiéndolas por los valores máximos.

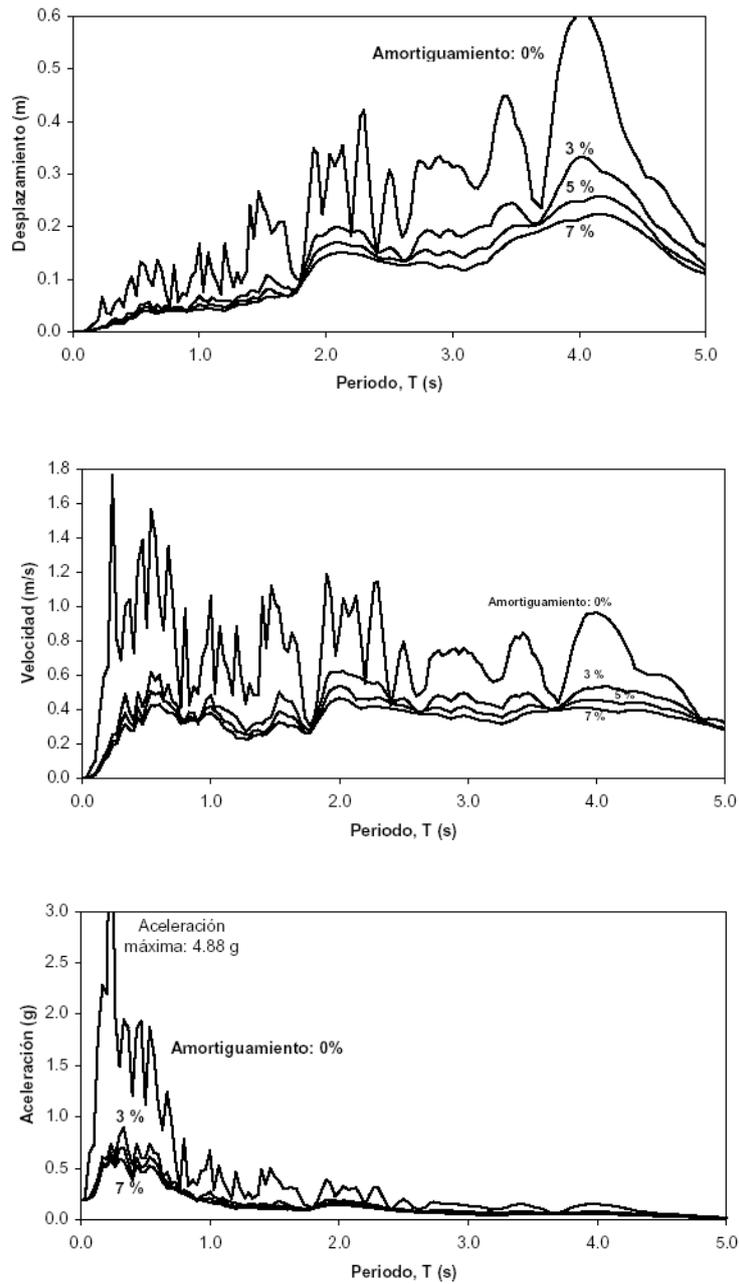


Figura 2.34 Espectros de respuesta para distintos factores de amortiguamiento*

Para realizar el análisis y diseño de estructuras se determinan los valores trazando, por los picos máximos del espectro, rectas paralelas a la dirección de las escalas, quedando el dominio del período (o frecuencia) dividido en tres regiones de valor constante: la de desplazamiento, la de velocidad y la de aceleración (Figura 2.35).

* CRISAFULLI F., VILLAFANE E. Espectros de Respuesta y Diseño

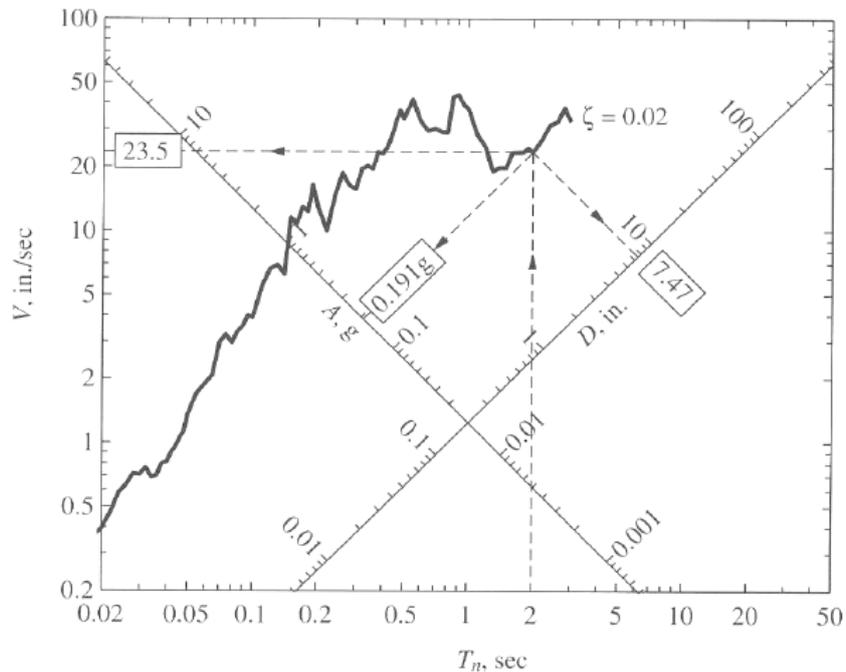


Figura 2.35 Valores espectrales en la representación combinada *

Los tres espectros proveen directamente cantidades físicas significativas, es por esta razón que son necesarios: el espectro de deformación provee la deformación máxima del sistema; el espectro de pseudo velocidad está relacionado directamente con la energía máxima almacenada en el sistema durante un sismo; el espectro de pseudo aceleración está relacionado directamente con el valor máximo de la fuerza estática equivalente y el cortante basal.

El valor de la aceleración (o pseudoaceleración) máxima se obtiene cuando la estructura es muy rígida (cuando el período fundamental tiende a ser nulo), y los valores máximos de velocidad y desplazamiento máximos se obtienen en estructuras flexibles (cuando el período fundamental tiende a ser muy grande).

Entre los espectros más comunes utilizados para el diseño se tiene los espectros de respuesta elástica, que son los más utilizados en el análisis estructural; los de respuesta inelástica, que presentan un comportamiento no lineal, es decir que la estructura se deforma plásticamente; y el espectro de diseño, que incluye curvas suavizadas de los dos métodos anteriores y son obtenidos de manera estadística en una zona determinada.

El espectro de diseño debe ser representativo de movimientos del suelo registrados en el sitio durante sismos pasados, si no existen registros sísmicos

* CRISAFULLI F., VILLAFÑE E. Espectros de Respuesta y Diseño

en el lugar entonces el espectro de diseño se debe basar en movimientos del suelo registrados en otros sitios bajo condiciones similares. Los factores que influyen en esta selección son: la magnitud del sismo, la distancia del sitio a la falla sísmica, el mecanismo de falla, la geología presente en la trayectoria del viaje de las ondas sísmicas y las condiciones locales del suelo en el sitio.

Existen procedimientos para la realización de los espectros de diseño que consideran los factores antes mencionados, especificados en normas de construcción, y que servirán para simular los efectos de un sismo posteriormente.

2.2.4 CRITERIOS DE DISEÑO PARA CARGAS SÍSMICAS

2.2.4.1 Consideraciones de diseño para estructuras antisísmicas

Entre las teorías y métodos de diseño y construcción de estructura se tiene aquellos que dicen que la mayor rigidez de las estructuras soporta mejor los movimientos sísmicos y conservan su integridad; otros sostienen que una estructura flexible, aunque se deforme notoriamente, deja actuar la energía del sismo sin oponer resistencia. Ciertamente la estructura debe ser lo suficientemente fuerte para evitar el colapso, pero razonablemente dúctil para que disipe, en deformaciones plásticas, parte de la energía sísmica absorbida.

La forma del edificio, tamaño, naturaleza y localización de los elementos resistentes, es decir: muros, columnas, pisos, núcleos de servicio, escaleras; y elementos no estructurales como: cantidad y tipo de divisiones interiores, la forma en que los muros exteriores se disponen sólidos o con aberturas para iluminación natural y ventilación; es a lo que se denomina configuración. Predominan también: geometría, geología y clima del lugar de construcción, reglamentos de diseño urbano y aspectos arquitectónicos de estilo.

Estas decisiones arquitectónicas, tal como se ha podido observar en las edificaciones dañadas por los efectos de los terremotos, unidas a decisiones de diseño estructural y a las técnicas constructivas influyen determinantemente en el comportamiento sísmico resistente de las edificaciones. Una adecuada selección del sistema estructural, del material y de los componentes no estructurales es de mayor importancia que un análisis complejo.

Se pueden considerar otros factores de importancia dentro del diseño antisísmico:

- **Configuración:** se analiza si una estructura es regular o posee irregularidades (discontinuidades físicas), tanto en planta como en elevación. Si una estructura posee irregularidades en masa, rigidez o simetría produce cargas torsionales difíciles de determinar.
- **Peso:** debido a que los sismos son cargas inerciales se debe diseñar la estructura con el menor peso posible. De esta manera se evitan los efectos $P - \Delta$, que son productos del pandeo de los elementos por la masa.
- **Hiperestaticidad:** cuando existe continuidad y monolitismo en una estructura se la puede determinar como hiperestática. Dicha estructura sin deformarse notablemente presenta regiones con deformación plástica que absorben gran cantidad de energía.
- **Columnas fuertes:** en edificios aporricados, se requiere que los miembros horizontales fallen antes que los miembros verticales para retrasar el colapso de una estructura.
- **Ornamentos:** se considera que un factor importante es la sujeción de los ornamentos y el área de la estructura en que se encuentran.
- **Efectos de primer piso:** el primer piso soporta todas las cargas de la estructura por lo que no sería de utilidad hacerlo más rígido sino capaz de amortiguar dichas cargas.

Posteriormente se analizarán distintos métodos de diseño de estructuras resistentes a los movimientos sísmicos, considerando un análisis enfocado a las cargas y deformaciones, analizado desde su estructura más simple, y otro donde se considerarán los efectos de la velocidad y aceleración en las estructuras.

2.2.4.2 Tipos de estructuras sismorresistentes

El sistema estructural obedece mayormente a circunstancias prácticas y económicas, que a la aplicación de teorías y fórmulas. Existen, sin embargo, algunos tipos de estructuras que se desempeñan mejor en las eventualidades

sísmicas, que otras. Algunos de ellos se detallan a continuación y se muestran en la Figura 2.36:

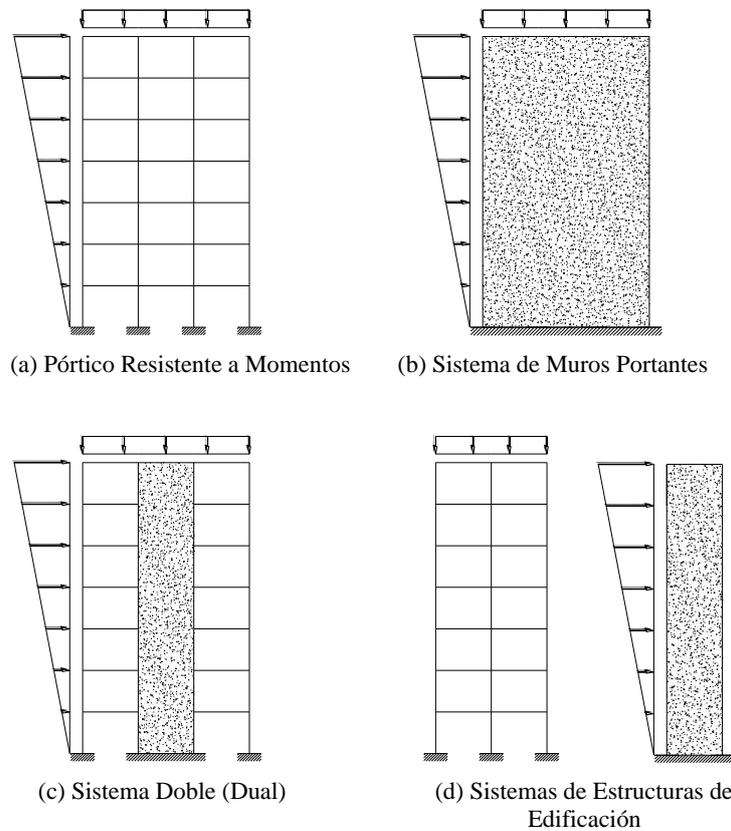


Figura 2.36 Estructuras sismorresistentes*

- **Sistema de muros portantes:** es un sistema estructural sin soporte de cargas verticales. Los muros de carga o sistemas de arriostramiento proporcionan el soporte a la mayoría de cargas gravitacionales. Los muros de cortante o estructuras arriostradas proporcionan la resistencia a fuerzas laterales.
- **Sistema de estructuras de edificación:** es un sistema estructural con una estructura espacial esencialmente completa que soporta las cargas gravitacionales. La resistencia lateral la proporcionan los muros de corte o estructuras arriostradas que no son parte de un sistema dual.

* www.gueandpartners.com.my

- **Sistema de Pórtico resistente a momentos:** la estructura espacial soporta las cargas gravitacionales. La resistencia a las cargas laterales está dada por la deformación de sus elementos.
- **Sistema dual:** la estructura espacial soporta las cargas gravitacionales, los pórticos, muros de corte o arriostramientos soportan las cargas laterales y deben diseñarse para soportar el cortante basal máximo en función de sus rigideces.

2.2.5 ANÁLISIS ESTÁTICO

2.2.5.1 Diseño por factores de carga y resistencia (método LRFD)

En el presente estudio no es necesario realizar un procedimiento de diseño, sin embargo es necesario conocer como afectan las cargas sísmicas a la demanda de cada uno de los elementos de la estructura.

Cuando se realiza un diseño basado en los factores de carga y resistencia se utiliza el concepto de los estados límite, este describe una condición en la que una estructura deja de cumplir la función para la que fue destinada.

Se tiene dos tipos de estado límite: los de resistencia que se basan en la seguridad o capacidad de carga de las estructuras e incluyen resistencias plásticas, de pandeo, de fractura, de fatiga, de volteo, etc.; y de servicio que se refieren al comportamiento de las estructuras bajo cargas normales de servicio y tiene que ver con aspectos asociados con el uso y ocupación, tales como rotación, deslizamientos, vibraciones, etc.

Las estructuras deben ser capaces de resistir las cargas de diseño, para las que se establecen parámetros de cálculo, y las cargas de servicio, para las que se tiene un poco más de criterio.

Según la Norma AISC – LRFD el diseño debe cumplir la siguiente ecuación:

$$R_U \leq \phi R_n \quad (2.33)$$

donde R_U es la resistencia última requerida (y obtenida con los factores de carga según LRFD y las cargas reales), R_n es la resistencia nominal obtenida en los análisis de carga (secciones B a la K de la Norma AISC LRFD), ϕ es el factor de diseño. ϕR_n es la resistencia de diseño.

El objetivo de utilizar los factores de carga es incrementar las cargas reales para tomar en cuenta las incertidumbres implicadas al estimar las magnitudes de las cargas vivas, muertas y accidentales durante la vida útil de la estructura.

Entre las combinaciones de carga más importantes citadas en la Norma AISC – LRFD se tiene:

$$\begin{aligned}
 U &= 1.4D \\
 U &= 1.2D + 1.6L + 0.5(Lr \text{ ó } S \text{ ó } R) \\
 U &= 1.2D + 1.6(Lr \text{ ó } S \text{ ó } R) + (0.5L \text{ ó } 0.8W) \\
 U &= 1.2D + 1.3W + 0.5L + 0.5(Lr \text{ ó } S \text{ ó } R) \\
 U &= 1.2D + 1.5E + (0.5L \text{ ó } 0.2S) \\
 U &= 0.9D - (1.3W \text{ ó } 1.5E)
 \end{aligned}
 \tag{2.34}$$

donde U representa la carga última, D son las cargas muertas, L son las cargas vivas; Lr son las cargas vivas en techos, S son las cargas de nieve, R son las cargas por lluvia, granizo o hielo, W son las cargas de viento y E son las cargas sísmicas que nos importan en esta investigación.

De las combinaciones de carga citadas, se utilizó aquella con la que se obtenga la mayor carga última, o aquella que nos importe para el análisis. Con dicha carga se puede obtener la resistencia última requerida R_U de manera directa utilizando diferentes métodos para determinarla.

Los factores de resistencia son utilizados para estimar la resistencia última de una estructura. Para esto se deben tomar en cuenta las incertidumbres que se tiene en la resistencia de los materiales, en las dimensiones, en la mano de obra, en el diseño, etc. Algunos factores de resistencia se indican en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Factores de resistencia característicos

Situación	ϕ
Aplastamiento en áreas proyectantes de pasadores, fluencia del alma bajo cargas concentradas, cortante en tornillos en juntas tipo fricción.	1.00

Vigas sometidas a flexión, corte, filete de soldadura con esfuerzos paralelos al eje de soldadura, soldadura de ranura en el metal base.	0.90
Columnas, aplastamiento del alma, distancias al borde y capacidad de aplastamiento en agujeros.	0.85
Cortante en el área efectiva de soldaduras de ranura con penetración completa, tensión normal al área efectiva de soldadura de ranura con penetración parcial.	0.80
Tornillos a tensión, soldaduras de tapón o muescas, fractura en la sección neta de miembros a tensión.	0.75
Aplastamiento en tornillos (que no sean del tipo A307)	0.65
Aplastamiento en tornillos A307, aplastamiento en cimentaciones de hormigón.	0.60

Fuente: Manual of Steel Construction AISC - LRFD

El método LRFD es el más utilizado en los programas informáticos de análisis de estructuras metálicas ya que considera además distintas secciones, materiales y varias alternativas para entregar una respuesta fiable.

2.2.5.2 Procedimiento estático de cálculo de fuerzas

Para obtener las cargas laterales a la estructura producidas por el sismo (E) se puede utilizar métodos que hacen que esta carga tenga una naturaleza estática, y facilite su análisis.

El Código Ecuatoriano de la Construcción (CEC2000) nos dice que: “Para el cálculo de estructuras regulares tanto en planta como en elevación es suficiente la aplicación de procedimientos estáticos de determinación de fuerzas laterales. Para el caso de estructuras irregulares se utilizará el procedimiento de cálculo dinámico. También pueden utilizarse procedimientos alternativos de cálculo sísmico que tengan un adecuado fundamento basado en los principios establecidos por la dinámica de estructuras, llevados a cabo por profesionales especializados. Sin embargo, para todas las estructuras la aplicación del método estático, propuesto por éste código, se considerará como requisito mínimo”³.

También se puede tomar en cuenta otras consideraciones presentadas en la normas de la ASCE y UBC ya que el CEC utiliza ciertos procedimientos de cálculo propuestos en estas normas.

³ Código Ecuatoriano de la Construcción 2002

El procedimiento básico de cálculo se basa en determinar la fuerza lateral equivalente o cortante basal. De forma general para todos los códigos de diseño el cortante basal se puede definir como:

$$V = S_s W \quad (2.35)$$

Donde S_s es la respuesta de aceleración en la estructura obtenida según características propias de ésta (como amortiguamiento y período fundamental) y W es el peso para cargas sísmicas que depende del tipo de código utilizado.

En el CEC, el cortante basal de diseño está dado por las siguientes expresiones:

$$V = \frac{ZIC}{R\phi_p\phi_E} W \quad (2.36)$$

$$C = \frac{1.25S^S}{T} \quad (2.37)$$

donde C es el coeficiente de respuesta sísmica de la estructura y no debe exceder el valor de C_m indicado en la Tabla 2.3 y no debe ser menor a 0.5. S indica las condiciones del suelo indicadas en la Tabla 2.3. R es el factor de reducción de respuesta estructural que indica la disipación de energía y depende del tipo de estructura que se indica en la Tabla 2.4. ϕ_p y ϕ_E son coeficientes de configuración estructural en planta y elevación para edificios que dependen de las irregularidades.

Tabla 2.3 Coeficiente de suelo S y Coeficiente Cm

Perfil tipo	Descripción	S	Cm
S1	Roca o suelo firme	1.0	2.5
S2	Suelos intermedios	1.2	3.0
S3	Suelos blandos y estrato profundo	1.5	2.8
S4	Condiciones especiales de suelo	2.0	2.5

Fuente: Código Ecuatoriano de la Construcción

Tabla 2.4 Factor de reducción de respuesta estructural

Sistema estructural	R
Sistemas de pórticos espaciales sismo-resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas o de acero laminado en caliente, con muros estructurales de hormigón armado(sistemas duales).	12
Sistemas de pórticos espaciales sismo-resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas o de acero laminado en caliente.	10
Sistemas de pórticos espaciales sismo-resistentes, de hormigón armado con vigas banda y muros estructurales de hormigón armado(sistemas duales).	10

Sistemas de pórticos espaciales sismo-resistentes, de hormigón armado con vigas descolgadas y diagonales rigidizadoras.	10
---	----

Tabla 2.4 Factor de reducción de respuesta estructural (Continuación)

Sistemas de pórticos espaciales sismo-resistentes de hormigón armado con vigas banda y diagonales rigidizadoras.	9
Sistemas de pórticos espaciales sismo-resistentes de hormigón armado con vigas banda.	8
Estructuras de acero con elementos armados de placas o con elementos de acero conformados en frío. Estructuras de aluminio.	7
Estructuras de madera	7
Estructura de mampostería reforzada o confinada	5
Estructuras con muros portantes de tierra reforzada o confinada	3
Reservorios y depósitos, incluidos tanques y esferas, soportadas mediante columnas o soportes arriostrados o no arriostrados.	3
Silos de hormigón fundido en sitio y chimeneas que poseen paredes continuas desde la cimentación.	5
Estructuras tipo cantiliver tales como chimeneas, silos y depósitos apoyados en sus bordes.	4
Torres en celosía (autoportantes o atirantadas)	4
Estructuras en forma de péndulo invertido	3
Torres de enfriamiento	5
Depósitos elevados soportados por un pila o por apoyos no arriostrados	4
Letreros y carteleras	5
Estructuras para vallas publicitarias y monumentos	3
Otras estructuras no descritas en este código	3

Fuente: Código Ecuatoriano de la Construcción

T es el período de vibración equivalente a la primera frecuencia natural y puede ser obtenido mediante la siguiente fórmula:

$$T = C_i (h_n)^{3/4} \quad (2.38)$$

donde h_n es la altura máxima del edificio de n pisos medida desde el piso (en pies), y C_i es un factor que varía según el tipo de pórtico.

También puede ser obtenido mediante la expresión:

$$T = 2\pi \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n w_i \delta_i^2 \right)}{\left(g \sum_{i=1}^n f_i \delta_i \right)} \right]^{1/3} \quad (2.39)$$

donde f_i representa la distribución de las fuerzas laterales, y δ_i es la deflexión elástica del piso i . Otra forma es obtenerlo mediante un análisis modal, fácilmente realizado mediante un software especializado.

Z es la zona sísmica que indica un factor según la zona sísmica (0.15 para la zona I, 0.25 para la II, 0.3 para la III y 0.4 para la zona IV) especificadas en el Código Ecuatoriano de la Construcción.

La carga reactiva de la estructura para el CEC es la carga muerta total más el 10% de peso de particiones y más el 25% de la carga viva para bodegas. I indica la importancia de la estructura y se elige según la Tabla 2.5

Tabla 2.5 Factor de importancia

Categoría	Tipo de uso, destino e importancia	Factor
Edificaciones esenciales y/o peligrosas	Hospitales, clínicas, centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación, transmisión y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas.	1.5
Estructuras de ocupación especial	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas personas. Todas las estructuras que albergan más de cinco mil personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente	1.3

Tabla 2.5 Factor de importancia (Continuación)

Otras estructuras	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores	1.0
-------------------	--	-----

Fuente: Código Ecuatoriano de la Construcción

Para evitar la utilización de procedimientos dinámicos complicados, la distribución de las fuerzas laterales se determina según las expresiones:

$$V = F_t + \sum_{i=1}^n F_i \quad (2.40)$$

$$F_t = 0.07TV \quad (2.41)$$

donde T es el período calculado para el cortante basal y F_t es la fuerza concentrada en la parte más alta del edificio, adicional a la del último piso.

$$F_x = \frac{(V - F_t)w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (2.42)$$

siendo F_x la fuerza en el nivel x , y w_i es una fracción del peso total W ya que es el peso asignado a cada nivel.

En el código se detalla el cálculo de otras reacciones sísmicas como momentos y fuerzas verticales que pueden ser despreciables para el análisis realizado en esta investigación. Un detalle importante es el establecimiento de límites para desplazamientos y reacciones.

2.2.6 ANÁLISIS DINÁMICO

2.2.6.1 Respuesta dinámica

La utilización de la distribución de fuerzas cortantes para cada piso obtenidas con un solo procedimiento puede ser diferente para otras estructuras y para otros códigos, en donde es necesario realizar un análisis de sus limitaciones. El objetivo de un cálculo dinámico es predecir el comportamiento de dichas estructuras para las cuales no es posible aplicar conceptos generales.

Las cargas gravitatorias que actúan sobre la estructura son fuerzas estáticas, por lo tanto son independientes del tiempo. Las cargas sísmicas son fuerzas dinámicas que dependen del tiempo ya que las vibraciones del suelo son variables.

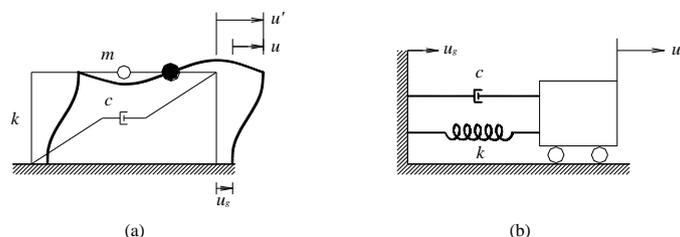


Figura 2.37 Sistema simple de un grado de libertad*

* www.gueandpartners.com.my

La ecuación de movimiento de un sistema simple como el de la Figura 2.37 sujeto a una aceleración del suelo $\ddot{u}_g(t)$ es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2.43)$$

donde m es la masa, c el coeficiente de amortiguamiento y k la constante elástica de sistema. Dividiendo para la masa se obtiene:

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = -\ddot{u}_g(t) \quad (2.44)$$

donde ω_n es la frecuencia natural del sistema y ξ es la relación de amortiguamiento.

La aceleración del suelo durante un sismo varía irregularmente, por esta razón se debe realizar un análisis numérico debido a que una solución analítica es muy compleja.

El vibrador elástico de un grado de libertad permite aplicar de manera sencilla las ecuaciones de equilibrio o de conservación de la energía. La aplicación de este modelo es fiel dentro de la ingeniería mecánica para estructuras metálicas reales, pero no aplica en el campo de las construcciones civiles.

La ecuación matricial para un sistema de varios grados de libertad es:

$$\{M\} \cdot [\ddot{U}] + \{C\} \cdot [\dot{U}] + \{K\}[U] = \{p(t)\} \quad (2.45)$$

donde $\{M\}$ es la matriz de masa (matriz de componentes diagonales), $\{C\}$ es la matriz de amortiguamiento (que para el efecto es mejor utilizar la relación de amortiguamiento ξ), $\{K\}$ es la matriz de rigidez (que no es invertible) y $\{p(t)\}$ la matriz de la fuerza efectiva de respuesta del sistema igual a $m\ddot{u}_g(t)$. El orden de estas matrices cuadradas depende del número de grados de libertad al igual que el de los vectores lineales dependientes de $[U]$.

El análisis modal consiste en obtener la respuesta dinámica por separado para cada modo considerando la estructura como simple de un solo grado de libertad. La respuesta máxima es una combinación estadística de todas las respuestas máximas obtenidas de manera separada. Este análisis puede realizarse con métodos matriciales, numéricos o iterativos.

Una variante distinta del estudio dinámico de vibradores con uno o varios grados de libertad es el análisis dinámico por integración directa de las ecuaciones de movimiento. Este método permite obtener directamente la respuesta del modelo para cualquier tipo de excitación, no sólo excitaciones armónicas.

Pero sólo cuando la excitación es armónica esta respuesta se puede obtener en forma cerrada. En el caso de excitaciones cualesquiera casi la única solución práctica es el análisis numérico utilizando computadoras (Figura 2.38).

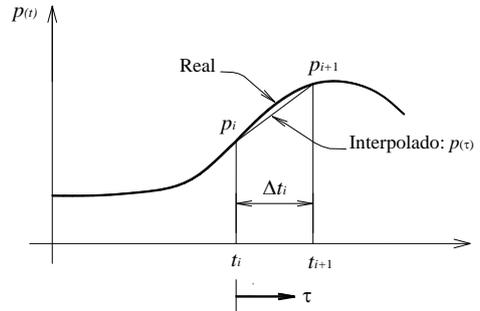


Figura 2.38 Interpolación lineal*

La función es aproximada a una serie de líneas rectas mediante una interpolación lineal. Para un intervalo de tiempo $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ la función de excitación está dada por:

$$p(x) = p_i + \frac{\Delta p_i}{\Delta t_i} \tau \quad (2.46)$$

donde

$$\Delta p_i = p_{i+1} - p_i \quad (2.47)$$

La ecuación a ser resuelta es (simplificada para un sistema sin amortiguamiento):

$$m\ddot{u} + ku = p_i + \frac{\Delta p_i}{\Delta t_i} \tau \quad (2.48)$$

Debido a la constante variación de la aceleración del suelo es necesario utilizar el análisis dinámico, modal o de integración directa, como un análisis histórico o paso a paso en el tiempo. Este constituye un análisis de la respuesta dinámica de la estructura en cada incremento de tiempo, cuando la base de la misma está sujeta a un acelerograma específico. Este acelerograma debe contener registros aceptados por las normas y que reflejen un comportamiento estadístico de los sismos anteriores. Como se pudo observar el acelerograma más utilizado es del sismo de El Centro que será detallado posteriormente.

2.2.6.2 Análisis espectral

* www.gueandpartners.com.my

Se puede observar también la utilización del análisis dinámico espectral que constituye un análisis dinámico elástico de la estructura. Las respuestas máximas en aceleración son calculadas utilizando las ordenadas de un espectro de respuesta apropiado, que corresponden a los períodos de los modos de vibración. Según el período fundamental de la estructura se obtiene una aceleración de respuesta que indica como reacciona la estructura ante un sismo.

El espectro de respuesta normalizado para el Código Ecuatoriano de la Construcción se encuentra detallado en la Figura 2.39, “es un espectro de respuesta elástico suavizado y obtenido para un sitio específico, basado en la geología, tectónica, sismología y características del suelo local”⁴. Los valores indicados se calculan utilizando el procedimiento de cálculo de fuerza lateral equivalente detallado en la sección 2.2.5.2.

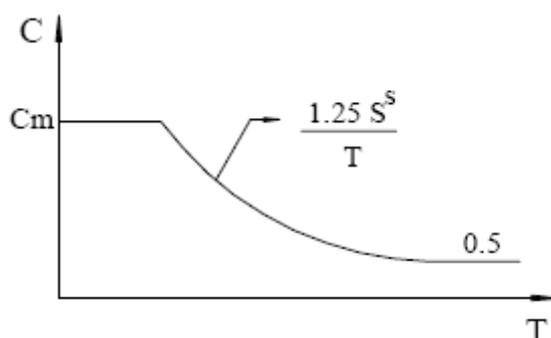


Figura 2.39 Espectro sísmico elástico utilizado*

El espectro de respuesta normalizado para el CEC consiste en un espectro de diseño, basado en la respuesta de distintas edificaciones o estructuras obtenida de manera estadística. La relación de amortiguamiento que se asume para aplicar este espectro de diseño es $\xi = 5\%$ que es normalmente utilizado para edificaciones de concreto.

2.2.6.3 Consideraciones energéticas para el diseño antisísmico

En algunos casos se propone utilizar el concepto de energía como herramienta para determinar el comportamiento y la respuesta de una estructura ante

⁴ * Código Ecuatoriano de la Construcción 2002

cargas dinámicas. Debido a que la ecuación de equilibrio dinámico está planteada en función de fuerzas, éstas se multiplican por el desplazamiento du , expresado como $\dot{u}dt$, que es una función de la velocidad, para encontrar el trabajo realizado. Al integrar la ecuación resultante respecto al tiempo de aplicación de la carga sísmica se obtiene la ecuación de balance de energía desarrollado en el sistema estructural:

$$E_K + E_D + E_S = E_I \quad (2.49)$$

Donde:

$$E_K = \int m\dot{u}du = \frac{m\dot{u}^2}{2} \quad (2.50)$$

es la energía cinética de la masa m ;

$$E_D = \int c\dot{x}du = \int c\dot{x}^2 dt \quad (2.51)$$

es la energía disipada por el amortiguamiento inherente de la estructura;

$$E_S = \int kudu = \frac{ku^2}{2} \quad (2.52)$$

es la energía de deformación elástica del sistema; E_I es la energía impuesta por las cargas dinámicas que para el caso serían las cargas sísmicas expresadas como:

$$E_S = -\int m\ddot{u}_g(t)dx \quad (2.53)$$

En el caso de que el sistema alcance a responder en el rango inelástico de los materiales, en el término E_S se debe incluir la participación de la estructura dentro del rango elástico y del inelástico. Esto se logra introduciendo la función $f_s(u)$ que incluye la respuesta elástica y la inelástica histerética en el cálculo de la energía total proporcionada por la estructura, así se tiene:

$$E_S = \int f_s(u)du = E_{Ss} + E_{Sp} \quad (2.54)$$

donde E_{Sp} es la energía disipada por efectos histeréticos en la deformación plástica y daños en los elementos estructurales, y el término E_{Ss} es la energía de deformación elástica no disipada. La relación entre estas dos energías se muestra en la Figura 2.40.

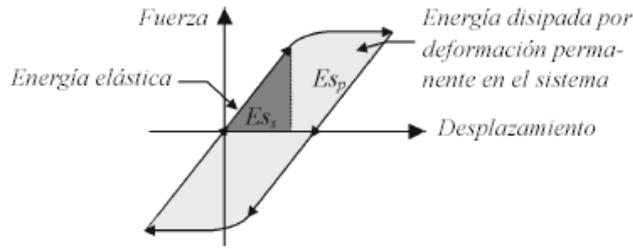


Figura 2.40 Ciclo de histéresis en un sistema estructural*

Cuando se utilizan dispositivos especiales disipadores o amortiguadores de energía (dependientes de la velocidad, la deformación o la aceleración), se debe introducir un término a la ecuación (2.49) que permita distinguir la participación de estos dispositivos en el balance de la energía. Este término se identifica como E_p y se calcula por medio del operador integro diferenciación de la disipación de la energía proporcionada por dispositivos adicionales:

$$E_p = \int \Gamma \bar{u} du \quad (2.55)$$

Estos valores varían según el sistema utilizado que pueden ser viscosos, plástico rígidos, elasto plásticos, visco plástico y elasto visco plásticos. Luego se analizará la clasificación de estos dispositivos según su función. Sus características pueden ser obtenidas de las diferentes curvas histeréticas. Un ejemplo se muestra en la Figura 2.41.

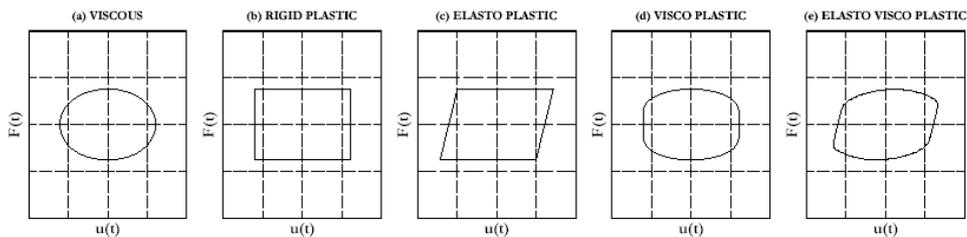


Figura 2.41 Idealización de mecanismos de disipación de energía sísmica*

Este término se suma a la ecuación del balance de la energía obteniendo así:

$$E_K + E_D + E_{S_p} + E_{S_s} + E_p = E_I \quad (2.56)$$

2.2.6.4 Técnicas de control de la energía sísmica

* OVIEDO J. A., DUQUE M. P. Sistemas de Control de Respuesta Sísmica en Edificaciones

* CASAROTTI CH. Bridge Isolation and Dissipation Devices

Tanto las técnicas convencionales, como las novedosas de control de respuesta sísmica tienen como objetivo aumentar la participación de los términos E_{sp} , energía disipada por histéresis propia de la estructura, y E_p , energía disipada por dispositivos adicionales. Debido al balance de la energía en la medida en que se disipe la energía por dispositivos adicionales, la disipación por histéresis de la estructura disminuye y la participación de los componentes estructurales es menor, el nivel de daño a la estructura se reduce y se concentra en los dispositivos adicionales, que son elementos identificados y fáciles de reemplazar.

Otra forma de disminuir la deformación plástica de la estructura consiste en modificar la energía de entrada al sistema, es decir el término E_I . Algunos sistemas de control de respuesta sísmica trabajan en este aspecto y se conocen con el término de aislamiento de base.

Las técnicas de control de respuesta sísmica se pueden clasificar según como el sistema maneja la energía impuesta por el sismo, su absorción o disipación. Se conocen como sistemas de disipación de energía aquellos que aportan al término E_p en el balance de energía y se conocen como sistemas aisladores aquellos que disminuyen la energía de entrada al sistema estructural, es decir el término E_I .

La clasificación como la mostrada en el cuadro sinóptico de la Figura 2.42 resume de mejor manera los sistemas de protección sísmica según sus características similares y la función que cumplen como elementos adicionales dentro de la estructura



Figura 2.42 Clasificación de los sistemas de protección sísmica *

* OVIEDO J. A., DUQUE M. P. Sistemas de Control de Respuesta Sísmica en Edificaciones

CAPÍTULO 3

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN AMORTIGUADOR TELESCÓPICO HIDRÁULICO

3.1 SELECCIÓN DE UN AMORTIGUADOR TIPO TELESCÓPICO HIDRÁULICO COMO ELEMENTO ADICIONAL DE UN PÓRTICO SOMETIDO A CARGAS SÍSMICAS

3.1.1 PROCEDIMIENTO DE SELECCIÓN DEL AMORTIGUADOR

3.1.1.1 Simulación y características preliminares

A pesar que en el presente estudio no se trata de diseñar una edificación en la que consten varios amortiguadores hidráulicos para obtener una respuesta específica de una estructura a una carga sísmica, se decidió adoptar un procedimiento de diseño basado en diferentes recomendaciones de dinámica estructural como las de Filiatrault (2003)⁵.

En estas recomendaciones se indica como primer paso realizar un análisis de la estructura original, es decir sin los amortiguadores. Para esto se debe adoptar un método que incluya la respuesta propia de la estructura y un análisis dinámico completo.

En lugar de analizar la estructura original de manera dinámica se seleccionaron dimensiones y disposiciones para un pórtico metálico, el cual va a ser analizado posteriormente conjuntamente con el amortiguador.

El comportamiento de este pórtico metálico ante cargas sísmicas fue simulado en SAP2000 de acuerdo a las características y criterios seleccionados que se especifican de manera más amplia en el Capítulo 4.

⁵ Bridge Isolation and Dissipation Devices, Chiara Casarotti

De acuerdo a esto se obtuvieron todos los resultados necesarios para poder emitir criterios de resistencia sísmica de un pórtico como son deformaciones, velocidades y aceleraciones relativas, reacciones y cargas.

Pero estos resultados no pueden dar una idea clara de cual sería el comportamiento del pórtico ante un eventual movimiento del suelo, por lo que se analizaron otros parámetros como la relación de amortiguamiento y la disipación de la energía sísmica, ya revisados en el Capítulo 3. Todos estos resultados serán detallados en los Capítulos 4 y 5.

Además de esto se obtienen datos importantes para poder determinar la respuesta ante la carga de sismo como son los períodos de vibración de la estructura los cuales son un aporte importante para su análisis dinámico y se relacionan de manera directa con los parámetros vistos anteriormente.

3.1.1.2 Evaluación preliminar de la relación de amortiguamiento y energía disipada

Siguiendo las recomendaciones ya señaladas el siguiente paso es evaluar la relación de amortiguamiento que se desea para la estructura una vez que se coloquen los amortiguadores.

Para esto se recomienda observar la respuesta de la estructura aún sin amortiguadores, para diferentes relaciones de amortiguamiento, dentro de un análisis espectral y un análisis a lo largo del tiempo. Pero este análisis no tiene base científica ya que una estructura metálica no puede ofrecer una relación de amortiguamiento mayor al 5% como se vera en el Capítulo 4.

Por lo tanto se asume para las simulaciones preliminares un amortiguamiento del 2%, que es inherente a la estructura metálica. Según la recomendación tanto la disposición de los amortiguadores como los valores característicos seleccionados (C y α), deberían elevar esta relación de amortiguamiento hasta un límite del 35%.

Sin embargo existen varios tipos de amortiguadores viscosos para estructuras como los que proporciona Taylor Devices, que “permiten elevar esta relación de amortiguamiento hasta valores mayores al 50%. Esto se debe a que tienen una característica lineal, es decir que la fuerza de salida es proporcional a la velocidad”⁶. Esto se ha visto en experimentos con varias estructuras en las cuales se ha probado estos amortiguadores pero que debido al costo no han podido ser implementados. Este valor es muy alto en comparación con los automóviles que tienen desde un 20% hasta un 30% de relación de amortiguamiento.

De esta manera se podrá utilizar cualquier tipo de amortiguador, siempre que éste eleve la relación de amortiguamiento hasta los límites deseables y no varíe demasiado, en proporción de sus dimensiones, con las características de amortiguamiento obtenidas. Además como se explica en el siguiente capítulo la solución debe tomarse como una aproximación al resultado obtenido manualmente.

En cuanto al análisis energético, en los resultados de las simulaciones se puede encontrar la energía sísmica que entra a la estructura, y la fracción de esta que se puede disipar mediante un amortiguador telescópico hidráulico. La energía que entra a la estructura aumenta cuando se tiene mayor amortiguamiento con respecto al crítico ya que es capaz de absorber mayor cantidad de esta energía y a la vez disiparla en forma de calor.

Cabe recalcar que no toda la energía generada en un sismo entra a la estructura sino que depende del tipo de suelo en que esté asentada, el período fundamental de vibración y de la relación de amortiguamiento que posea. La energía total liberada en un sismo también puede ser calculada en función de su magnitud como se observó en el Capítulo 2. Por esta razón se trata que la energía de entrada no varíe mucho para poder encontrar puntos de comparación comunes.

3.1.1.3 Selección de propiedades preliminares del amortiguador

⁶ www.taylordevices.com

Las propiedades necesarias para realizar una simulación de un amortiguador viscoso en SAP 2000 son detalladas en el Capítulo 4. Entre estas propiedades se encuentran la elasticidad efectiva, y el coeficiente de amortiguamiento efectivo, que son propiedades necesarias para un análisis lineal, donde todos los miembros de la estructura trabajan dentro del rango elástico.

Además de esto se necesita la elasticidad, el coeficiente de amortiguamiento y el exponente de amortiguamiento, utilizado para un análisis no lineal, es decir cuando todos los miembros trabajan también fuera del rango elástico.

Como se podrá ver posteriormente los valores preliminares para los amortiguadores son obtenidos de un ejemplo de simulación de una estructura en SAP 2000. Este modelo obtiene los valores para el amortiguador de un ejemplo llamado “the SUNY Buffalo Report” mostrado en la Sección 5 de Scheller and Constantinou 1999⁷.

Estos valores se introducen en el SAP 2000 para comprobar datos experimentales realizados con dicho amortiguador y publicados en “the SUNY Buffalo Report”. El valor de C tanto para el análisis lineal y no lineal es un promedio de los valores obtenidos experimentalmente y es de 160 N – s/cm.

El valor de la elasticidad k es 0 N/cm para el análisis lineal y de 1000000 N/cm para el análisis no lineal. Como se analizará posteriormente en el Capítulo 4, este valor de k es ingresado debido a que tanto en un análisis lineal como no lineal se desea un amortiguamiento puro, y esto depende de la disposición de las dos propiedades.

En un análisis lineal k es paralelo con C , y en análisis no lineal k está en serie con C por lo que se necesita que el amortiguamiento sea una pequeña fracción para poder ser analizado.

⁷ Ejemplo 6-006 SAP 2000

El exponente de amortiguamiento se asume como 1 debido a que se trata de un amortiguador de comportamiento lineal. Cuando el desempeño de la estructura es de satisfacción usando un amortiguamiento de comportamiento lineal $\alpha = 1$, se puede afinar la respuesta utilizando exponentes más bajos⁸.

Debido a que los resultados obtenidos en un comportamiento lineal nos ayudan para poder realizar un análisis más profundo se puede mantener este tipo de amortiguador para un proceso de iteración.

3.1.1.4 Procedimiento iterativo y comprobación

Según las indicaciones observadas anteriormente es necesario realizar un proceso iterativo o de prueba – error, variando las disposiciones y las propiedades de los amortiguadores hasta obtener la relación de amortiguamiento requerida.

En el presente estudio se analiza una sola disposición, y se desea realizar una comprobación, por lo que no se puede cambiar este parámetro. Las propiedades se pueden cambiar, pero debido a que en un primer resultado se obtuvo una relación de amortiguamiento dentro de lo establecido (aproximadamente 50% como se muestra en los Capítulos 4 y 5) se pueden obtener otros parámetros necesarios para comprobar experimentalmente un amortiguador.

De acuerdo a las recomendaciones se deben obtener de una simulación o un cálculo manual (que es demasiado complejo) las fuerzas que actúen sobre el amortiguador, así como las deformaciones para poder fabricar un prototipo adecuado para la realización de pruebas.

Debido a que esta fabricación no es posible en nuestro medio se puede obtener las fuerzas que actúan sobre el amortiguador, así como las deformaciones para poder simularlas de manera proporcional en un ensayo.

⁸ www.taylordevices.com

Entonces las fuerzas que actúan sobre el amortiguador como se muestra en el Capítulo 4 están en el orden de los 600 N y las deformaciones no sobrepasan 1 cm, para un amortiguador con las características dadas, de aproximadamente 6.7 m de longitud y 0.2 Kg de masa.

Con estas características se puede buscar un amortiguador que en proporción se asemeje al requerido, y de esta manera se puede obtener nuevas propiedades mediante ensayos para comprobar mediante la simulación la respuesta de la estructura con el amortiguador seleccionado.

3.1.2 CARACTERÍSTICAS DEL AMORTIGUADOR SELECCIONADO

Observando las características requeridas para el amortiguador se seleccionó un amortiguador telescópico hidráulico utilizado para automóviles de pasajeros. Se adquirieron dos modelos para comparar sus propiedades. Estos modelos serán considerados como prototipos a escala reducida (incluso en sus propiedades y características de fabricación) debido a que no se podría adquirir un modelo a escala real.

Este amortiguador nos permitirá analizar el comportamiento viscoso o no lineal de este tipo de amortiguadores con cargas y desplazamientos relativamente pequeños, comparados con los requeridos en su montaje en el automóvil, ya que soporta hasta una carga de 0.75 Ton (característica proporcionada por el vendedor aproximando la carga dinámica de un automóvil promedio).

Sin embargo las capacidades del equipo utilizado nos permiten someter al amortiguador a comportamientos que sobrepasan sus requerimientos dentro la estructura sometida a cargas sísmicas (con velocidades menores lo que nos da menor fuerza de salida como se observó en el Capítulo 2), y a velocidades de movimiento mucho mayores que cuando se encuentra montado en el automóvil.

Las características técnicas encontradas para el amortiguador se detallan a continuación:

Marca: MONROE

Modelo: MONRO – MATIC Shock Absorber (Amortiguador)

Origen de fabricación: E.E.U.U.

Series: P163Z y P348Z

Carrera del pistón: 180 mm

Montaje: Ajuste de argolla en los dos extremos

Longitud en posición de montaje: 400 mm (entre argollas)

Algunas otras características dimensionales se pueden ver detalladas en el Anexo A. Los amortiguadores adquiridos para el ensayo se pueden observar en la Figura 3.1



Figura 3.1 Amortiguadores utilizados para el ensayo

Otras características de calidad de fabricación que nos proporciona la marca y que se ven en la Figura 3.2 son⁹:

- Sello de estanqueidad de múltiples labios.
- Guía de la varilla de hierro sinterizado y templado, para aumentar la durabilidad y prolongar la vida de servicio.
- Varilla de pistón nitrocarburoada de ½ pulgada de diámetro.
- Pistón de 1 – 3/16 pulgada de diámetro para brindar un control más eficiente y uniforme.

⁹ www.monroe.com

- Tubo de reserva de 1 – $\frac{3}{4}$ pulgada de diámetro para brindar un rendimiento más uniforme.
- Fluido para todo clima, contiene modificaciones especiales para reducir la fricción y asegurar una reacción más suave de la barra.

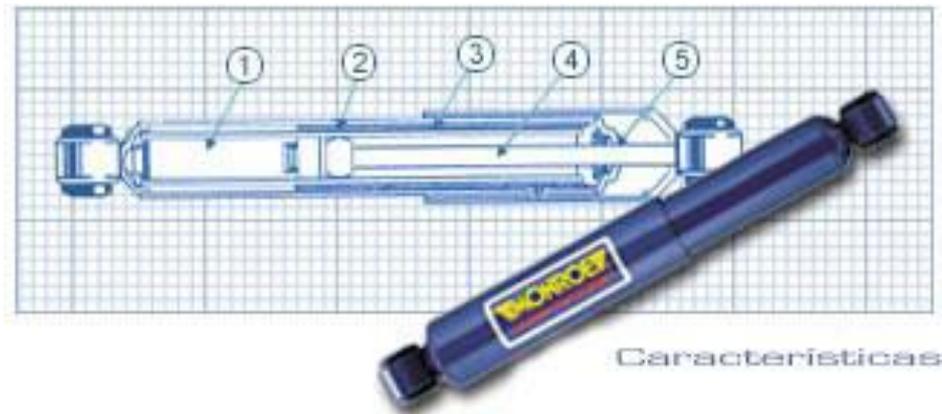


Figura 3.2 Características del amortiguador Monro - Matic*

3.2 ANÁLISIS DEL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO Y PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS A SER UTILIZADOS PARA LOS ENSAYOS.

3.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO

Debido a que se necesitará realizar pruebas de carga dinámica para poder evaluar el desempeño del prototipo a ser utilizado en los ensayos, se utilizará el equipo que se tiene a disposición en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Escuela Politécnica del Ejército para prácticas de la carrera de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Civil.

La descripción del equipo es la siguiente:

Equipo: Máquina de Ensayos Universales MTS 810 Material Test System

Marca: MTS

Modelo: 810 – 14 – 2

Código (Laboratorio de Mecánica de Materiales ESPE): RM – 30

* www.monroe.com

Manual (Laboratorio de Mecánica de Materiales ESPE): MRM – 30

Las características técnicas son las siguientes:

Voltaje: 230 V

Fases: 3

Ciclos: 60 Hz

Peso: 3000 Kg

Capacidad Máxima: 500 KN

Refrigerante: N/A

Tipo de motor: SC

Potencia motor: 40 HP

Velocidad máxima motor: 1765 rpm

Combustibles: N/A

El equipo consta de tres partes:

- El circuito hidráulico, el cual posee una bomba para dar la presión necesaria al pistón hidráulico según lo requiera el control de la máquina previamente programado.
- El control de la máquina, en el cual se programa el movimiento del pistón hidráulico según el ensayo requerido y envía señales eléctricas al circuito hidráulico para trabajar sobre la probeta. La Figura 3.3 muestra el control y sus diferentes partes.



Figura 3.3 Control de la máquina de ensayos universales

- Las instalaciones fijas y móviles las cuales sostienen la probeta con mordazas y envían la información sobre desplazamiento, carga o deformación mediante sensores al control de la máquina para registrar los datos y procesarlos. La Figura 3.4 muestra las instalaciones fijas y móviles sin dispositivos de ensayo.



Figura 3.4 Instalaciones fijas y móviles de la máquina

3.2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El equipo es accionado mediante el siguiente funcionamiento:

- Se programa en el panel de la máquina el tipo de ensayo a realizarse ya sea controlando el desplazamiento, la carga o la deformación aplicada a la probeta o prototipo de ensayo.
- Una vez encerados los valores de control se configuran los valores máximos del parámetro controlado mediante la comparación de dicho valor con el voltaje indicado en el lector digital. El máximo voltaje de salida es de 10V.
- Cuando se ha estabilizado la presión del circuito hidráulico la bomba está lista para recibir la señal eléctrica controlando la presión del pistón que da el movimiento final.
- El movimiento del pistón genera una respuesta de la probeta o dispositivo, que es registrada mediante sensores (celda de carga, desplazamiento del pistón, galga de desplazamiento de la probeta).
- La señal de los sensores es enviada al control de la máquina para el registro de datos y envío de nueva información.

3.2.3 PARÁMETROS DE OPERACIÓN

El control del equipo consta de las siguientes partes:

- Panel de control (Master Control Panel): en el cual se observan posibles fallas en el circuito hidráulico, su estabilización, y aumento de la presión para iniciar los ensayos. También aquí se enciende el control de la máquina y el circuito hidráulico.
- Controlador (Controller): el cual indica el tipo de control (desplazamiento, carga o deformación), el porcentaje del total de la máquina, los valores máximos y mínimos del parámetro controlado, y los valores a registrar gráficamente.
- Controladores del operador (Operator Controls) : en los cuales se encera y se regula el movimiento del pistón para comparar los valores de salida de los parámetros.
- Generador de la función digital (Digital Function Generator): indica el tipo de variación del parámetro de control (sinusoidal, recta, rampa, etc.), si es controlada por el operador o automáticamente, los valores de tiempo y frecuencia de aplicación de la carga.
- Panel Contador (Counter Panel): registra el número de ciclos de carga por ensayo y el número de ciclos de carga total a los que se ha sometido la probeta o dispositivo de prueba.
- Indicador o lector digital (Digital Indicador): registra el valor en voltaje de los parámetros leídos de los sensores, según se lo requiera.
- Generador de gráficas: en el cual se registra gráficamente los valores indicados en el controlador, la escala y unidades en que se desea graficar.

3.3 CARACTERIZACIÓN Y ELABORACIÓN DE PROCEDIMIENTOS PARA ENSAYOS EN AMORTIGUADORES TIPO TELESCÓPICO HIDRÁULICOS CON CARGAS SÍSMICAS SIMULADAS

3.3.1 PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS EN AMORTIGUADORES PARA CARGAS SÍSMICAS

3.3.1.1 Ensayos para dispositivos de aislamiento sísmico

Como se pudo observar en el Capítulo 2 los dispositivos de aislamiento sísmico tratan de controlar la energía de entrada al sistema, y no se encargan de disipar o absorber esta energía como el resto de los elementos de la estructura, ya sea como deformación o amortiguamiento. Es por esta razón que estos dispositivos son ubicados en la base de la estructura para controlar el movimiento del suelo que se propaga a la estructura.

Existen diferentes procedimientos por los que se puede evaluar el comportamiento de estos dispositivos ante diferentes eventualidades, entre ellas los movimientos sísmicos. Algunos procedimientos que utilizan los fabricantes de estos dispositivos se detallan en la Norma de la ASCE 7 – 05 Capítulo 17¹⁰.

En esta referencia se detallan las pruebas a realizar a prototipos de los dispositivos a instalarse en estructuras reales, con un cálculo previo de las condiciones a las que va estar sometida la estructura (cortantes de base, desplazamientos máximos y cargas de viento).

Para realizar las pruebas se exigen mínimo dos prototipos a escala real, que cumplan con los requisitos mínimos de calidad de fabricación, además de considerar las condiciones en que se encuentre dentro de la estructura, incluyendo cargas de viento.

La información a ser obtenida incluye la curva de fuerza – desplazamiento, y el comportamiento histerético básico, en el cual se analiza el dispositivo dentro del rango no lineal (curvas de histéresis) y la cantidad de energía que puede absorber el dispositivo por si solo.

Entre las pruebas que propone esta norma se observan:

- Veinte ciclos completos con la carga lateral correspondiente a la carga lateral de viento.

¹⁰ Energy Dissipation Devices, Ian Aiken Ph.D.

- Tres ciclos completos de carga correspondientes a diferentes porcentajes del desplazamiento total causada por las cargas sísmicas aplicadas al sistema.
- Diez ciclos completos a diferentes relaciones de la aceleración total correspondiente al movimiento sísmico.

Pero la prueba a tomarse en cuenta es aquella que se realiza debido a la naturaleza del dispositivo ante cargas variables. Por lo tanto se propone realizar pruebas dinámicas en las que se apliquen cargas de prueba similares a las aplicadas al sistema, con frecuencias que vayan del rango de 0.1 hasta 2 veces la inversa del período natural de la estructura.¹¹ Si los prototipos utilizados son a escala reducida, se deben aplicar, las mismas cargas y a la misma frecuencia que si fueran de escala real.

El cálculo de las propiedades se detalla más adelante. Para justificar la realización de estas pruebas, las propiedades obtenidas no deben variar más del 15% del valor obtenido como promedio.

Sin embargo existe libertad para realizar las pruebas siempre que los resultados se analicen con la base científica necesaria. Se debe observar que los dispositivos no cambien significativamente sus características luego de las pruebas.

3.3.1.2 Ensayos para dispositivos de amortiguamiento viscoso

Como se observó anteriormente la utilidad de los dispositivos de amortiguamiento viscoso consiste en disipar la energía que entra a la estructura, reduciendo la demanda que poseen el resto de los elementos y evitando una deformación excesiva de estos.

¹¹ ASCE 7 – 05 Sección 17.8

Algunos procedimientos para realización de pruebas se detallan de igual manera que en la sección anterior en la Norma ASCE 7 – 05 pero esta vez en el Capítulo 18.

Para realizar las pruebas se exigen dos prototipos, los cuales deben ser de las mismas características y medidas que los usados dentro de la estructura. Si se utilizan dispositivos a escala reducida, estos deben ser de la misma calidad y tipo de fabricación que el usado en la estructura. Además los resultados obtenidos deben ser analizados con la correcta base científica.

Los resultados a ser obtenidos son la relación fuerza – desplazamiento para cada ciclo de carga para cada prueba.

Entre las pruebas que se propone realizar se tiene:

- No menos de 2000 ciclos de carga igual a la máxima amplitud de carga de viento, con frecuencia igual a la inversa del período natural de la estructura.
- Cinco ciclos completos sinusoidales del máximo desplazamiento al cual va estar sometido el dispositivo por motivo de cargas sísmicas. La frecuencia con la que se harán los ensayos es aproximadamente igual a la inversa del período natural de vibración de la estructura (incluyendo el dispositivo). La prueba debe ser realizada a tres temperaturas (mínima, ambiente y máxima) que deben salir del rango de temperaturas especificado para el dispositivo. Los métodos alternativos son permitidos bajo cierta responsabilidad.
- Si se observa que las propiedades a calcularse pueden variar más del 15% del valor promedio de la propiedad en estudio, se deben ampliar el número de frecuencias de ensayo para comparar los resultados obtenidos. El rango puede ir desde 1 hasta 2.5 veces la inversa del período natural de la estructura (con o sin el dispositivo).

Un ejemplo para un amortiguador viscoso de Taylor Devices se muestra en la Figura 3.5.

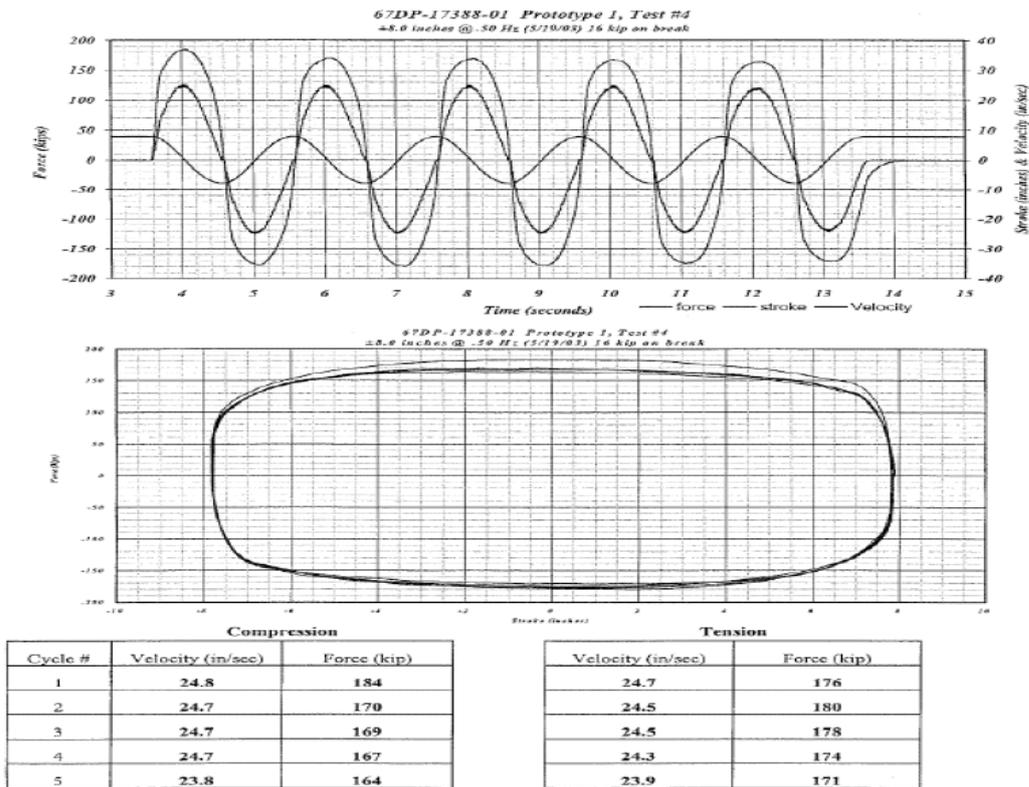


Figura 3.5 Pruebas de amortiguador viscoso Taylor Devices*

El cálculo de las propiedades es el mismo que el mencionado en la sección anterior y que se detalla posteriormente. Estas propiedades no deben diferir del 15% del valor promedio de los resultados obtenidos en estudio.

Debido a que se trata de un dispositivo cuya fuerza de salida depende de la velocidad se deben tomar en cuenta estos parámetros antes y después del ensayo. También se debe observar en los resultados si es que el dispositivo posee algún daño o cambio significativo en sus características luego de las pruebas realizadas.

3.3.2 ENSAYOS A REALIZARSE

Tomando en cuenta las características del amortiguador seleccionado, y las recomendaciones de la Norma ASCE 7 – 05 para la realización de pruebas mencionadas anteriormente se realizaron los siguientes ensayos:

- Ensayos mecánicos, en los cuales se someterá al amortiguador a cinco ciclos de carga sinusoidal (control de carga) a tres valores de frecuencia

* AIKEN I., Ph.D., P.E., Energy Dissipation Devices

(0.01, 0.1 y 1 veces la frecuencia fundamental del sistema). Las cargas aplicadas se determinarán observando el comportamiento mecánico del amortiguador. Se pretende observar el comportamiento mecánico del amortiguador y las cargas que puede soportar sin variar sus propiedades significativamente).

- Ensayos dinámicos, en los cuales se someterá al amortiguador a cinco ciclos de desplazamiento que varía de forma sinusoidal (control de desplazamiento) a cuatro valores de frecuencia (0.01, 0.1, 1 y 2 veces la frecuencia fundamental del sistema). Los desplazamientos máximos para los ensayos serán determinados según las dimensiones de extensión y compresión, observando que sus propiedades no varíen significativamente.

Los datos a registrar son:

- La relación fuerza – desplazamiento mediante la gráfica de estas variables en papel milimetrado.
- Los bucles histeréticos o comportamiento no lineal obtenidos de la gráfica fuerza – desplazamiento para determinar el área promedio y la energía disipada por el amortiguador.
- Las fuerzas y desplazamientos máximos, relacionados con el voltaje tanto programado, como el observado en el lector digital de la máquina.

Los resultados a obtener y que serán calculados posteriormente:

- La elasticidad efectiva o valor de k utilizado para las simulaciones.
- La relación de amortiguamiento propia del amortiguador.
- El coeficiente de amortiguamiento crítico del dispositivo para obtener el coeficiente de amortiguamiento C efectivo utilizado para las simulaciones.
- La relación aproximada entre la fuerza y la velocidad a fin de obtener el exponente de amortiguamiento α . Además se podrá obtener un rango de frecuencias en el cual el amortiguador no tiene elasticidad efectiva.
- La energía que es capaz de disipar el amortiguador.

Se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Debido a que no se puede tener una atmósfera controlada donde se pueda variar la temperatura ambiental, no se pueden realizar los ensayos a temperaturas mínimas y máximas fuera de los rangos de operación del amortiguador. Además de esto las especificaciones del amortiguador seleccionado indican que el fluido de trabajo (aceite hidráulico) opera normalmente en todo tipo de temperaturas. Esto se explica debido a que el fabricante es conocido a nivel internacional, se usa para diferentes tipos de vehículos, en diferentes tipos de climas y para diferentes condiciones de trabajo.
- El amortiguador utilizado es a escala reducida y no se consideran las condiciones en las que va a ser incluido en la estructura (como uniones, montaje, dimensiones transversales). En la Figura 3.6 se muestra el amortiguador de prueba instalado en las mordazas de la máquina.
- Las propiedades que se obtendrán en el prototipo no representan el comportamiento de un amortiguador hidráulico en escala real dentro de la estructura. Estas propiedades podrán variar hasta un 15% con respecto al promedio obtenido.
- No se consideran cargas de viento ni otras cargas externas aplicadas sobre la estructura.
- Los valores en los ensayos podrán ser cambiados de acuerdo a los resultados que se ha de obtener durante el ensayo a fin de no afectar el adecuado registro de datos.
- Si las frecuencias determinadas para los ensayos mecánicos son muy altas y no permiten el registro de datos se puede cambiar este valor siempre que no se aproxime a las frecuencias ya utilizadas.
- Aunque no se menciona en los procedimientos anteriores es importante para el cálculo de propiedades la medición de la masa del amortiguador. Para esto se utilizará la balanza ubicada en el mismo Laboratorio de Mecánica de Materiales.



Figura 3.6 Amortiguador instalado en la máquina

3.4 ENSAYOS MECÁNICOS

3.4.1 PROCEDIMIENTO REALIZADO

Como se podrá ver posteriormente en los resultados de las simulaciones la frecuencia natural de la estructura no varía demasiado cuando se coloca el amortiguador. Por lo tanto se podrá utilizar un valor base de frecuencia para realizar los ensayos que es de 15 Hz, que es un valor aproximado de la frecuencia natural obtenida en las simulaciones del Capítulo 4.

Por lo tanto se introdujeron en el control de carga una variación de forma sinusoidal (como lo muestra la Figura 3.7) con frecuencias de 0,15 Hz, 1,5 Hz y

15 Hz. Debido a que con la frecuencia de 15 Hz no se dieron desplazamientos significativos debido a que su rigidez aumenta, se tuvo que cambiar esta frecuencia a 5 Hz para poder registrar los datos de manera adecuada.

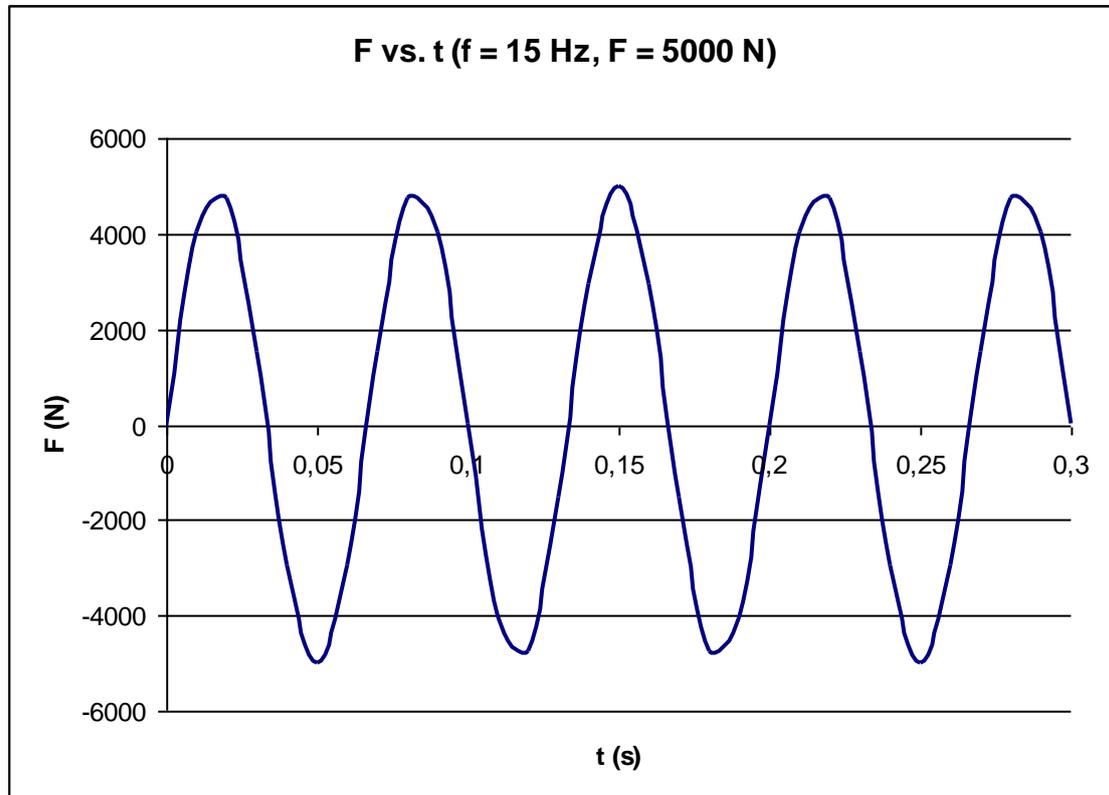


Figura 3.7 Variación de la carga en el tiempo

Además se debió revisar el número de ciclos al que fue sometido. Este valor no es importante en este ensayo ya que no se quiere determinar la vida útil del amortiguador (cargas de fatiga) que es proporcionada por el fabricante para otras utilidades. Cinco ciclos es un número suficiente para determinar las propiedades requeridas.

Para introducir la fuerza de entrada se tomo como referencia las cargas del control desplazamiento, es decir aquellas que podían darnos desplazamientos significativos (alrededor de 5 mm) que son medidos tanto en el lector digital como directamente en el amortiguador.

Debido a que estas cargas no eran suficientes para darnos dichos desplazamientos se utilizaron cargas mayores (correspondientes a 1 V, 2 V, 5

V y 10 V, que es la máxima) y a una escala menor (10%), estas cargas fueron de 5 kN, 10 kN, 25 kN y 50 kN.

Además de tomar en cuenta las equivalencias de las cargas introducidas se pudieron leer los valores registrados en el lector digital tanto de carga como de desplazamiento a fin de comparar dichos valores.

Además se registro la relación entre fuerza y desplazamiento en un gráfico para poder observar el comportamiento del amortiguador y su variación con la frecuencia.

Se puede observar detalladamente los pasos seguidos para el control y calibración del equipo en el Anexo B.

La hoja de datos registrados así como las gráficas se pueden observar en el Anexo C y D.

3.4.2 RESULTADOS OBTENIDOS

Aunque la carga introducida era relativamente grande, el lector digital solamente registra la carga necesaria para deformar el amortiguador dentro de su comportamiento viscoso. Por lo tanto nos da una medida de la fuerza de salida del amortiguador cuando se varía la velocidad de movimiento del pistón.

No se puede observar una reacción real ante la carga introducida ya que el amortiguador no ofrece mayor resistencia al movimiento. De todas maneras se pudieron obtener los siguientes valores mostrados en la Tabla 3.1, se incluye también la elasticidad y coeficiente de amortiguamiento efectivos obtenidos con los valores del lector digital calculados como se indica posteriormente:

Tabla 3.1 Elasticidad efectiva ensayo mecánico (lector digital)

Frecuencia (Hz)	Carga (N)	F Máx (N)	D Máx (mm)	k eff (N/cm)
0,15	5000	100	10	100,00
	10000	150	30	50,00

	25000	200	40	50,00
	50000	200	50	40,00
1,5	5000	100	2	500,00
	10000	100	5	200,00
	25000	200	7,5	266,67
	50000	200	10	200,00
5	5000	150	1	1500,00
	10000	200	1,5	1333,33
	25000	200	2	1000,00
	50000	200	2,5	800,00

Fuente: Ensayos mecánicos amortiguador telescópico hidráulico

Tabla 3.2 Amortiguamiento efectivo ensayo mecánico (lector digital)

Frecuencia (Hz)	Carga	E (N - cm)	B eff	C eff (N - s/cm)
0,15	1	314,16	0,50	1,19
	2	1413,72	0,50	0,84
	3	2513,27	0,50	0,84
	MÁX	3141,59	0,50	0,75
1,5	1	62,83	0,50	2,67
	2	157,08	0,50	1,69
	3	471,24	0,50	1,95
	MÁX	628,32	0,50	1,69
5	1	47,12	0,50	4,62
	2	94,25	0,50	4,36
	3	125,66	0,50	3,77
	MÁX	157,08	0,50	3,38

Fuente: Ensayos mecánicos amortiguador telescópico hidráulico

Las gráficas que se muestran a continuación se las realizó en el registro gráfico colocando siempre una escala de 1% en el eje Y (fuerza de respuesta), ya que la fuerza de respuesta del amortiguador n es muy grande aunque se le aplique una carga mayor. En el eje X la escala varía según el desplazamiento que presente el amortiguador. Se podrá observar que las gráficas se asemejan a una elipse

Para frecuencia 0,15 Hz, escalas X 2%:

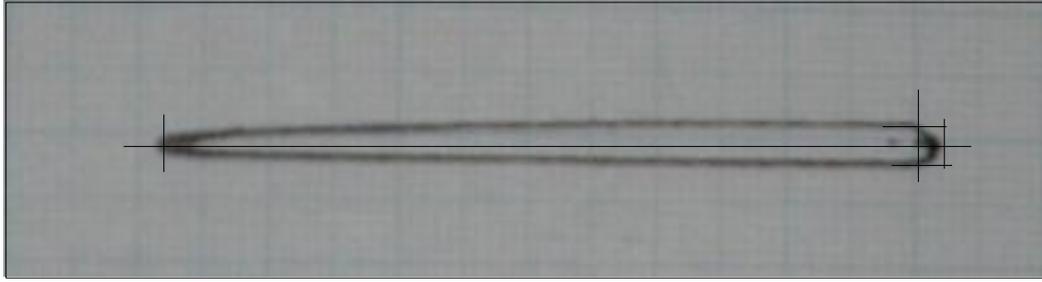


Figura 3.8 Carga 5000 N, Desplazamiento 10 mm

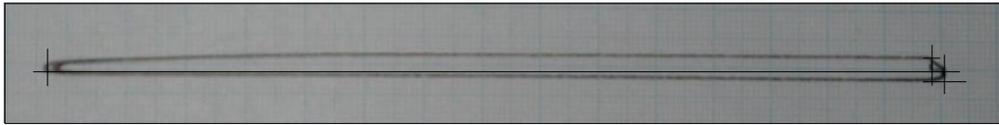


Figura 3.9 Carga 10000 N, Desplazamiento 30 mm

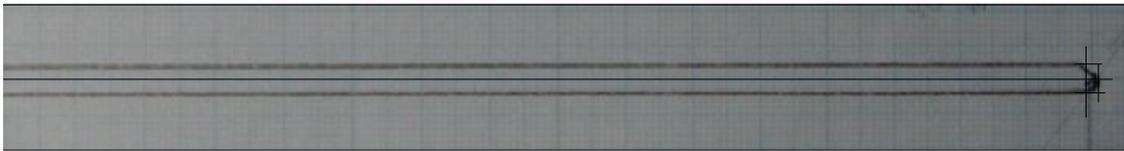


Figura 3.10 Carga 25000 N, Desplazamiento 40 mm



Figura 3.11 Carga 50000 N, Desplazamiento 50 mm

Para frecuencia 1.5 Hz, escala X 1%

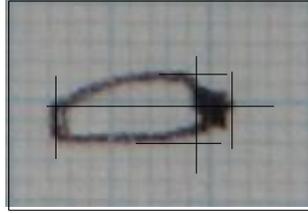


Figura 3.12 Carga 5000 N, Desplazamiento 2 mm

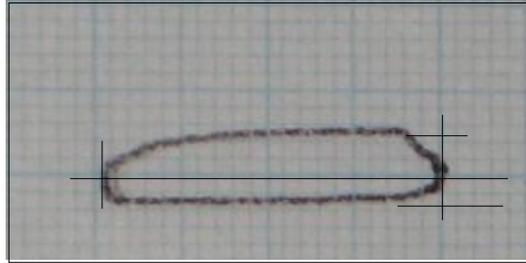


Figura 3.13 Carga 10000 N, Desplazamiento 5 mm

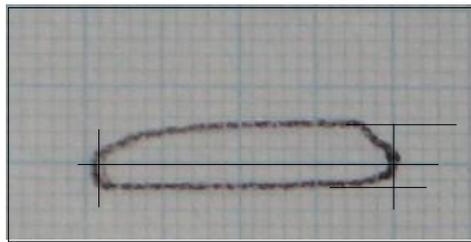


Figura 3.14 Carga 25000 N, Desplazamiento 7,5 mm

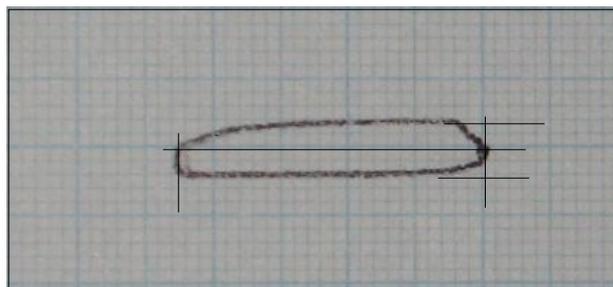


Figura 3.15 Carga 50000 N, Desplazamiento 10 mm

Para frecuencia 5 Hz, escala X 1%



Figura 3.16 Carga 5000 N, Desplazamiento 1 mm

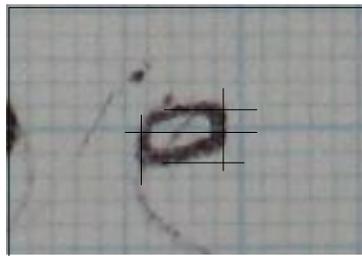


Figura 3.17 Carga 10000 N, Desplazamiento 1,5 mm



Figura 3.18 Carga 25000 N, Desplazamiento 2 mm

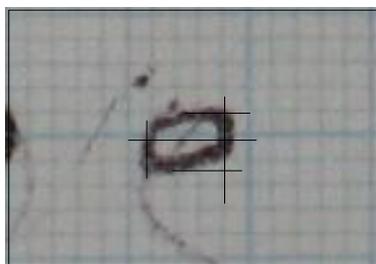


Figura 3.19 Carga 50000 N, Desplazamiento 2,5 mm

El área de los bucles histeréticos pudo ser calculado mediante la digitalización de las gráficas y el programa AutoCAD. Se puede obtener un comportamiento

muy similar al de la Ecuación (2.16) por lo que se calcula el área como una elipse. Los resultados obtenidos de las gráficas se muestran en las tablas a continuación, se incluye también el cálculo de la elasticidad efectiva (comparada con los valores del lector digital con un porcentaje de error) y el amortiguamiento (las fórmulas se indican posteriormente):

Tabla 3.3 Medidas de los bucles ensayo mecánico

Frecuencia (Hz)	Carga	D+ (mm)	D- (mm)	F+ (mm)	F-(mm)
0,15	1	2,31	67,52	1,78	1,71
	2	2,43	174,42	2,71	1,99
	3	2,21	265,02	2,74	2,43
	MÁX	3,47	337,41	3,13	2,85
1,5	1	1,98	7,8	1,8	2,07
	2	0	22,23	2,84	1,81
	3	0	21,58	3,55	1,68
	MÁX	0	26,65	2,26	2,47
5	1	0	3,99	1,16	1,97
	2	0	3,69	1,03	1,38
	3	0	3,55	1,1	1,56
	MÁX	0	3,39	1,18	1,34

Fuente: Ensayos mecánicos amortiguador telescópico hidráulico

Tabla 3.4 Elasticidad efectiva ensayo mecánico (gráficas)

Frecuencia (Hz)	Carga	D+ (mm)	D- (mm)	F+ (N)	F-(N)	k eff (N/cm)	%error
0,15	1	0,66	-19,34	102,01	-97,99	100,00	0,00
	2	0,82	-59,18	172,98	-127,02	50,00	0,00
	3	0,66	-79,34	211,99	-188,01	50,00	0,00
	MÁX	1,02	-98,98	209,36	-190,64	40,00	0,00
1,5	1	0,81	-3,19	93,02	-106,98	500,00	0,00
	2	0,00	-10,00	122,15	-77,85	200,00	0,00
	3	0,00	-15,00	271,51	-128,49	266,67	0,00
	MÁX	0,00	-20,00	191,12	-208,88	200,00	0,00

Tabla 3.4 Elasticidad efectiva ensayo mecánico (gráficas) (Continuación)

Frecuencia (Hz)	Carga	D+ (mm)	D- (mm)	F+ (N)	F-(N)	k eff (N/cm)	%error
-----------------	-------	---------	---------	--------	-------	--------------	--------

5	1	0,00	-2,00	111,18	-188,82	1500,00	0,00
	2	0,00	-3,00	170,95	-229,05	1333,33	0,00
	3	0,00	-4,00	165,41	-234,59	1000,00	0,00
	MÁX	0,00	-5,00	187,30	-212,70	800,00	0,00

Fuente: Ensayos mecánicos amortiguador telescópico hidráulico

Tabla 3.5 Amortiguamiento efectivo ensayo mecánico (gráficas)

Frecuencia (Hz)	Carga	E (N - cm)	% error	B eff	C eff (N - s/cm)
0,15	1	619,72	-97,26	0,01	0,02
	2	3215,77	-127,47	0,01	0,02
	3	5283,88	-110,24	0,01	0,02
	MÁX	6510,43	-107,23	0,01	0,02
1,5	1	107,21	-70,64	0,01	0,05
	2	383,75	-144,30	0,01	0,04
	3	1279,46	-171,51	0,01	0,05
	MÁX	1312,43	-108,88	0,01	0,04
5	1	118,64	-151,76	0,01	0,12
	2	215,87	-129,05	0,01	0,10
	3	294,79	-134,59	0,01	0,09
	MÁX	334,11	-112,70	0,01	0,07

Fuente: Ensayos mecánicos amortiguador telescópico hidráulico

Se puede observar que a frecuencias más altas el amortiguador ya no da una respuesta viscosa pura por lo que su comportamiento ante la vibración depende mayormente del componente elástico, tanto de los componentes como del fluido.

Este comportamiento se debe a la característica del amortiguador de ofrecer mayor resistencia al movimiento a mayores velocidades, lo que indica un comportamiento cercano al lineal. Esto afecta también a la sensibilidad para realizar las gráficas, por lo que nos da un porcentaje de error alto

Un ejemplo es el comportamiento del amortiguador viscoso de Taylor Devices mostrado en la Figura 3.20. Aquí se observa que el amortiguamiento no depende de la temperatura sino de las frecuencias de excitación a las que está

sometido, dando así un punto de cambio que es de 4 Hz. A frecuencias mayores a 4Hz el amortiguador aumenta su rigidez y presenta un comportamiento lineal.

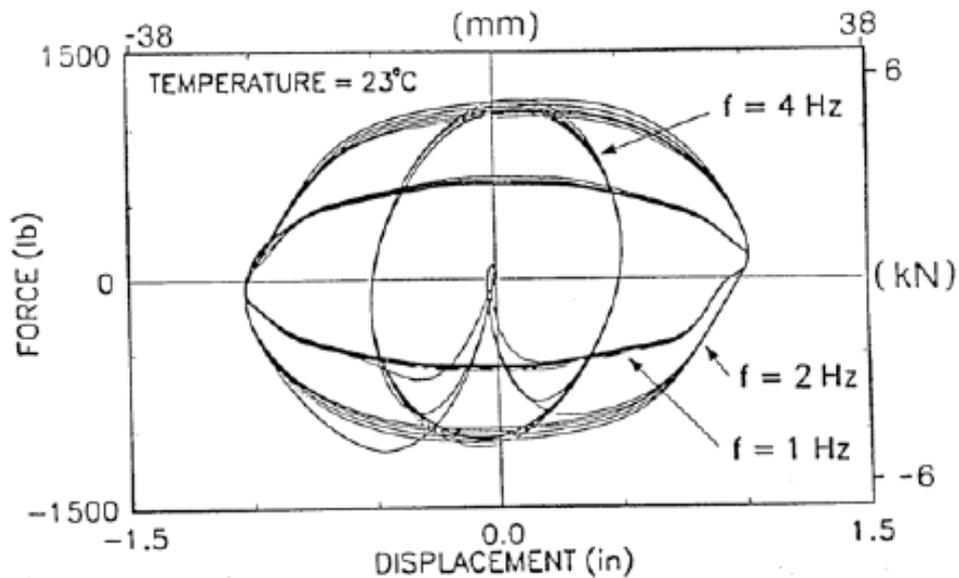


Figura 3.20 Comportamiento del amortiguador a distintas frecuencias*

En este caso se pudo observar, determinando distintos rangos de frecuencias, que el punto de cambio para el amortiguador utilizado es cercano a los 5 Hz (la frecuencia máxima utilizada en los ensayos).

3.5 ENSAYOS DINÁMICOS

3.5.1 PROCEDIMIENTO REALIZADO

Igualmente se podrá utilizar un valor base de frecuencia para realizar los ensayos de 15 Hz que es un valor aproximado a la frecuencia natural con y sin amortiguador.

Se introdujeron en el control de desplazamiento frecuencias de 0.15 Hz, 1.5 Hz, 15 Hz y 30 Hz. El desplazamiento tuvo una variación de forma sinusoidal (como

* CASAROTTI CH. Bridge Isolation and Dissipation Devices

lo muestra la Figura 3.21) con las frecuencias especificadas. La diferencia está en que se utilizó una función seno invertido (realizando primero la compresión).

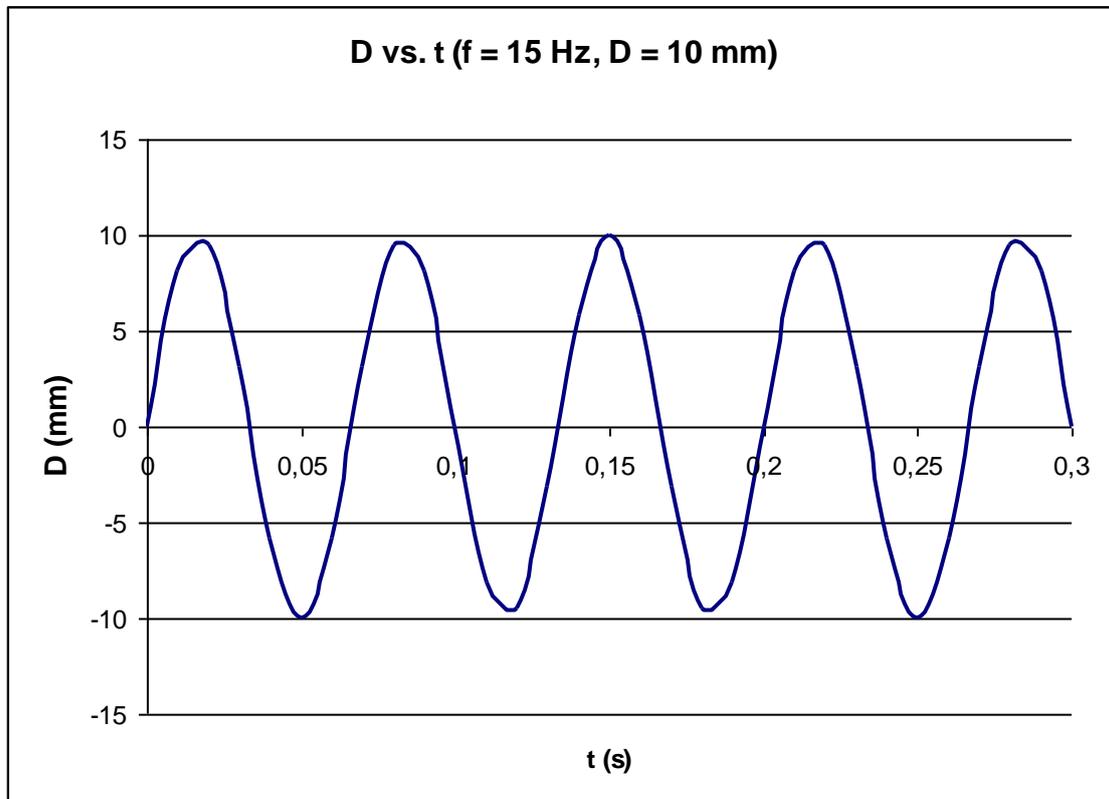


Figura 3.21 Variación del desplazamiento

Los desplazamientos ingresados se dieron de acuerdo al desplazamiento máximo del pistón medido fuera de ensayo. Desde la posición de equilibrio fue de 90 mm. Para el ensayo se determinaron desplazamientos de 10 mm, 20 mm, 30 mm y 80 mm.

Para realizar el ingreso de datos se debieron tomar las equivalencias en voltaje, por lo que el desplazamiento de 80 mm debió ser descartado ya que sobrepasaba el voltaje máximo. Para esto se tomó un desplazamiento máximo de 60 mm.

Aunque la rigidez del amortiguador aumenta con la frecuencia, los valores ingresados en voltaje pudieron reflejar de manera casi exacta los valores de salida en el dispositivo.

Se registraron los valores de carga en el lector digital, así como el registro gráfico que muestra la relación fuerza – desplazamiento. También se tomo en cuenta el número de ciclos, que es importante ya que indica una referencia para el cálculo de las áreas de los bucles, por lo que no se puede pasar de veinte ciclos.

Se puede observar detalladamente los pasos seguidos para el control y calibración del equipo en el Anexo B.

La hoja de datos registrados así como las gráficas se pueden observar en los Anexos C y D.

3.5.2 RESULTADOS OBTENIDOS

Las cargas máximas y mínimas obtenidas se pueden observar en la Tabla a continuación, se incluye el cálculo de la elasticidad efectiva:

Tabla 3.6 Elasticidad efectiva ensayo dinámico (lector digital)

Frecuencia (Hz)	D +/- (mm)	F Máx (N)	F Mín (N)	k eff (N/cm)
0,15	10	100	-150	125,00
	20	150	-150	75,00
	40	200	-150	43,75
	60	200	-150	29,17
1,5	10	150	-150	150,00
	20	150	-150	75,00
	40	150	-100	31,25
	60	200	-150	29,17

**Tabla 3.6 Elasticidad efectiva ensayo dinámico (lector digital)
(Continuación)**

Frecuencia (Hz)	D +/- (mm)	F Máx (N)	F Mín (N)	k eff (N/cm)
-----------------	------------	-----------	-----------	--------------

15	10	150	-150	150,00
	20	150	-150	75,00
	40	100	-100	25,00
	60	150	-100	20,83
30	10	100	-100	100,00
	20	100	-100	50,00
	40	100	-100	25,00
	60	100	-150	20,83

Fuente: Ensayos mecánicos amortiguador telescópico hidráulico

Tabla 3.7 Amortiguamiento efectivo ensayo dinámico (lector digital)

Frecuencia (Hz)	Desplazamiento	E (N - cm)	B eff	C eff (N - s/cm)
0,15	1	471,24	0,60	1,60
	2	942,48	0,50	1,03
	3	2513,27	0,57	0,90
	MÁX	3769,91	0,57	0,74
1,5	1	471,24	0,50	1,46
	2	942,48	0,50	1,03
	3	1884,96	0,60	0,80
	MÁX	3769,91	0,57	0,74
15	1	471,24	0,50	1,46
	2	942,48	0,50	1,03
	3	1256,64	0,50	0,60
	MÁX	2827,43	0,60	0,65
30	1	314,16	0,50	1,19
	2	628,32	0,50	0,84
	3	1256,64	0,50	0,60
	MÁX	2827,43	0,60	0,65

Fuente: Ensayos mecánicos amortiguador telescópico hidráulico

Las gráficas obtenidas son similares a las obtenidas en los anteriores ensayos y se muestran a continuación:

Para desplazamiento máximo 1cm:

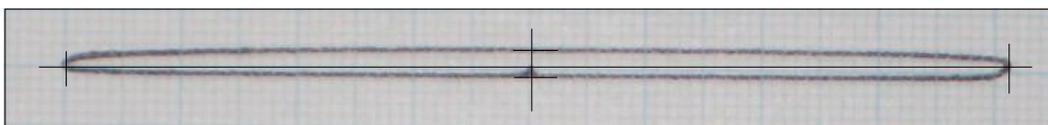


Figura 3.22 0,15 Hz, escala X 2%

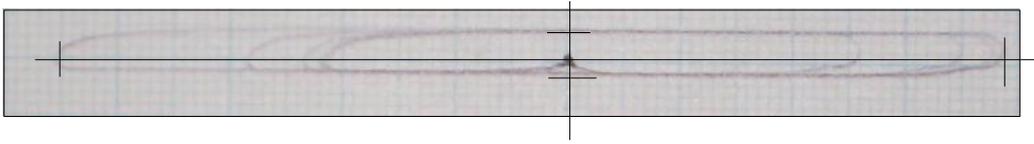


Figura 3.23 1,5 Hz, escala X 1%

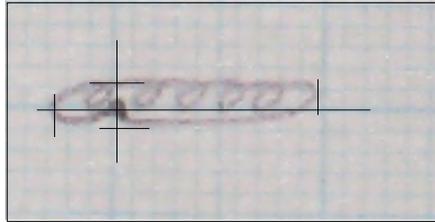


Figura 3.24 15 Hz, escala X 1%

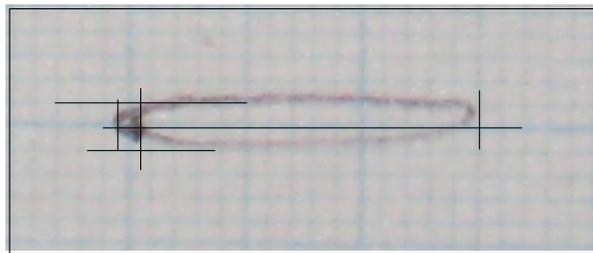


Figura 3.25 30 Hz, escala X 1%

Para desplazamiento máximo 2 cm:

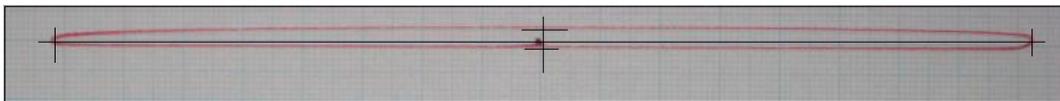


Figura 3.26 0,15 Hz, escala X 2%

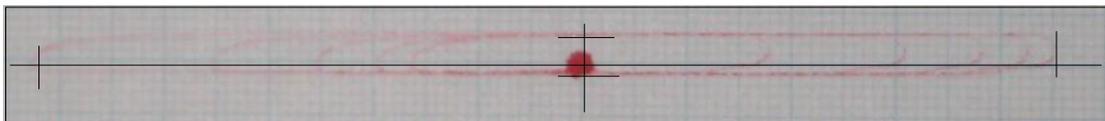


Figura 3.27 1,5 Hz, escala X 1%

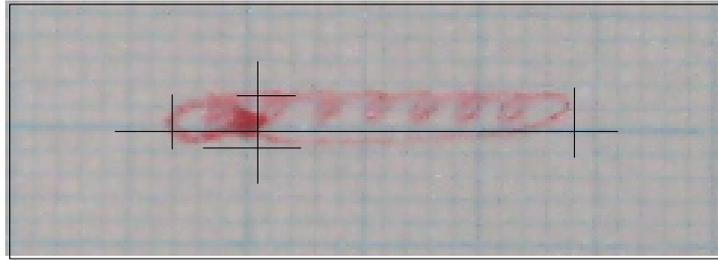


Figura 3.28 15 Hz, escala X 1%

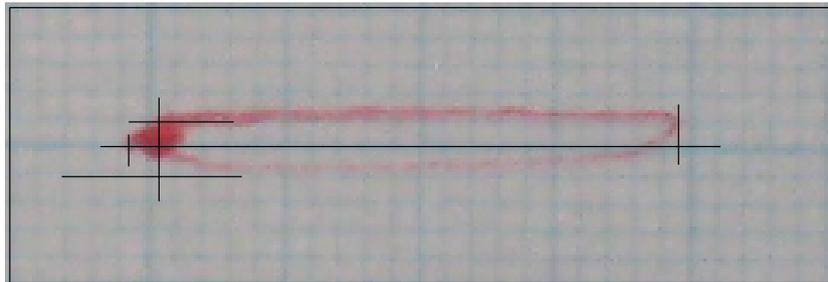


Figura 3.29 30 Hz, escala X 1%

Para desplazamiento máximo 4 cm



Figura 3.30 0,15 Hz, escala X 5%

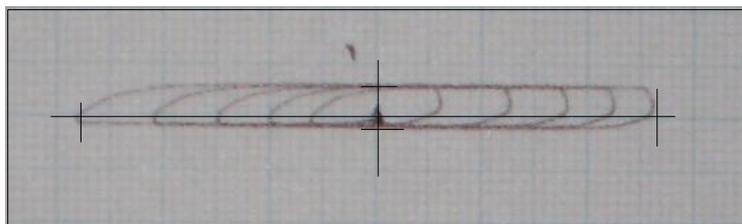


Figura 3.31 1,5 Hz, escala X 2%

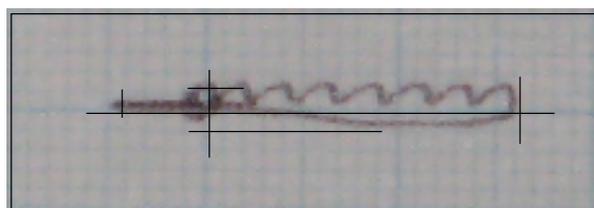


Figura 3.32 15 Hz, escala X 1%

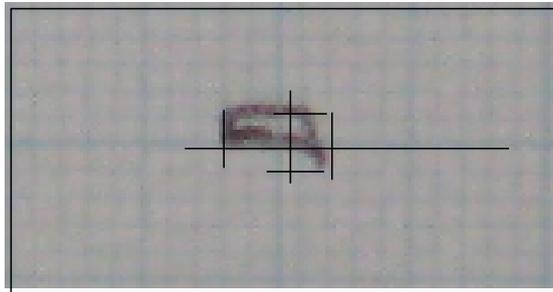


Figura 3.33 30 Hz, escala X 1%

Para desplazamiento máximo 6 cm

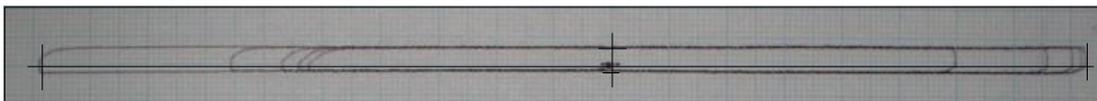


Figura 3.34 0,15 Hz, escala X 5%



Figura 3.35 1,5 Hz, escala X 1%

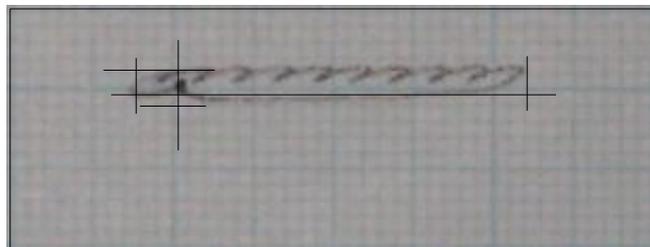


Figura 3.36 15 Hz, escala X 1%

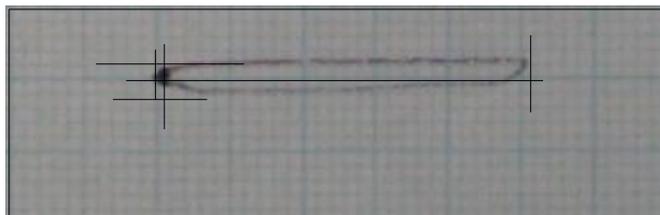


Figura 3.37 30 Hz, escala X 1%

Los resultados obtenidos de las gráficas se muestran en las tablas a continuación, se incluye también el cálculo de la elasticidad y coeficiente de amortiguamiento efectivos (comparado con los valores del lector digital con un porcentaje de error). Igualmente se pueden calcular las áreas según la escala y como si fueran una elipse. Las fórmulas se indican posteriormente:

Tabla 3.8 Medidas de los bucles ensayo dinámico

Frecuencia (Hz)	Desplazamiento	D+ (mm)	D- (mm)	F+ (mm)	F-(mm)
0,15	1	44,18	43,08	1,55	0,98
	2	86,33	86,22	2,14	1,26
	3	70,67	76,09	2,4	1,77
	MÁX	94,11	112,97	3,58	1,26
1,5	1	40,01	47,41	2,54	1,71
	2	50,32	58,11	2,96	1,17
	3	25,94	27,63	2,79	1,2
	MÁX	58,06	64,59	3,1	1,2
15	1	9,06	2,81	1,24	0,84
	2	16,69	4,5	1,92	0,89
	3	16,73	4,71	1,36	0,99
	MÁX	28,5	3,45	2,03	0,94
30	1	14,73	1	1,09	0,94
	2	23,93	1,39	1,12	1,39
	3	1,75	2,8	1,48	0,99
	MÁX	32,26	0,79	1,48	1,68

Fuente: Ensayos mecánicos amortiguador telescópico hidráulico

Tabla 3.9 Elasticidad efectiva ensayo dinámico (gráficas)

Frecuencia (Hz)	Desplazamiento	D+ (mm)	D- (mm)	F+ (N)	F-(N)	k eff (N/cm)	%error
0,15	1	10,13	-9,87	153,16	-96,84	125,00	0,00
	2	20,01	-19,99	188,82	-111,18	75,00	0,00
	3	38,52	-41,48	201,44	-148,56	43,75	0,00
	MÁX	54,54	-65,46	258,88	-91,12	29,17	0,00
1,5	1	4,58	-5,42	179,29	-120,71	300,00	-100,00
	2	9,28	-10,72	215,01	-84,99	150,00	-100,00

	3	15,50	-16,50	174,81	-75,19	78,13	-150,00
	MÁX	11,36	-12,64	252,33	-97,67	145,83	-400,00
15	1	7,63	-2,37	178,85	-121,15	300,00	-100,00
	2	15,75	-4,25	204,98	-95,02	150,00	-100,00
	3	12,49	-3,51	115,74	-84,26	125,00	-400,00
	MÁX	21,41	-2,59	170,88	-79,12	104,17	-400,00
30	1	9,36	-0,64	107,39	-92,61	200,00	-100,00
	2	18,90	-1,10	89,24	-110,76	100,00	-100,00
	3	6,15	-9,85	119,84	-80,16	125,00	-400,00
	MÁX	23,43	-0,57	117,09	-132,91	104,17	-400,00

Fuente: Ensayos mecánicos amortiguador telescópico hidráulico

Tabla 3.10 Amortiguamiento efectivo ensayo dinámico (gráficas)

Frecuencia (Hz)	Desplazamiento	E (N - cm)	% error	B eff	C eff (N - s/cm)
0,15	1	487,24	-3,40	0,01	0,02
	2	1187,17	-25,96	0,01	0,01
	3	2624,84	-4,44	0,01	0,01
	MÁX	5324,29	-41,23	0,01	0,01
1,5	1	305,47	35,18	0,01	0,03
	2	724,01	23,18	0,01	0,02
	3	906,42	51,91	0,01	0,02
	MÁX	1001,89	73,42	0,01	0,02
15	1	428,85	8,99	0,01	0,04
	2	1014,43	-7,63	0,01	0,03
	3	453,99	63,87	0,01	0,02
	MÁX	1149,25	59,35	0,01	0,03

Tabla 3.10 Amortiguamiento efectivo ensayo dinámico (gráficas)
(Continuación)

Frecuencia (Hz)	Desplazamiento	E (N - cm)	% error	B eff	C eff (N - s/cm)
30	1	315,93	-0,56	0,01	0,03
	2	657,70	-4,68	0,01	0,02
	3	370,69	70,50	0,01	0,02
	MÁX	978,17	65,40	0,01	0,03

Fuente: Ensayos mecánicos amortiguador telescópico hidráulico

3.6 DETERMINACIÓN DE LA FIABILIDAD Y EFICIENCIA DEL AMORTIGUADOR

3.6.1 CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES

La elasticidad efectiva para cada ciclo de carga puede ser calculada como:

$$k_{eff} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|} \quad (3.1)$$

donde F^+ y F^- son las fuerzas positivas y negativas para Δ^+ y Δ^- respectivamente.

La relación de amortiguamiento efectiva para cada ciclo de carga puede ser calculada como:

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \frac{E_{loop}}{k_{eff} (|\Delta^+| + |\Delta^-|)^2} \quad (3.2)$$

donde la energía disipada por ciclo de carga E_{loop} (área del bucle), y la elasticidad efectiva k_{eff} pueden ser obtenidos en las pruebas de control de desplazamiento para Δ^+ y Δ^- .

Como se había mencionado anteriormente se tomaron los datos de las masas de los dos dispositivos que se indican en la Tabla a continuación:

Tabla 3.11 Masas de los amortiguadores hidráulicos

Código o serie	Masa (Kg)
P163Z	1,425
P348Z	1,436

Fuente: Ensayos mecánicos amortiguador telescópico hidráulico

Se seleccionó el dispositivo de menor masa, es decir el P163Z, para realizar los ensayos ya que al tener menor masa no afecta de manera significativa en el análisis modal de las simulaciones posteriores.

Para obtener el coeficiente de amortiguamiento c_{eff} se utiliza la relación de amortiguamiento y la elasticidad efectivos obtenidos anteriormente. La frecuencia natural del amortiguador ω_A se puede obtener como:

$$\omega_A = \sqrt{\frac{k_{eff}}{m_A}} \quad (3.3)$$

El coeficiente de amortiguamiento crítico y la relación de amortiguamiento se pueden observar en las ecuaciones (2.7) y (2.8) por lo tanto:

$$c_{eff} = 2m_A \sqrt{\frac{k_{eff}}{m_A}} \beta_{eff} \quad (3.4)$$

Los resultados utilizados para el cálculo de las propiedades son aquellos obtenidos en el análisis dinámico ya que el análisis mecánico nos muestra la conducta inherente al amortiguador.

Igualmente se puede observar que a frecuencias más altas el amortiguador ya no da una respuesta viscosa pura por lo que su comportamiento ante la vibración depende mayormente del componente elástico.

El amortiguador ofrece mayor resistencia al movimiento a mayores velocidades, lo que indica un comportamiento cercano al lineal. Se puede ver que las gráficas se ven afectadas en la sensibilidad por lo que da un porcentaje de error alto, por lo que los valores más útiles provienen del lector digital.

Para obtener el exponente de amortiguamiento utilizado en las simulaciones se utiliza la ecuación (2.20) para obtener la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{\log F - \log C}{\log(\omega \Delta_{máx})} \quad (3.5)$$

donde F es la fuerza máxima de respuesta y $\omega\Delta_{máx}$ es la velocidad máxima para el movimiento armónico del amortiguador. Los resultados obtenidos del ensayo dinámico se muestran a continuación:

Tabla 3. 12 Exponentes de amortiguamiento

Frecuencia (Hz)	Desplazamiento	Exponente
0,15		-
	1	76,6278261
	2	7,85195923
	3	4,06995477
	MÁX	3,23446948
1,5	1	2,064249
	2	1,69501395
	3	1,44168794
	MÁX	1,38875607
15	1	1,01867376
	2	0,95005148
	3	0,86329065
	MÁX	0,85765296
30	1	0,84520354
	2	0,80486842
	3	0,77297304
	MÁX	0,77309973

Fuente: Ensayos mecánicos amortiguador telescópico hidráulico

El valor aproximado es de 1 obtenido de los valores del lector digital, aunque la gráfica nos muestra un comportamiento parecido al de un amortiguador viscoso (elipse), por lo que se puede asumir como valor del exponente de amortiguamiento para utilizar en las simulaciones siendo cercano a los valores de frecuencia y desplazamiento (15 Hz, 1cm). Vale recordar que la respuesta crítica aparece cuando el sismo se acerca la estructura a su período natural de vibración. Además los otros valores no pueden ser considerados ya que varían con respecto al crítico con más del 15% por lo que está fuera de lo que indica la norma de los ensayos.

3.6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los valores a ser utilizados en la simulación se especifican a continuación:

Tabla 3.13 Valores a utilizar en la simulación

Valores para el análisis lineal	
Elasticidad efectiva (N/cm)	0
Coefficiente de amortiguamiento efectivo (N – s/cm)	1,5
Valores para el análisis no lineal	
Elasticidad (N/cm)	150
Coefficiente de amortiguamiento (N – s/cm)	1,5
Exponente de amortiguamiento	1

Fuente: Ensayos mecánicos amortiguador telescópico hidráulico

La masa será de 1,43 Kg (0,0143 N – s²/cm), lo cual no afecta al análisis modal al ser una masa muy pequeña con respecto al resto de la estructura.

Los valores obtenidos para el amortiguador de prueba no nos pueden dar una respuesta verdadera debido a que se trata de un prototipo en escala pequeña, sin embargo nos puede dar una idea para poder implementar otro tipo de amortiguador.

Observando los valores obtenidos se puede asumir que el amortiguador servirá para disipar la energía como un elemento adicional, sin embargo no incrementa su amortiguamiento, por lo que no es útil para el propósito buscado. Este comportamiento se explica posteriormente en el análisis de resultados (Capítulo 5).

A fin de tener una idea del comportamiento óptimo de un amortiguador para cargas sísmicas, se realizará la simulación para los valores encontrados para el amortiguador de ejemplo:

Tabla 3.14 Valores a utilizar en la simulación (ejemplo)

Valores para el análisis lineal	
Elasticidad efectiva (N/cm)	0

Coefficiente de amortiguamiento efectivo (N – s/cm)	160
Valores para el análisis no lineal	
Elasticidad (N/cm)	1000000
Coefficiente de amortiguamiento (N – s/cm)	160
Exponente de amortiguamiento	1

Fuente: Ejemplo 6 – 006 SAP 2000

CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN DE PÓRTICOS SOMETIDOS A CARGAS SÍSMICAS

4.1 SELECCIÓN DEL SOFTWARE ESPECIALIZADO

Se ha seleccionado como software especializado para el presente proyecto el programa de análisis y diseño estructural SAP 2000 Versión 9. Este es un programa de cálculo estructural en tres dimensiones por medio de análisis de elementos finitos.

Se ha optado por esta alternativa ya que el programa SAP 2000 presenta ciertas ventajas determinantes con respecto a otros programas, las cuales se enumeran a continuación:

- a) Es muy conocido en proyectos de análisis de estructuras y dispositivos de disipación de energía, ya que debido a su masiva utilización, existen gran variedad de manuales y ejemplos que son de gran utilidad como guías para el presente proyecto.
- b) Pone a disposición una gran variedad de opciones y alternativas de diseño. Por medio de este programa se pueden diseñar geometrías complejas e irregulares para su análisis, definir complicados estados de cargas (como sismos, viento, vehículos en un puente, etc.) y resolver problemas fácilmente.
- c) Presenta una gran base de datos de elementos estructurales, materiales y elementos no lineales, así como de procedimientos de análisis y diseño basados en normas internacionales para construcción de estructuras en ingeniería civil y mecánica.
- d) Para todos los casos de análisis y diseño presenta plantillas predeterminadas que facilitan en gran medida la interpretación de resultados del análisis realizado.

- e) Es un programa que presenta una interfaz manejable y es amigable con el usuario lo cual facilita la entrada de datos para el diseño de la estructura que se va a analizar.
- f) Es presentado como parte de la materia de Estructuras Metálicas en la Carrera de Ingeniería Mecánica, lo que permite manejar más fácilmente el programa y aportar con mayores conocimientos a la carrera.

4.2 DISEÑO DE DISPOSICIONES Y DIMENSIONES

4.2.1 DISEÑO DE DISPOSICIONES

El presente proyecto, como ya se ha mencionado, consiste en el análisis de un pórtico, el cuál es el elemento estructural base de cualquier edificación. Un pórtico, como ya fue definido en el Capítulo 2, es una estructura continua formada por nudos rígidos, los cuales además de transmitir cargas axiales, transmiten momento flector.

Un pórtico puede presentar varias disposiciones de acuerdo a los estados de carga que se presenten sobre el mismo. En el presente proyecto la disposición de elementos estructurales seleccionada para el pórtico consiste en dos columnas, colocadas a 90° con respecto a la horizontal, unidas por nudos rígidos a una viga situada de forma paralela a la horizontal, como se puede observar en la Figura 4.1.

Esta disposición ha sido seleccionada ya que es la disposición más general y sencilla de un pórtico, lo que favorece a establecer parámetros generales y básicos para el presente proyecto de investigación.

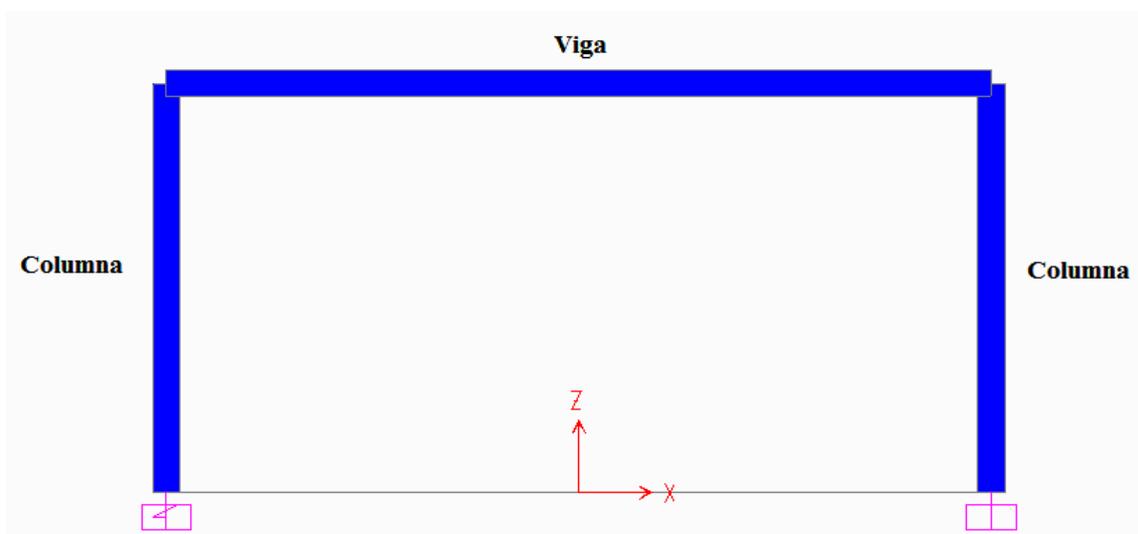


Figura 4.1 Disposición física del pórtico

4.2.2 DIMENSIONES DEL PÓRTICO

Las dimensiones del pórtico que han sido seleccionadas son presentadas en los planos estructurales del pórtico (Ver Anexo E). Las mismas fueron seleccionadas debido a que son medidas utilizadas comúnmente en varios tipos de edificaciones (altura de columna 3000 mm, largo de la viga 6000 mm).

Se seleccionó el perfil de acero W 8X10 (las medidas se encuentran en el Anexo E, ya que es un perfil liviano comúnmente utilizado para pórticos sin carga externa es decir que soportan únicamente su propio peso o también llamada carga muerta).

Debido a que el presente proyecto es esencialmente una investigación, no fue necesario realizar un diseño exhaustivo para determinar las dimensiones y secciones óptimas de los elementos utilizados para un análisis, únicamente se necesita observar el comportamiento de la estructura seleccionada ante cargas que se ingresarán posteriormente.

También se tomo en cuenta que la estructura debía ser homogénea, es decir las columnas y la viga se ingresaron en el análisis con las mismas propiedades y secciones.

4.3 ANÁLISIS ESTÁTICO Y DINÁMICO DEL PÓRTICO SIN AMORTIGUADOR

4.3.1 ANÁLISIS ESPECTRAL

El pórtico sin amortiguador estará sometido solamente a cargas sísmicas y al peso propio de la estructura.

El análisis espectral se basa en la ecuación:

$$Ku(t) + C\dot{u}(t) + M\ddot{u}(t) = m_x\ddot{u}_{gx}(t) + m_y\ddot{u}_{gy}(t) + m_z\ddot{u}_{gz}(t) \quad (4.1)$$

donde K es la matriz de elasticidad, C es la matriz de amortiguamiento, y M es la matriz diagonal de masa, m es la carga de aceleración direccional y \ddot{u}_g es la aceleración del suelo. La respuesta modal se obtiene por una combinación estadística indicada posteriormente (CQC).

Para el análisis de cargas sísmicas se ha optado por incluir en el análisis del pórtico una carga sísmica determinada por un espectro, el cual es obtenido según el seguimiento de la norma CEC 2000.

Se deben determinar algunas variables para poder construir grafica y numéricamente el espectro sísmico presentado por la norma CEC 2000 y detallado en el Capítulo 2:

- El período fundamental de la estructura que puede ser aproximado mediante las Ecuaciones 2.38 y 2.39, sin embargo como no se trata de una edificación compleja se obtiene el periodo fundamental con el análisis modal del pórtico en SAP 2000 el cual es 0.06504 s (estructura rígida).
- El coeficiente de suelo y el valor de la respuesta máxima son 1 y 2.5 respectivamente. Estos valores corresponden a un perfil de suelo S1 (roca o suelo firme) asumido para el siguiente proyecto por ser un suelo ideal, se encuentran en la Tabla 2.3.

Para construir la curva del espectro definido por el CEC 2000 (Figura 2.39), se deberá iniciar obteniendo el valor del C máximo, para dicho propósito se debe utilizar la Ecuación 2.37:

$$C = \frac{1.25S^S}{T} = \frac{1.25 \cdot 1^1}{0.06504} = 19.21 \quad (4.2)$$

El CEC 2000 restringe el valor de C máximo hasta 2.5, por tanto el valor obtenido no es válido y deberá utilizarse el valor de 2.5 como el máximo valor de C .

El valor de 2.5 será constante hasta el punto en que el valor de C calculado cambie a un valor menor al ya mencionado de acuerdo a la Ecuación 4.2. Se obtiene los valores de las abscisas (período natural de la estructura) y ordenadas (factor de espectro elástico) de la curva de espectro, y se realiza la gráfica utilizando el programa Excel.

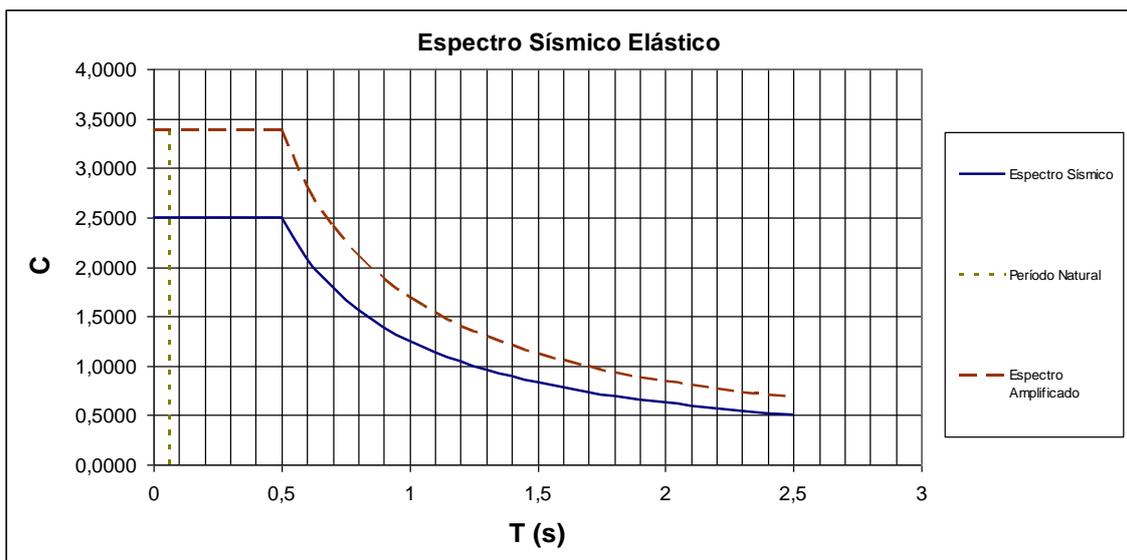


Figura 4.2 Espectro sísmico de acuerdo a la norma CEC 2000

En la Figura 4.2, se presenta también la gráfica del espectro amplificado, que es el espectro que corresponde al amortiguamiento real de la estructura que es de 2% por ser un pórtico metálico (Tabla 4.2).

Tabla 4.1 Relaciones de amortiguamiento típico para estructuras

Descripción del tipo de Construcción	Amortiguamiento ξ
Pórtico de acero, soldado, con todos los muros de construcción flexible	0.02
Pórtico de acero, soldado o apernado, con revestimiento rígido y con todos los muros interiores flexibles	0.05
Pórtico de acero soldado o apernado, con muros de cortante de hormigón	0.07
Pórtico de hormigón con todos los muros de construcción flexible	0.05
Pórtico de hormigón, con revestimiento rígido y todos los muros interiores flexibles	0.07
Pórtico de hormigón, con muros de cortante de hormigón o mampostería	0.10
Edificios con muros de cortante de hormigón y/o mampostería	0.10
Construcción de muros de cortante de madera	0.15

Fuente: http://www.umss.edu.bo/epubs/etexts/downloads/19/cap_XII.htm

Para modificar la curva del espectro original se utilizaron ciertos factores de amplificación los cuales se presentan a continuación:

Tabla 4.2 Factores de amplificación para curvas espectrales

Amortiguamiento ξ (%)	Media (50%)			Desviación estándar, 1σ (84.1 %)		
	α_A	α_V	α_D	α_A	α_V	α_D
1	3.21	2.31	1.82	4.38	3.38	2.73
2	2.74	2.03	1.63	3.66	2.92	2.42
5	2.12	1.65	1.59	2.71	2.30	2.01
10	1.64	1.37	1.20	1.99	1.84	1.69
20	1.17	1.08	1.01	1.26	1.37	1.38

Fuente: http://www.umss.edu.bo/epubs/etexts/downloads/19/cap_VIII.htm

El procedimiento para modificar el espectro original se basa en realizar una amplificación de los valores originales del espectro en la gráfica, para de esta manera obtener los valores que conformarán la curva de espectro amplificada.

En la Tabla 4.3 se toma el valor de amortiguamiento de 5% y se observa el valor correspondiente de α_A que es 2.71, y de la misma manera se toma el valor de amortiguamiento para 2 % de α_A que es 3.66, se procede a obtener el factor de amplificación η que modificará a la curva original. Por lo tanto los valores de C máximo y de C se multiplicarán por el factor obtenido en la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\alpha_{a\ 5\%}}{\alpha_{a\ 2\%}} = \frac{3.66}{2.71} = 1.35$$

$$C_{m_{2\%}} = C_{m_{5\%}} \eta = 2.5 \cdot 1.35 = 3.37 \quad (4.3)$$

$$C_{2\%} = C_{5\%} \eta$$

De la misma manera se procede a construir el espectro amplificado. A continuación se presentan los valores de ordenadas y abscisas del espectro amplificado, la curva se la puede observar en la Figura 4.2.

Los valores obtenidos se ingresarán posteriormente en la simulación. La aceleración espectral obtenida indica la respuesta máxima de la estructura ante la carga sísmica, ya sea en forma de análisis dinámico, o como una fuerza horizontal equivalente producto de la aceleración del suelo.

4.3.2 FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE

De igual manera que la sección anterior se utiliza la norma del CEC 2000 detallada en el Capítulo 2 para determinar la fuerza horizontal equivalente. Para esto se utiliza los siguientes parámetros:

- El factor de zona sísmica Z es de 0.4 y se encuentra en tablas y diagramas del CEC 2000 (Anexo F).
- El factor de importancia I es de 1.0 (según la Tabla 2.5) y se refiere a estructuras no clasificadas en el código.
- El coeficiente de respuesta sísmica C es obtenido en el análisis espectral en la sección anterior.
- El factor de reducción de respuesta estructural R se encuentra en la Tabla 2.4 y es de 3 correspondiente a las estructuras no descritas en el código.
- Debido a que no se trata de una estructura irregular los factores ϕ_p y ϕ_l son 1.
- La carga muerta total W solamente incluye el peso propio del pórtico que es obtenido de la siguiente manera:

El área de la sección A_T del perfil W 8X10 es de 19.0967 cm^2 (según las propiedades especificadas en el SAP 2000 y en tablas de perfiles¹²) y la densidad del acero ρ_A es de 7.85 g/cm^3 . La masa de la viga M_V obtenida utilizando su largo $L_V = 600 \text{ cm}$ se obtiene como:

$$M_V = A_T \cdot L_V \cdot \rho_A = 19.067 \cdot 600 \cdot 7.85 = 89945.46 \text{ g} = 89.94546 \text{ kg} \quad (4.4)$$

La masa de la viga M_C obtenida utilizando su largo $L_C = 300 \text{ cm}$ se obtiene como:

$$M_C = A_T \cdot L_C \cdot \rho_A = 19.0697 \cdot 300 \cdot 7.85 = 44972.73 \text{ g} = 44.97273 \text{ kg} \quad (4.5)$$

La masa total del pórtico M_T se obtiene sumando la masa de la viga y dos veces la masa de la columna como se indica a continuación:

$$M_T = M_V + 2M_C = 89.94546 + 2(44.97273) = 179.89 \text{ kg} \quad (4.6)$$

De acuerdo a esto se aplica la Ecuación 2.36 para obtener la fuerza horizontal equivalente, la masa total del pórtico se multiplica por la gravedad 9.81 m/s^2 :

$$V = \frac{ZIC}{R\phi_p\phi_E} W = \frac{0.4 \cdot 1 \cdot 2.5}{3 \cdot 1 \cdot 1} \cdot 179.89 \cdot 9.81 = 588.24 \text{ N} \quad (4.7)$$

Este valor es obtenido para estructuras de concreto (con amortiguamiento 5%) por lo tanto se debe considerar el factor de respuesta amplificado para una amortiguamiento de 2%:

$$V_{amp} = \frac{ZIC_{amp}}{R\phi_p\phi_E} W = \frac{0.4 \cdot 1 \cdot 3.37}{3 \cdot 1 \cdot 1} \cdot 179.89 \cdot 9.81 = 794.12 \text{ N} \quad (4.8)$$

$$\frac{794.12}{179.89 \cdot 9.81} = 0.449$$

Como se puede observar este valor es cercano al 45% de la carga muerta por lo que se encuentra en un valor aceptable para el diseño.

4.3.3 ANÁLISIS POR HISTORIA DEL TIEMPO

En el análisis se incluirá un acelerograma, el cual se encarga de simular un sismo en SAP 2000 por medio de una curva de aceleración que varía en el tiempo. El acelerograma utilizado es el del sismo "El Centro", ocurrido en Imperial Valley, California, en Mayo de 1940, y que tuvo una magnitud de 7.1 grados en la escala de Richter. La variación de la aceleración (en función de la gravedad) en el tiempo se muestra en la Figura 4.3. Este es el acelerograma más comúnmente utilizado para simulaciones de cargas sísmicas. Para este objetivo se utilizarán 1560 valores de aceleración con intervalos de 0.02 segundos.

¹² Mecánica de Materiales, Roy R. Craig

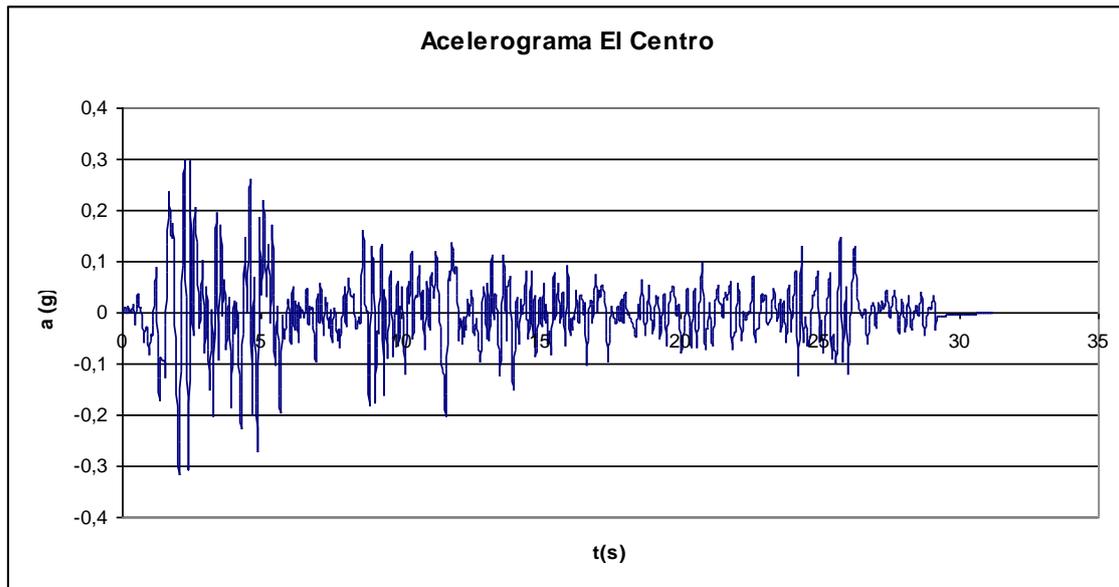


Figura 4.3 Acelerograma del sismo “El Centro”

La ecuación de movimiento a ser resuelta por el SAP 2000 sería:

$$Ku(t) + C\dot{u}(t) + M\ddot{u}(t) = r(t) \quad (4.9)$$

donde $u(t)$ es el desplazamiento de la estructura, y r es la carga aplicada. Si esta carga aplicada incluye movimiento del suelo, entonces los desplazamientos, velocidades y aceleraciones son relativas con respecto al suelo.

El análisis por historia del tiempo considera los siguientes parámetros:

- Se realiza un análisis lineal para determinar la respuesta la estructura dentro del rango elástico, y un análisis no lineal para determinar la respuesta de la estructura dentro del rango no lineal, tanto para el pórtico como los dispositivos.
- Se basa en el análisis modal el cual se resuelve según el análisis de eigenvectores.

El análisis de eigenvectores determina las formas modales para vibración libre no amortiguada y las frecuencias del sistema. Involucra la solución de la ecuación de eigenvalores:

$$([K] - \Omega^2 \cdot [M]) \cdot \{\Phi\} = 0 \quad (4.10)$$

donde K es la matriz de rigidez, M es la matriz diagonal de masa, Ω es la matriz diagonal de eigenvalores, y Φ es la matriz de los correspondientes eigenvectores (formas modales). Cada par de eigenvalor – eigenvector es llamado modo de vibración natural de la estructura. El eigenvalor es el cuadrado de la frecuencia circular ω .

Se toma en cuenta el análisis de eigenvectores debido a que es una estructura simple. Un análisis complejo es el de vectores de Ritz, los cuales son dependientes de la carga.

- Se realiza un análisis transiente ya que la carga aplicada es un evento de una sola vez con un comienzo y un final.

La carga aplicada se basa en la ecuación:

$$r = \sum_i f_i(t) p_i \quad (4.11)$$

donde $f_i(t)$ es la función de la carga en el tiempo (en este caso el acelerograma), y p_i la carga espacial (en este caso la masa de la estructura).

La estructura se evalúa con el análisis modal en espacios de tiempo iguales aplicando las ecuaciones de interpolación lineal. 2.46, 2.47 y 2.48. Esto significa que se evalúa una respuesta de la estructura para cada espacio de tiempo en el que se encuentre dividida la función.

4.4 ANÁLISIS ESTÁTICO Y DINÁMICO DEL PÓRTICO CON AMORTIGUADOR

4.4.1 ANÁLISIS ESPECTRAL

Tanto el análisis espectral como el de historia del tiempo toman como base el análisis de la respuesta modal para realiza el estudio ante la carga sísmica simulada. Por lo tanto los coeficientes de amortiguamiento de los dispositivos

son convertidos a amortiguamiento modal, incluyéndolos en la matriz de amortiguamiento.

El amortiguamiento considerado para realizar el espectro (2% del crítico), no se ve afectado por el amortiguamiento adicional del dispositivo, por lo tanto los valores de aceleración espectral son los mismos ingresados inicialmente, para el amortiguamiento de la estructura para todos los modos.

Sin embargo la relación de amortiguamiento obtenida como resultado del análisis espectral si se ve incrementada, ya que es la suma del amortiguamiento puesto inicialmente (método CQC) y el de los elementos no lineales.

4.4.2 FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE

Según la norma ASCE 7 – 05, en la sección de dispositivos de amortiguamiento viscoso, la fuerza horizontal equivalente no debe ser menor que el mayor valor obtenido de las siguientes ecuaciones:

$$V_{\min} = \frac{V}{B_{V+1}} \tag{4.12}$$
$$V_{\min} = 0.75V$$

donde V es la fuerza horizontal equivalente obtenida en la Ecuación 4.7 o por medio de la Ecuación 2.35 para la ASCE 7 – 05; y B_{V+1} es un coeficiente numérico obtenido de la Tabla . Este coeficiente representa la suma del amortiguamiento viscoso del dispositivo (que debe ser sólo uno en cada nivel de la edificación) más el amortiguamiento inherente en el modo fundamental de la estructura.

Tabla 4.3 Coeficiente para el amortiguamiento B_{V+1}

Amortiguamiento efectivo (en porcentaje del crítico)	B_{V+1}
≤2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.8
40	2.1
50	2.4
60	2.7
70	3.0
80	3.3
90	3.6
≥100	4.0

Fuente: Tabla 18.6 – 1, ASCE 7 – 05

Debido a la complejidad del cálculo en esta norma se asume como fuerza horizontal equivalente a la mínima obtenida en la Ecuación 4.12 El amortiguamiento total se obtiene del análisis espectral que para el caso es de 2.5%. Interpolando se obtiene un valor cercano a 0.9.

Entonces la fuerza horizontal equivalente es:

$$V_{\min} = \frac{V}{B_{V+1}} = \frac{588.24}{0.9} = 653.6N \quad (4.13)$$

$$V_{\min} = 0.75V = 0.75 \cdot 588.24 = 441.18N$$

4.4.3 ANÁLISIS POR HISTORIA DEL TIEMPO

El amortiguador afecta en el coeficiente de amortiguamiento de la ecuación de movimiento de la estructura 4.7, es decir se debe considerar las propiedades del amortiguador en la matriz de amortiguamiento. Al contrario del análisis espectral la relación de amortiguamiento es considerado en el amortiguamiento del análisis modal en el ingreso de los datos (propiedades del amortiguador).

Las propiedades del amortiguador varían para el análisis lineal y el no lineal. Para un análisis no lineal el comportamiento viscoso se encuentra en serie con el comportamiento elástico. Al contrario en el análisis lineal el comportamiento viscoso se encuentra en paralelo con el comportamiento elástico. Esto se muestra en la Figura 4.4.

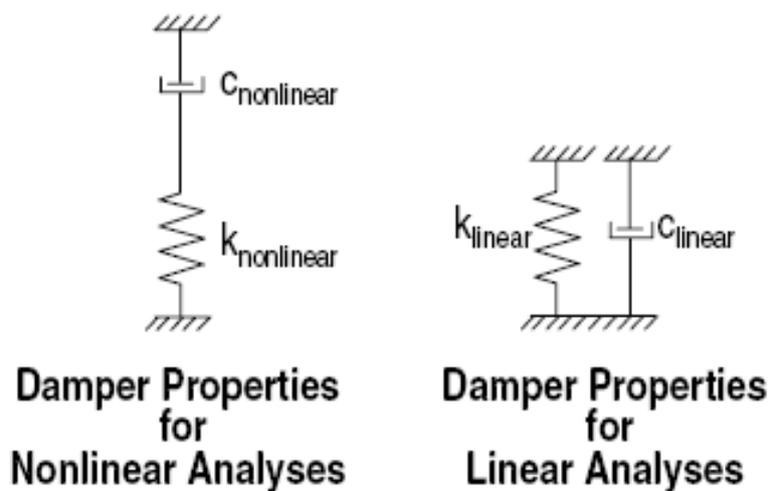


Figura 4.4 Comportamiento del amortiguador en los análisis*

Para un comportamiento puramente viscoso se debe asumir un valor de 0 en la elasticidad efectiva para el análisis lineal. Para un análisis no lineal la elasticidad debe tener un valor suficiente mente grande para que su relación con el coeficiente de amortiguamiento de un valor menor a la cantidad de pasos en la simulación y se pueda apreciar su variación ¹³

* Example 6 – 006 Link – SUNY Buffalo Damper with Linear Velocity Exponent. SAP 2000
¹³ Problema 6 – 006 SAP 2000

$$\tau = \frac{C}{K} = \frac{1.5}{150} = 0.01s \quad (4.14)$$

El valor es aceptable ya que el acelerograma tiene valores de aceleración con intervalos de 0.02 s

4.5 SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL PÓRTICO SIN AMORTIGUADOR SOMETIDO A CARGAS SÍSMICAS EN EL SOFTWARE SELECCIONADO

A continuación se explicará paso a paso el procedimiento para la simulación y el análisis estructural en el programa seleccionado:

a) Al abrir el programa SAP 2000, se presenta una ventana en blanco, en este caso en la barra superior se debe seleccionar “New Model” (Figura 4.6).

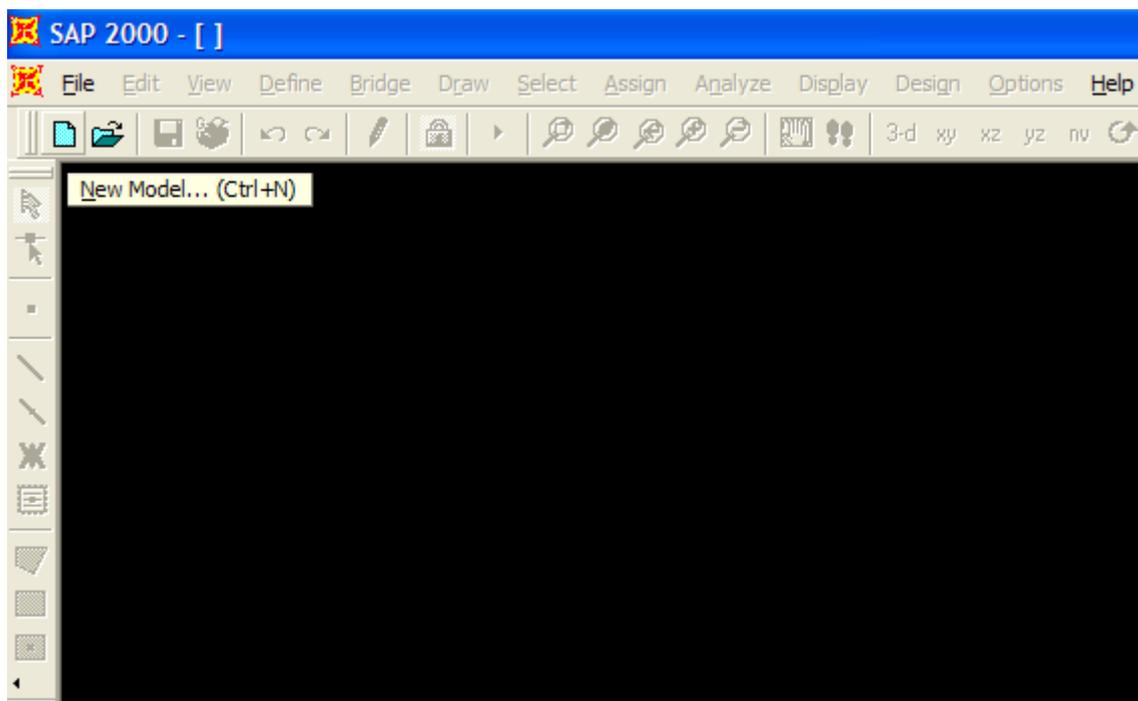


Figura 4.5 Ventana SAP 2000 – Programa seleccionado

b) Después de seleccionar nuevo modelo, se abrirá una ventana en la cuál se deberá seleccionar y fijar el sistema de unidades en el que se trabajará, así como se deberá seleccionar la estructura a ser analizada, que para el presente proyecto es un pórtico en dos dimensiones, por tanto se deberá seleccionar “2D Frames”.

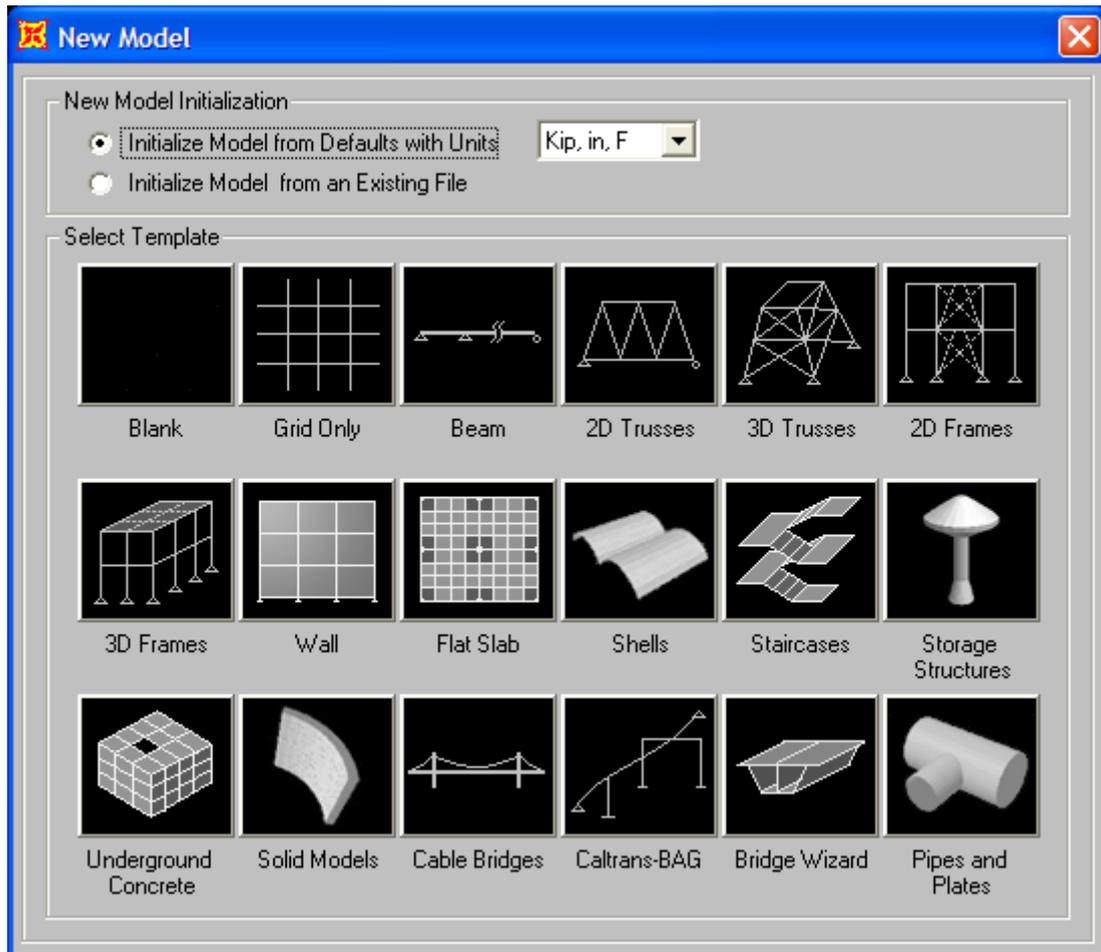


Figura 4.6 Selección de unidades y disposiciones

c) Después de haber fijado las unidades (N, cm, C) y el tipo de estructura ha ser analizada, en este caso 2D Frames, aparecerá una nueva ventana llamada “2D Frames” (Figura 4.7), en la cuál se seleccionará el número de elementos de la estructura, que para este caso son tres, así como la geometría de dichos elementos.

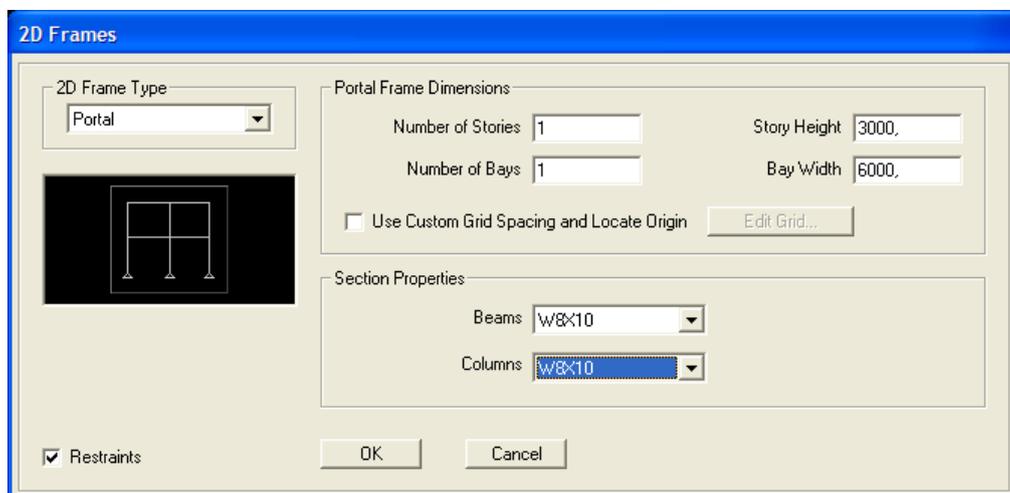


Figura 4.7 Selección de dimensiones y secciones

d) Después de seleccionar la geometría de las columnas y vigas del pórtico, su disposición y secciones, se presenta ya el modelo diseñado en la ventana del SAP 2000. Dicha ventana se encuentra dividida en dos partes, una parte con el modelo diseñado en tres dimensiones, y la otra pantalla con el modelo diseñado en dos dimensiones. Lo más funcional para el presente proyecto es cerrar la ventana del modelo en tres dimensiones y trabajar solamente con la ventana que presenta el modelo en dos dimensiones.

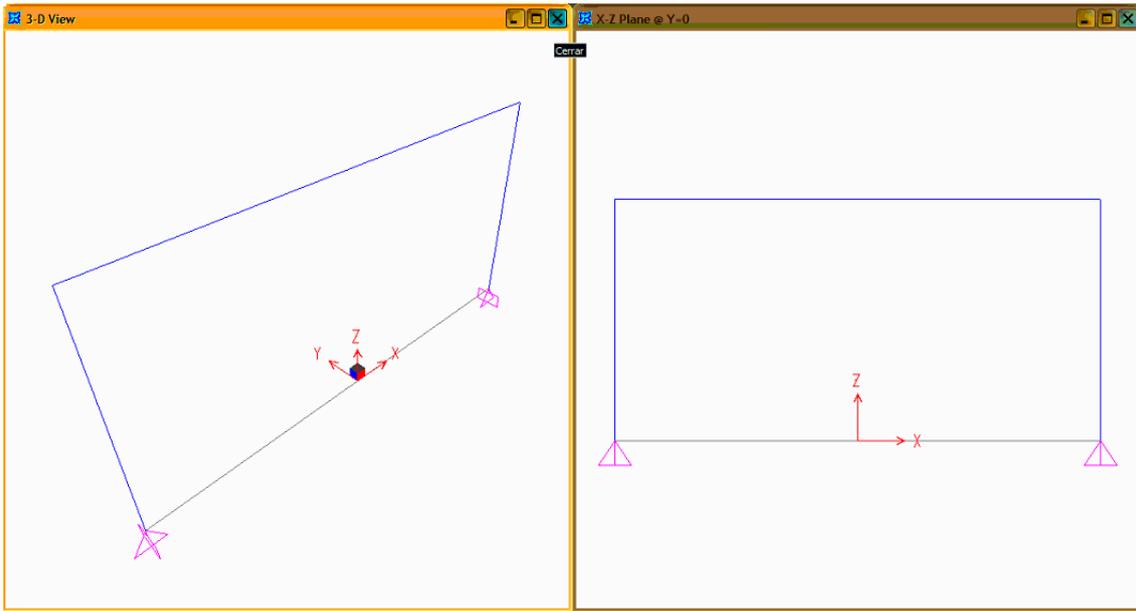


Figura 4.8 Ventana SAP2000 – Pantalla dividida

e) En el momento en que se puede trabajar solamente con la ventana que presenta la estructura en dos dimensiones, se procederá a fijar los apoyos de la columna, que para este caso son empotramientos. Para dicho propósito se debe seleccionar los dos apoyos del pórtico y dirigirse al menú “Assign”, después seleccionar “Joint” y finalmente el submenú “Restraints”, por medio del cuál se presentará una ventana llamada “Joint Restraints” (Figura 4.9), en la cuál se seleccionará empotramiento para ambos apoyos.

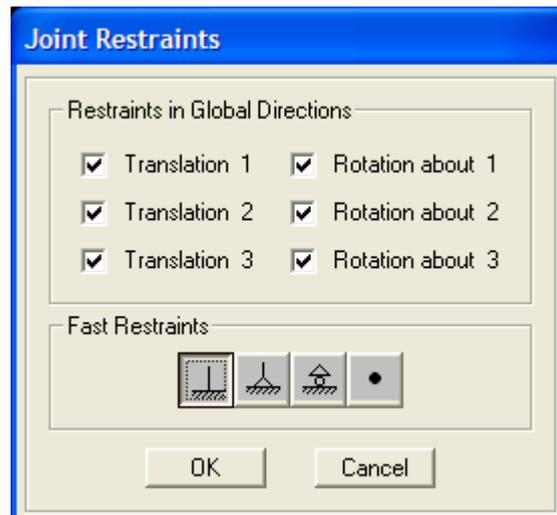


Figura 4.9 Selección de apoyos del pórtico

Cabe destacar que se ha seleccionado apoyos empotrados (“Vinculación que no permite que el elemento estructural gire o se desplace, sin ningún grado de libertad de los seis posibles: 3 posibles desplazamientos y 3 posibles giros en cada uno de los ejes ortogonales x, y, z”)¹⁴, ya que se asume que el pórtico se encuentra colocado en un suelo que brinda las características suficientes para considerar a un apoyo como empotrado. De la misma manera se considera que la construcción e instalación física de la estructura cumplen con todas las características necesarias para considerar a un apoyo como empotrado.

f) Después de haber definido el tipo de apoyos para el pórtico, se procederá a definir las cargas que actuarán sobre el pórtico. Para el primer caso se procederá a definir un espectro capaz de simular una carga sísmica acorde a la norma CEC 2000. Para ello se utilizarán los valores obtenidos en el análisis espectral, sección 4. 3.1.

Los valores de la curva de espectro del CEC 2000 deberán ser ingresados de forma manual al programa SAP 2000 para lo cual se deberá ingresar al menú “Define”, después se ingresará a “Function” y dentro de este se seleccionará el submenú “Response Spectrum”, en este instante el programa presentará una ventana llamada “Define Response Spectrum” como se puede observar en la Figura 4.10 en la cual se deberá seleccionar el comando “Add New Function” y determinar de la misma manera “User Spectrum”; para de esta manera poder ingresar el espectro manualmente en la ventana “Response Spectrum Function Definition” como se observa en la Figura 4.11.

¹⁴ <http://www.inea.uva.es/web/especiales/alojamientos/glosariox.htm>

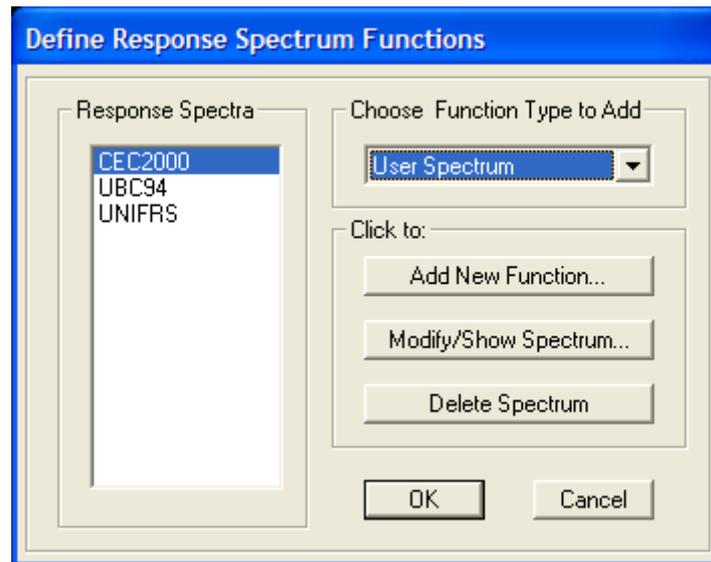


Figura 4.10 Espectro sísmico definido por el usuario

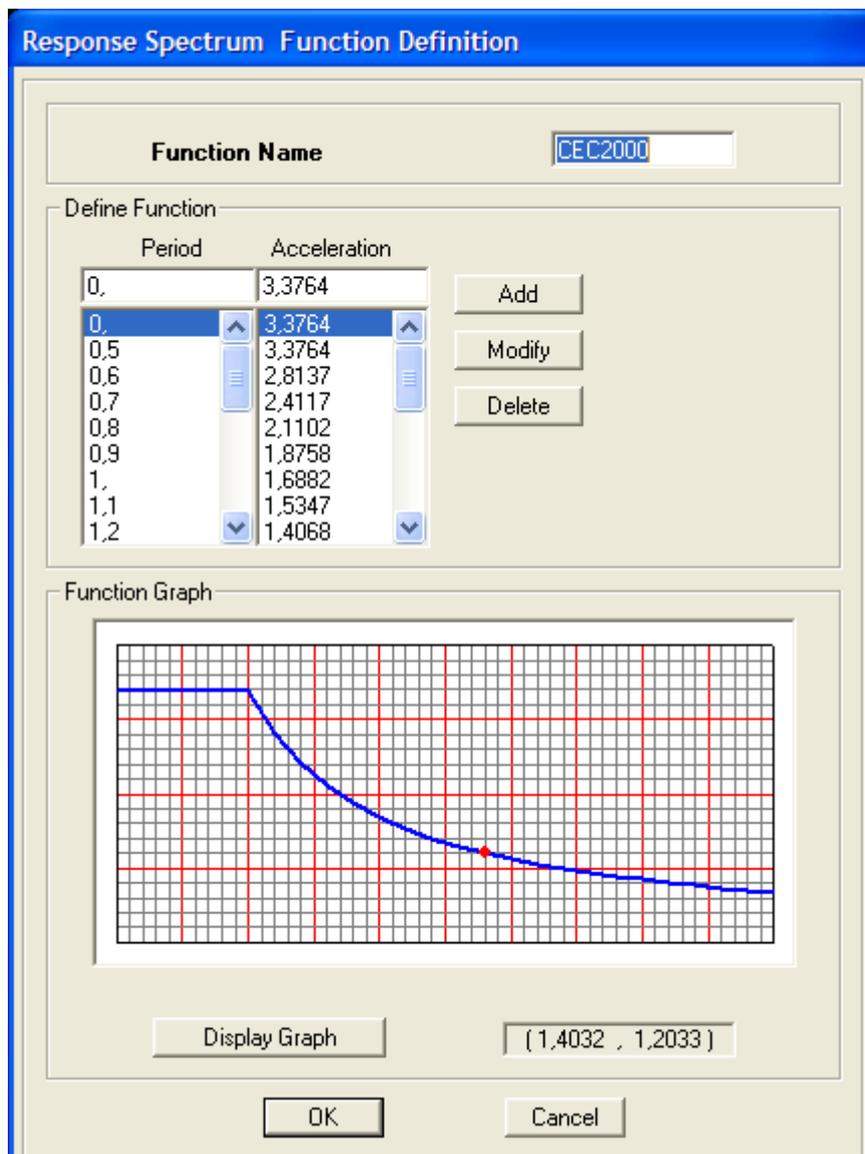


Figura 4.11 Espectro sísmico de acuerdo a la norma CEC 2000

Cabe destacar que para el presente proyecto fue utilizado también un espectro obtenido de la base de datos del programa SAP 2000, el mismo que está en concordancia con la norma UBC 94, en el cuál solamente se deben especificar el factor de zona sísmica que para este caso es 0.4, y el tipo de suelo que es 1, como se puede observar en la Figura 4.12.

Para tal propósito se deberá seguir el mismo procedimiento que se sigue en SAP 2000 con el espectro CEC 2000, con la única diferencia que en vez de seleccionar "User Spectrum" se seleccionará "UBC 94 Spectrum" (Figura 4.12).

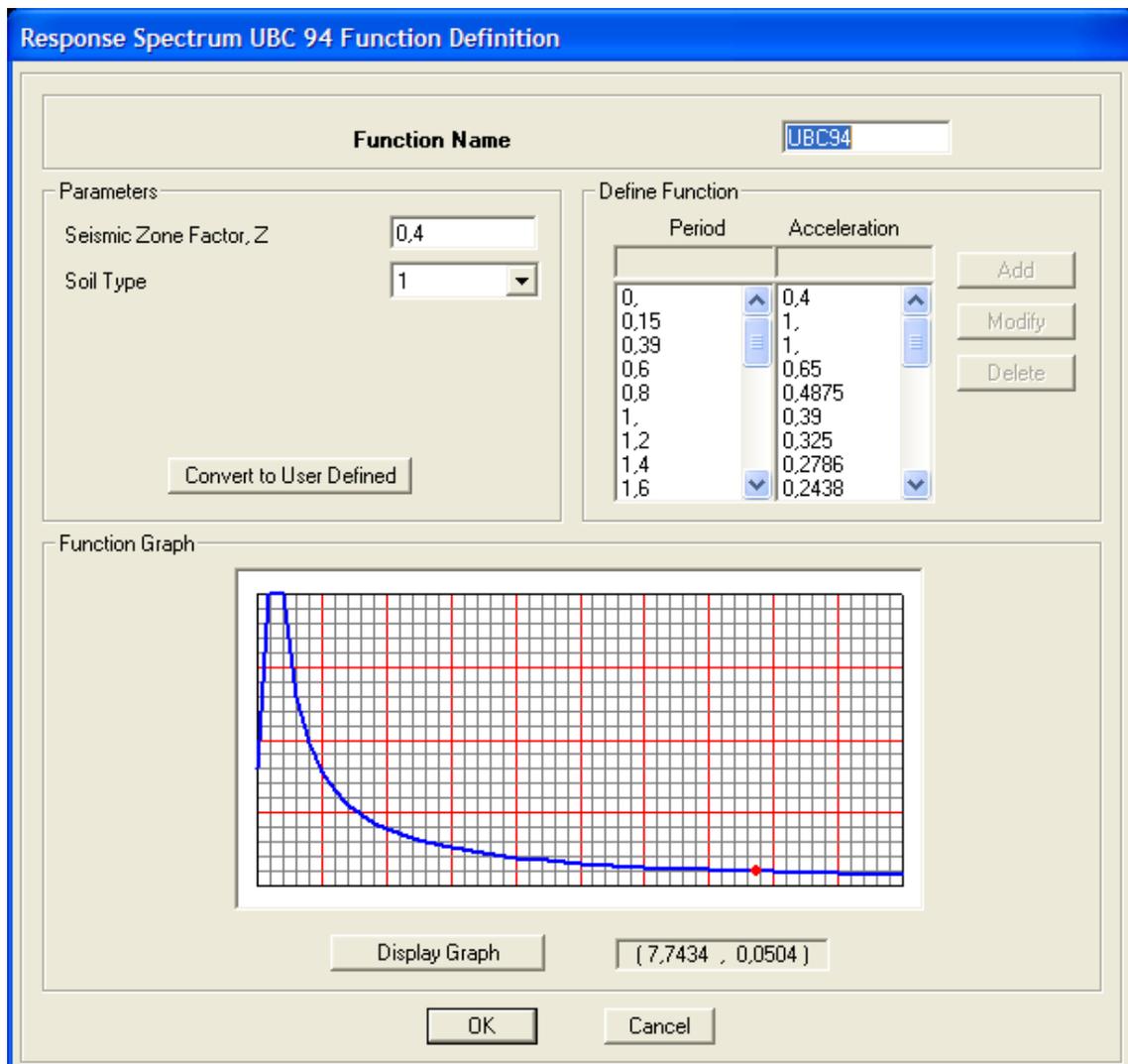


Figura 4.12 Espectro sísmico UBC 94

g) A continuación se deberá definir la carga sísmica regida por un acelerograma. Para realizar dicha acción, se deberá primeramente seleccionar un sismo predeterminado y permitido para

dicho uso por parte de una normativa. Para la mayoría de diseños se selecciona el sismo “El Centro”.

Para simular la carga sísmica por medio del acelerograma del sismo “El Centro” en el programa SAP 2000, se deberá ingresar al menú “Define”, después se ingresará a “Function” y dentro de este se seleccionará el submenú “Time History”, en este instante el programa presentará una ventana llamada “Define Time History Functions” (Figura 4.13), en la cual se presentan varias opciones para elegir el tipo de función a ser añadida, entre las cuales pueden ser seleccionadas funciones seno, funciones de archivo predeterminadas (como es el caso del sismo “El Centro”), funciones coseno, etc.

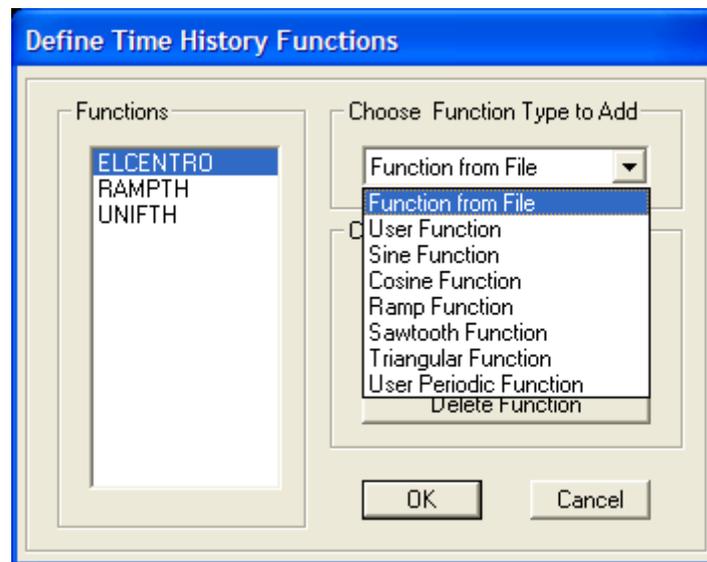


Figura 4.13 Acelerograma en función del tiempo

Después de haber seleccionado el menú “Function From File” el programa SAP 2000 presentará otra ventana, en la cual se presentan varias opciones. En dicha ventana se deberá presionar el botón “Browse” y seleccionar de esta manera uno de los archivos predeterminados, después se podrán modificar algunas características del acelerograma que se ha seleccionado como el nombre y también intervalos de función o tiempo presionando el botón “Convert to User defined”.

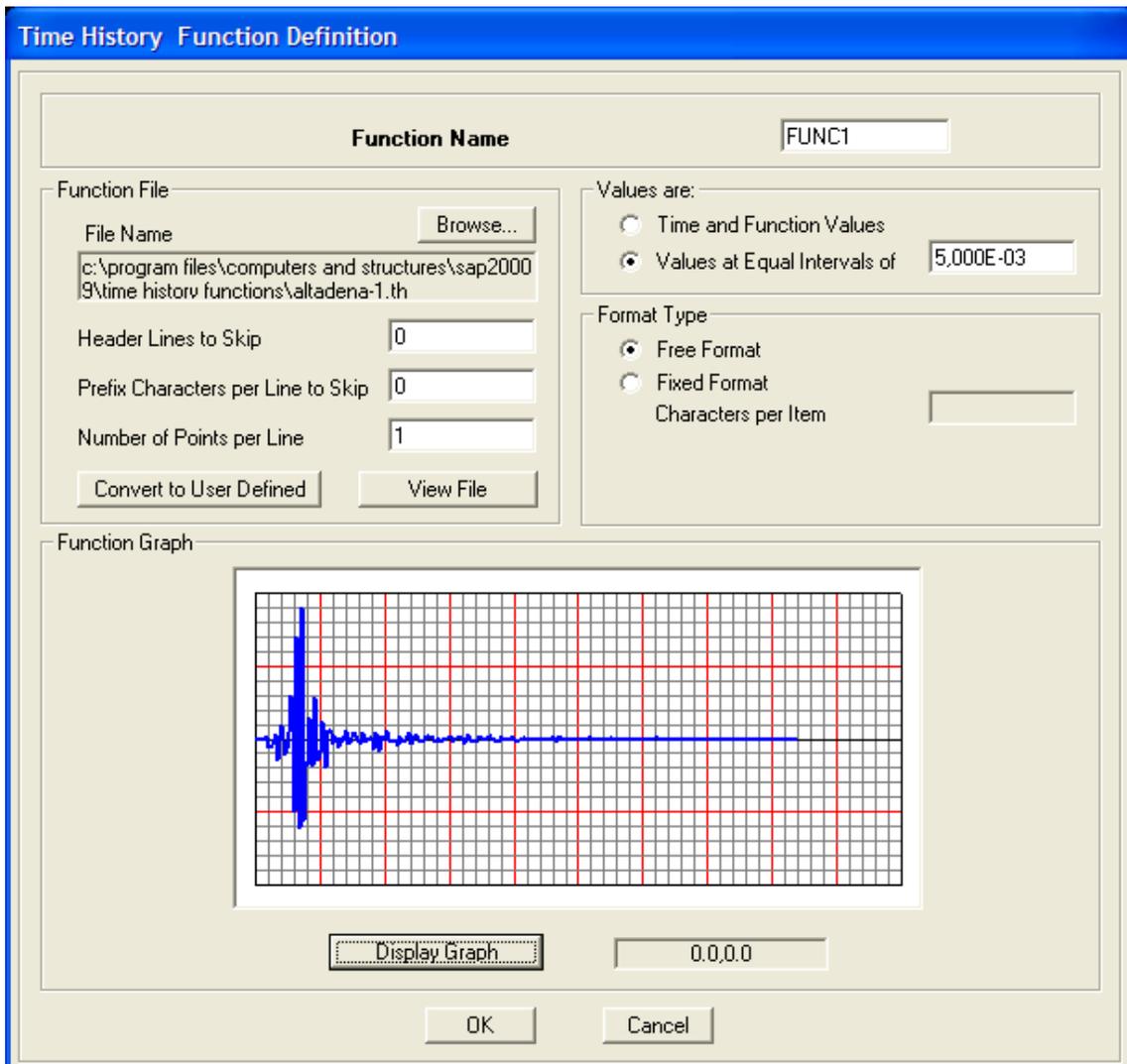


Figura 4.14 Selección Acelerograma sismo “El Centro”

De esta manera, se ha insertado la carga sísmica a ser simulada en el programa SAP 2000. Para ciertos casos se puede también insertar acelerogramas de sismos que no se encuentren en la base de datos del programa SAP 2000. Para dicho propósito se deberá seleccionar el sismo e insertar los valores de la aceleración (correspondientes a intervalos de tiempo especificados) en un archivo de Bloc de Notas, y después se deberá seguir el procedimiento anteriormente definido.

h) A continuación se deberá proceder a definir los parámetros de análisis estructural por medio de las cargas anteriormente definidas. Para este propósito se deberá seleccionar el menú “Define” después “Análisis Cases” (Figura 4.15), entonces el programa presentará una ventana en la que se presentaran varias opciones acerca de los análisis de cargas que se puedan presentar para el presente estudio, en dicha ventana se podrán añadir casos de carga que fueron previamente definidos en el programa, tal es el caso del acelerograma y el espectro sísmico.

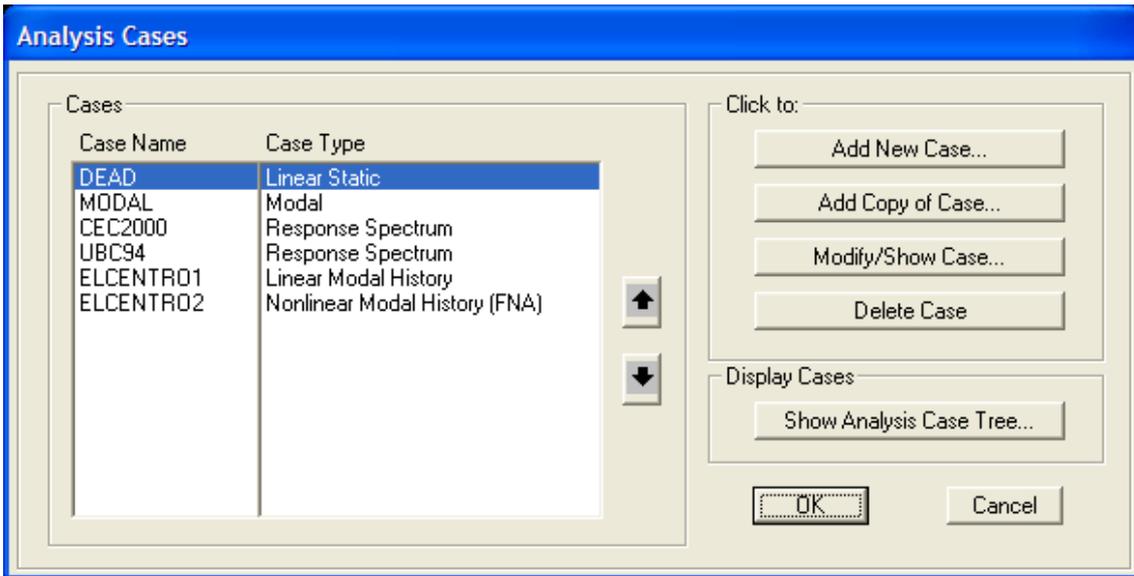


Figura 4.15 Definición de casos de análisis

Después de añadir todas las cargas que se deseen analizar por medio del menú “Add New Case” y “Analysis Case Type” en el cuál se seleccionará la naturaleza de la carga, la cual puede ser carga muerta, espectros sísmicos, acelerogramas, etc. se deberá determinar ciertos parámetros importantes para cada uno de los casos.

A continuación se presentan los procesos para la definición de parámetros y variables para cada uno de los casos de carga a ser tomados en cuenta en la simulación.

- Para el caso de la carga muerta no se realizará ningún cambio en el análisis de carga, ya que todos los parámetros predeterminados son los estrictamente necesarios para la presente simulación. Esta carga deberá ser simplemente añadida de acuerdo al procedimiento indicado anteriormente. Cabe destacar que este análisis será lineal.

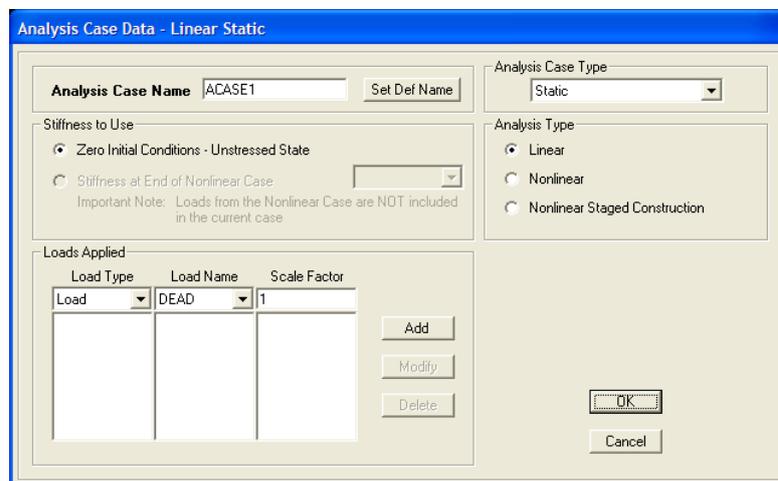


Figura 4.16 Definición de parámetros para análisis de carga muerta

- Para el caso del análisis Modal, primeramente se procederá a añadir la carga por medio del menú “Add New Case” y “Analysis Case Type”. A continuación se presentará una ventana en la que se deberán fijar todos los parámetros para el análisis modal. En este caso se deberá solamente restringir el número de modos a ser analizados a cuatro, ya que para este caso el análisis modal no requiere mayor número de modos al ser una estructura simple (de cuatro grados de libertad). Además se selecciona un análisis de eigenvectores especificado anteriormente. El análisis modal no se considera como una carga pero es necesario realizarlo como requerimiento para la construcción de los análisis posteriores

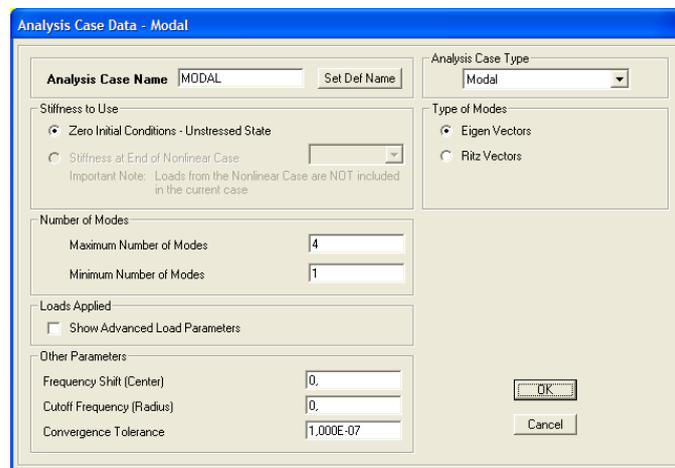


Figura 4.17 Definición de parámetros para análisis modal

- En el caso de análisis espectral, de la misma manera como en el anterior caso se deberá seleccionar el menú “Add New Case” y “Analysis Case Type”, a continuación se abrirá una ventana en la cuál se deberá seleccionar como carga a ser añadida “Response Spectrum” y de la misma manera al definir esta carga se abrirá otra ventana en la cuál se deberá definir ciertos parámetros de análisis.

En el recuadro de “Modal Combination” se deberá seleccionar “CQC” que es el método de combinación cuadrática completa, la cuál es utilizada para estructuras analizadas en dos dimensiones. A continuación en el recuadro “Loads Applied” referente a las cargas aplicadas, se deberá seleccionar la dirección “U1”, y la carga aplicada será “Accel” que se refiere a una aceleración en la dirección U1 definida por el espectro del CEC 2000 y UBC 94 que son los espectros utilizados en este análisis. Finalmente estas cargas deberán ser modificadas por un factor de escala “Scale Factor” el cuál deberá ser la gravedad para el caso del espectro UBC 94.

Para el caso del CEC 2000, este factor deberá ser obtenido relacionando las Ecuaciones 2.35 y 2.36 correspondientes a la fuerza horizontal equivalente:

$$V = S_s W = \frac{ZIC}{R\phi_P\phi_E} W \quad (4.15)$$

Por tanto la aceleración espectral es la siguiente:

$$S_s = \frac{ZIC}{R\phi_P\phi_E} \quad (4.16)$$

Los valores ingresados ya toman en cuenta la variable C (Factor de espectro elástico de diseño normalizado), por tal motivo dicha variable no deberá formar parte de la aceleración espectral calculada para formar el Factor de Escala "Scale Factor". La aceleración espectral esta en función de la gravedad por lo que debe ser multiplicada por el valor de esta:

$$Scale\ Factor = g \cdot S_s = 981 \cdot 0.13333 = 130.8\ cm/s^2 \quad (4.17)$$

Finalmente se deberá definir la constante de amortiguamiento, que para el caso de estructuras metálicas es 0.02, y este valor deberá ser ubicado en el recuadro de "Modal Camping". Este valor será constante para todos los modos de vibración.

Analysis Case Data - Response Spectrum

Analysis Case Name: CEC2000 [Set Def Name]

Analysis Case Type: Response Spectrum

Modal Combination: CQC SRSS ABS GMC 10 Pct Dbl Sum

GMC f1: [] GMC f2: []

Directional Combination: SRSS ABS

ABS Scale Factor: []

Modal Analysis Case: Use Modes from this Modal Analysis Case [MODAL]

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	CEC2000	130.8
Accel	U1	CEC2000	130.8

[Add] [Modify] [Delete]

Show Advanced Load Parameters

Other Parameters: Modal Damping: Constant at 0.02 [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Figura 4.18 Definición de parámetros para análisis espectral CEC 2000

- Para el caso del acelerograma, que para el presente estudio serán de dos tipos: lineal y no lineal. Para definir todos los parámetros correspondientes se deberá presionar el

menú “Add New Case” y “Analysis Case Type”, a continuación se procederá a seleccionar como tipo de carga “Time History”, la cual representa a un acelerograma anteriormente definido.

Como se señaló anteriormente para este análisis se determinarán dos casos: lineal y no lineal, para cumplir con tal propósito se deberá primeramente determinar estas condiciones en el recuadro de “Analysis Type”. En el recuadro de “Time History Type” se deberá seleccionar la opción “Modal”, ya que para todos los casos se realiza un análisis mecánico en concordancia con los modos de vibración que restringen el comportamiento de la estructura. El movimiento es de tipo transiente, es decir un solo evento en el tiempo.

A continuación se definirán los parámetros de la carga aplicada, para lo cuál de la misma manera que en el caso anterior se definirá la dirección U1, en la cuál actuará una aceleración definida como “Accel”, y se definirá también un factor de escala “Scale Factor”, que para este caso es el valor de la gravedad.

Después se deberá definir algunos valores en el recuadro de “Time Step Data” que representa el tiempo de duración del sismo y los intervalos de tiempo en los que se desea realizar el análisis. Para este caso en el recuadro llamado “Number of Output Time Steps” se deberá colocar el mismo número de intervalos que se utilizaron para ingresar y graficar el acelerograma del sismo “El Centro” que fueron 1560 pasos, con un intervalo de 0.02 segundos, valor que deberá ser definido en el recuadro de “Output Time Step Size”.

Finalmente se definirá la constante de amortiguamiento como 0.02 que es el valor utilizado para estructuras metálicas. De esta manera se habrá definido por completo las variables que deben ser modificadas de acuerdo al análisis que va a ser realizado.

Se nombra ELCENTRO1 para el análisis lineal y ELCENTRO2 para el análisis no lineal. Estos tipos de análisis se seleccionan en la ventana de la Figura 4.19.

Analysis Case Data - Linear Modal History

Analysis Case Name:

Analysis 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

Modal Analysis Case:
 Use Modes from Case:

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	ELCENTRO	981.
Accel	U1	ELCENTRO	981.

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:
 Number of Output Time Steps:
 Output Time Step Size:

Other Parameters:
 Modal Damping:

Figura 4.19 Definición de parámetros para análisis lineal por medio de un acelerograma

4.6 SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL PÓRTICO CON AMORTIGUADOR SOMETIDO A CARGAS SÍSMICAS EN EL SOFTWARE SELECCIONADO

El Procedimiento para realizar la simulación y el análisis del pÓrtico con amortiguador en SAP 2000 se presenta a continuación:

- a) Para el caso de la simulación del pÓrtico con amortiguador en SAP 2000, se deberán repetir todos los pasos presentados en la sección 4.5 para de esta manera determinar todos los tipos de análisis necesarios así como la configuración física del pÓrtico.
- b) A continuación se procederá a insertar el elemento amortiguador en el pÓrtico. Para dicho propósito se deberá ingresar al menú "Define" después se seleccionará el submenú "Link Support Properties" por medio del cual se presentará la ventana del mismo nombre, como se observa en la Figura 4.20, en la que se deberá seleccionar el menú "Add New Property".

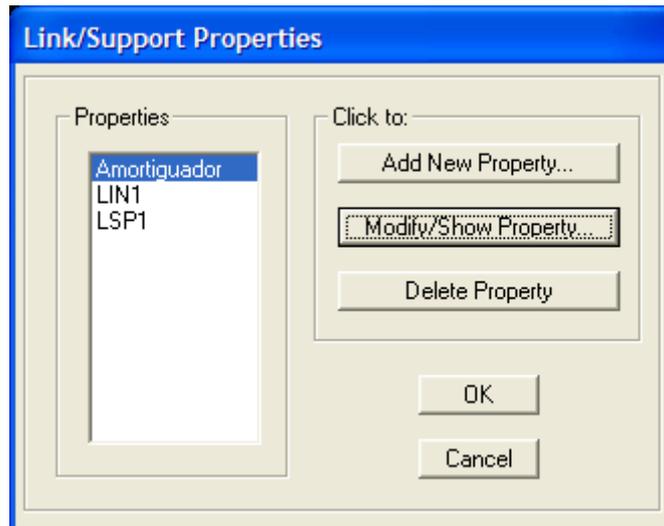


Figura 4.20 Selección de elemento amortiguador

c) Después de seleccionar dicho menú el programa presentará una nueva ventana llamada "Link Support Property Data" en la que se definirá el tipo de elemento que en este caso es un amortiguador por medio de la opción "Damper" como se observa en la Figura 4.21. De la misma manera se definirá algunos parámetros de trabajo del amortiguador como son su masa, y también se definirá la dirección en la que actúa y el rango en que trabajará (no lineal), las cuales se encuentran en el recuadro "Direccional Properties".

Link/Support Property Data

Link/Support Type:

Property Name:

Total Mass and Weight

Mass: Rotational Inertia 1:

Weight: Rotational Inertia 2:

Rotational Inertia 3:

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

Display Color:

Figura 4.21 Definición de propiedades del amortiguador

d) Al haber determinado las propiedades direccionales de trabajo del amortiguador, se deberá proceder a definir ciertas propiedades características del amortiguador por medio de la selección del comando "Modif./Show for U1" que se encuentra dentro del recuadro "Direccional Properties". En ese instante el programa presentará la ventana "Link/ Support Direccional Properties" como se puede observar en la Figura 4.22, en dicha ventana se deberán definir las propiedades inherentes al amortiguador para los dos tipos de análisis que se van a realizar en el pórtico: lineal y no lineal. Los valores a ser ingresados son aquellos determinados preliminarmente y aquellos obtenidos de los ensayos mecánicos y dinámicos realizados en el Laboratorio de Mecánica de Materiales, los cuales fueron presentados en el Capítulo 3.

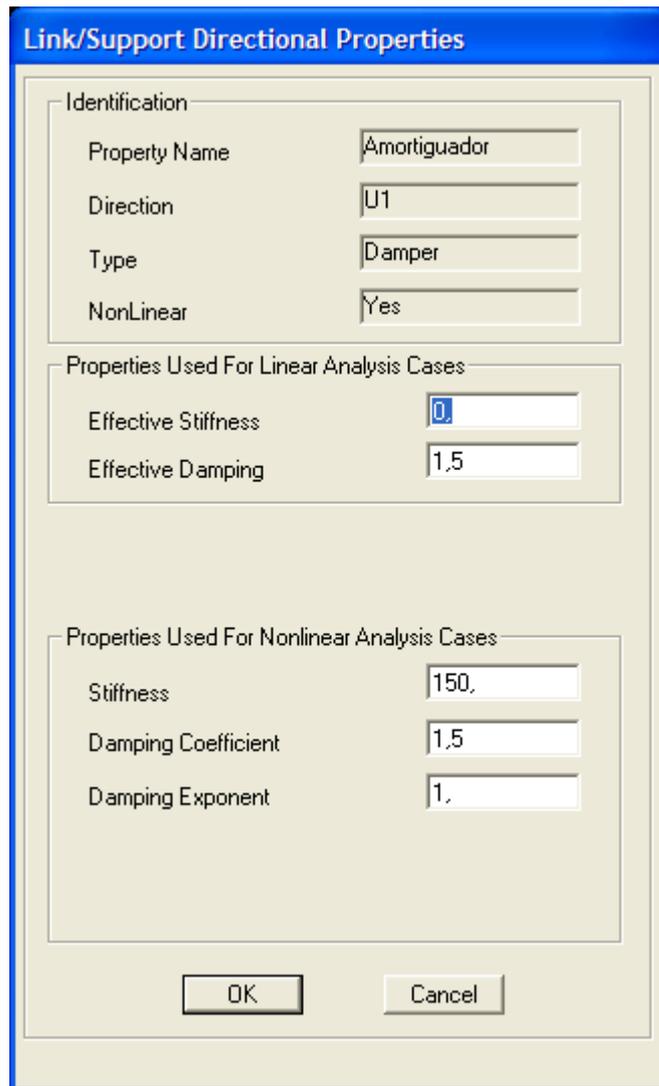


Figura 4.22 Definición de propiedades direccionales del amortiguador para los casos de análisis

e) De esta manera se han definido las propiedades características del amortiguador, y a continuación se dibuja el elemento amortiguador por medio del comando “Draw” y el submenú “Draw 2 Joint link”; de esta manera el programa presentará una ventana en la cual se seleccionará el elemento a ser dibujado, y se seleccionará el amortiguador, como se muestra en la Figura 4.23. Finalmente por medio del cursor se dibujará el amortiguador en la posición requerida como se muestra en la Figura 4.24.

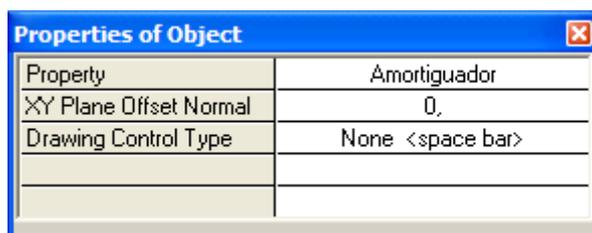


Figura 4.23 Selección del elemento a ser dibujado

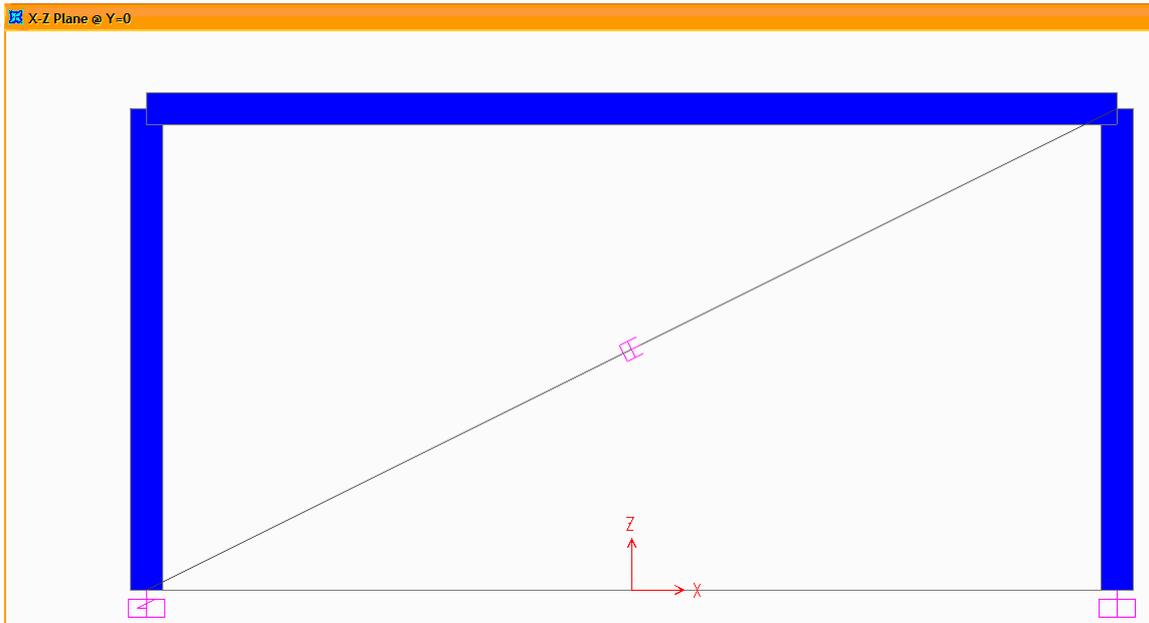


Figura 4.24 Pórtico con elemento amortiguador

4.7 GENERACIÓN DE RESULTADOS EN EL SOFTWARE SELECCIONADO

Para generar los resultados en el programa SAP 2000, primeramente se deberán fijar ciertos parámetros de análisis. Primeramente se deberá restringir el análisis a dos dimensiones para lo cual se deberá abrir el menú "Analyze" y después el submenú "Set Analysis Options" y el programa presentará una ventana en la cual se deberá seleccionar un análisis bidimensional por medio de la selección de "X – Z Plane" (Figura 4.25) lo cual restringirá el análisis estructural del pórtico a dos dimensiones.

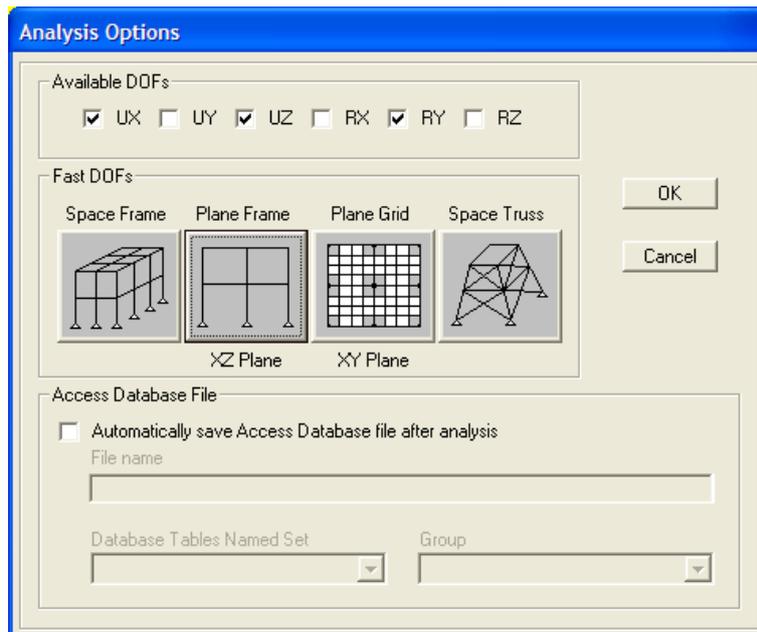


Figura 4.25 Restricción de análisis estructural a dos dimensiones

A continuación se deberá correr el análisis, por medio del botón “Run Analysis”, que se encuentra en la barra de herramientas. A continuación el programa presentará una ventana llamada “Set Analysis Cases to Run” (Figura 4.26); en la cual se señalan los casos de análisis especificados anteriormente. En dicha ventana se deberá presionar el botón “Run Now” y en ese instante el programa iniciará la simulación.

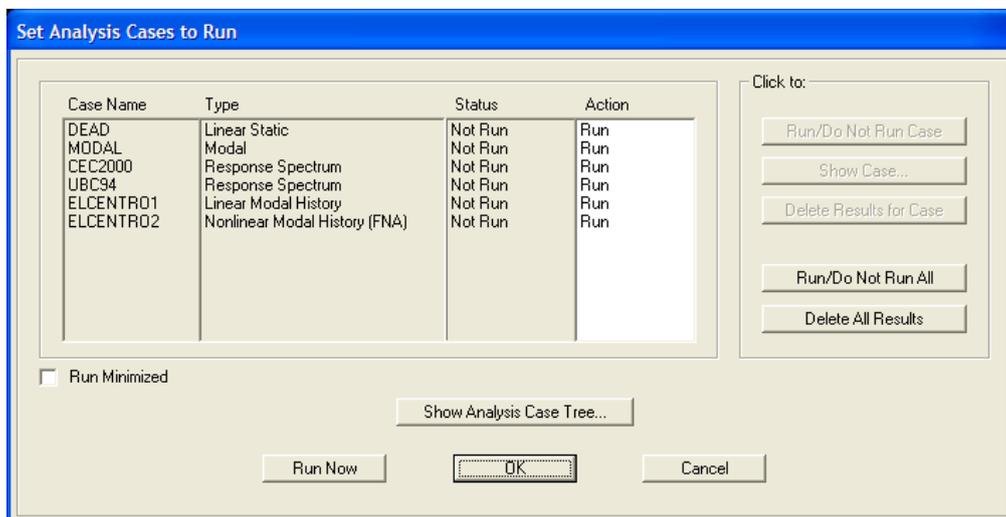


Figura 4.26 Verificación casos especificados de la simulación

A continuación en la ventana principal, se presenta el pórtico ya deformado, y al señalar los nodos de la estructura con el cursor se pueden observar las deflexiones de dichos nodos.

También el programa presenta varias opciones para presentar la estructura deformada y las reacciones en los nodos y elementos del pórtico por medio del uso de la barra de herramientas,

la cual presenta tres botones que permitirán observar y analizar la estructura dentro de ciertos parámetros. Los tres botones son: “Show Undeformed Shape”, “Show Deformed Shape” y “Show Forces/ Stresses” (Figura 4.27).

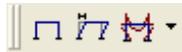


Figura 4.27 Botones para fijar casos de análisis en la simulación

El primer botón llamado “Show Undeformed Shape”, permitirá colocar la estructura en su posición original. El segundo botón “Show Deformed Shape”, permitirá mostrar el pórtico deformado por medio de la carga que se seleccione, para ello el programa presenta una ventana llamada “Deformed Shape” en la cuál se puede seleccionar el tipo de carga al cuál va a ser sometido el pórtico.

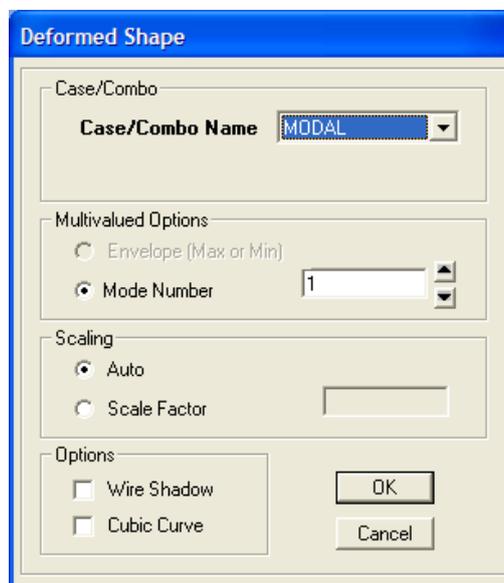


Figura 4.28 Selección del tipo de carga para observar la estructura deformada

El tercer botón “Show Forces/ Stresses” permite observar las fuerzas y esfuerzos a los que está sometida la estructura (nodos, elementos y elementos alternos). Al presionar este botón se presentará una ventana llamada “Member Force Diagram” en la cuál se deberá seleccionar el tipo de carga para el análisis de la estructura. También permite observar las fuerzas y momentos en diagramas para cada elemento (fuerza axial, cortante y momento flector).

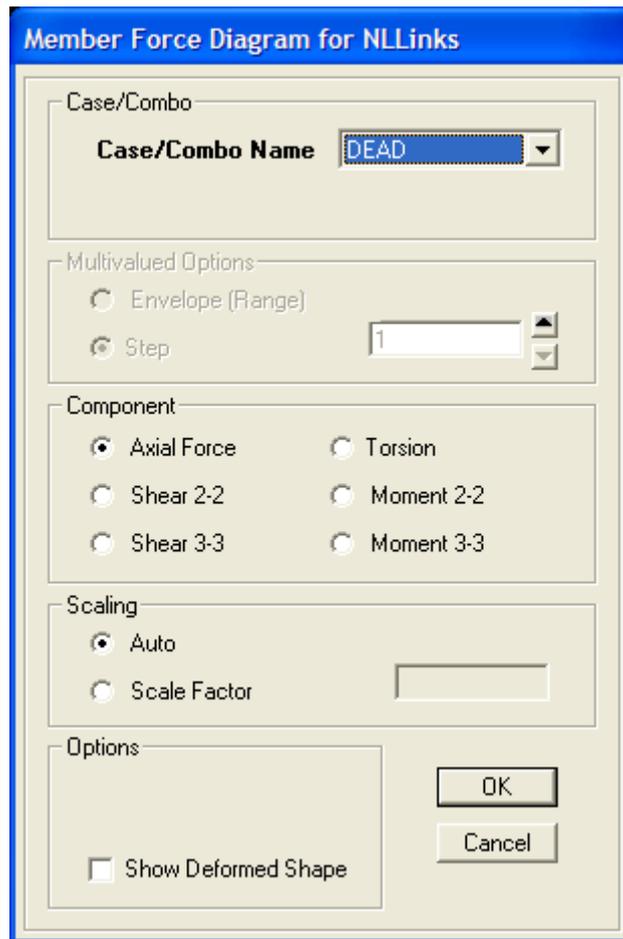


Figura 4.29 Selección del tipo de carga para observar las fuerzas y esfuerzos a los que está sometida el pórtico

Los resultados podrán ser presentados por medio de tablas o gráficas, para ello se deberá utilizar el menú "Display" y si se requiere de los resultados en tablas se deberá utilizar el submenú "Show Tables" y si se requiere presentar los resultados por medio de gráficas se deberá utilizar el submenú "Show Plot Functions"

Si se requiere presentar los resultados por medio de tablas se deberá seguir el procedimiento anteriormente descrito y el programa presentará una ventana llamada "Choose Tables for Display" (Figura 4.30) en la cual se podrá seleccionar los resultados que el usuario desea observar.

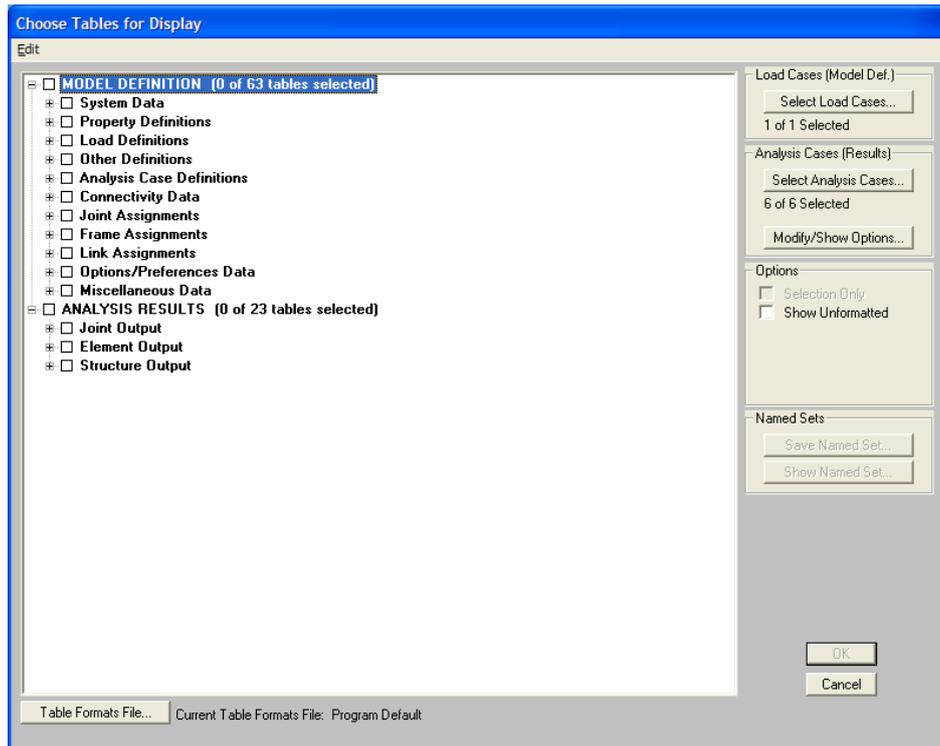


Figura 4.30 Selección de variables a ser presentadas en la tabla de resultados

Al presionar el botón “ok” el programa presentará la tabla de resultados con las variables seleccionadas anteriormente, las cuales se pueden exportar al programa Microsoft Excel.

Para la presentación de resultados por medio de gráficas, después de seleccionar el submenú “Show Plot Functions”, el programa presentará una ventana llamada “Plot Function Trace Display Definition” (Figura 4.31) en la cual se seleccionarán las cargas y las variables que el usuario desea que sean presentadas.

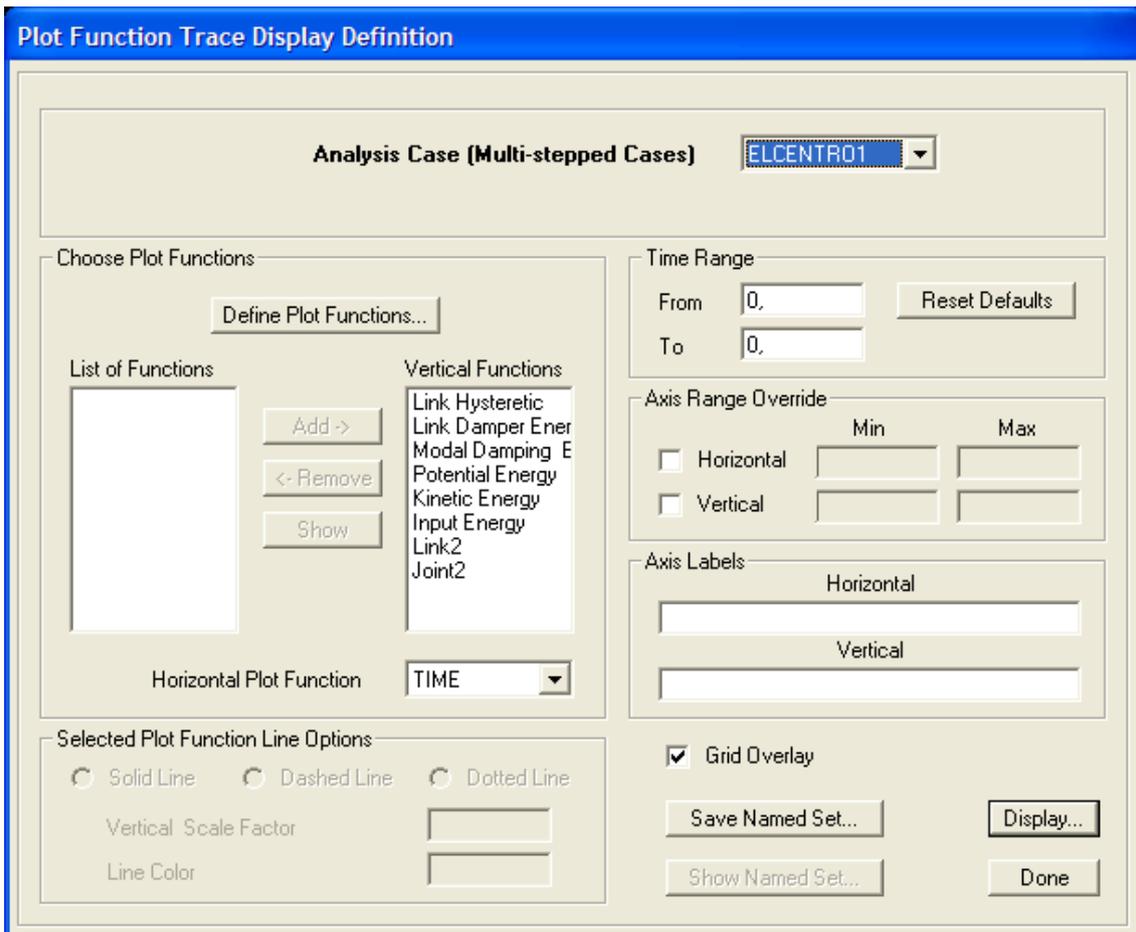


Figura 4.31 Selección de variables y cargas a ser presentadas en la gráfica de resultados

El programa presentará las gráficas que representan a los resultados de acuerdo a los parámetros seleccionados por medio del botón "Display".

CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 RESULTADOS OBTENIDOS

5.1.1 RESPUESTA DE LAS UNIONES

El programa SAP 2000 designa a las uniones por números según su posición como lo indica la Figura 5.1.

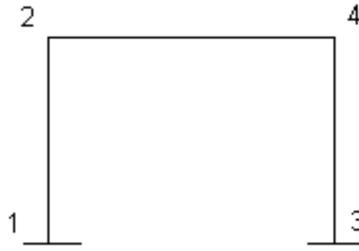


Figura 5.1 Posición de las uniones

Además cada punto posee un sistema de coordenadas locales que son propias de cada unión y no tienen relación con el sistema de coordenadas globales, pero si con los grados de libertad del sistema. Este sistema de coordenadas se explica en la Figura 5.2:

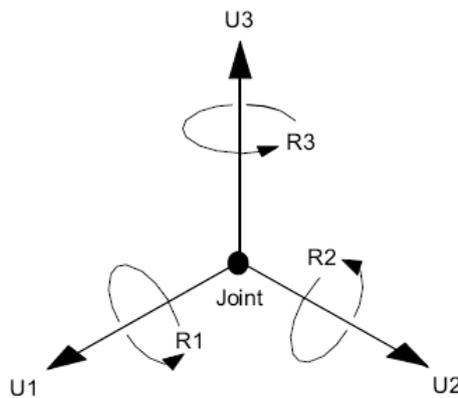


Figura 5.2 Sistema de coordenadas locales SAP2000*

Para todos los casos, la respuesta de las uniones se ve restringida a las direcciones U1, U3 y R2 ya que el análisis se realiza únicamente en dos dimensiones. Debido a que los apoyos son empotrados, los desplazamientos, velocidades y aceleraciones se ven restringidos para las uniones 1 y 3. Debido a estos apoyos las reacciones se encuentran solamente para las uniones 1 y 3.

Los desplazamientos obtenidos, las velocidades (a excepción de la carga muerta que es estática), las aceleraciones y las reacciones de los apoyos se encuentran en el Anexo G.

5.1.2 RESPUESTA DE LOS ELEMENTOS

El programa SAP 2000 designa, al igual que las uniones, a los elementos con un número por la posición que ocupan. Las posiciones para esta simulación se indican en la Figura 5.3

* SAP 2000 Analysis Reference



Figura 5.3 Posición de los elementos

Las Figuras 5.4 a 5.6 muestran como el programa designa a las fuerzas y momentos de los elementos relacionándolos con sus ejes locales:

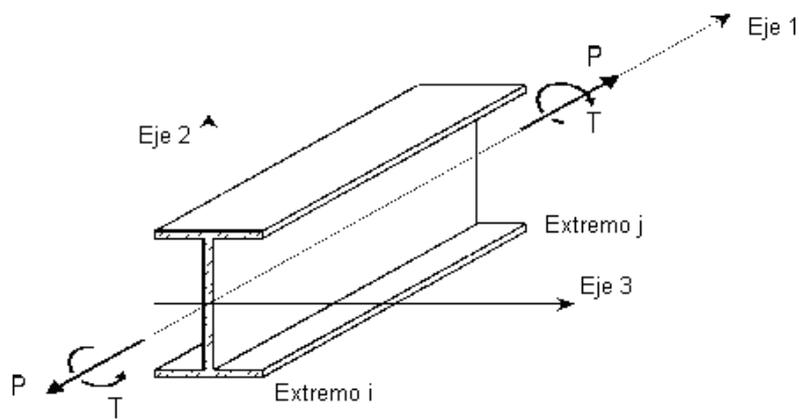


Figura 5.4 Fuerza axial y torque SAP 2000

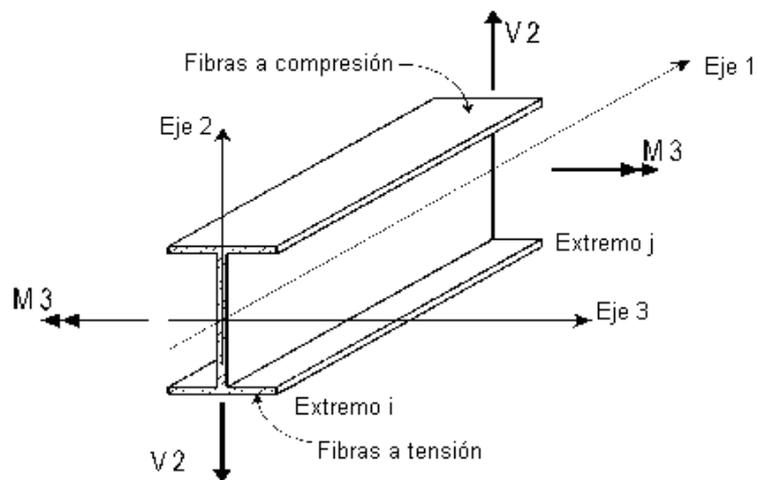


Figura 5.5 Momento y cortante en el plano 1 – 2 SAP 2000

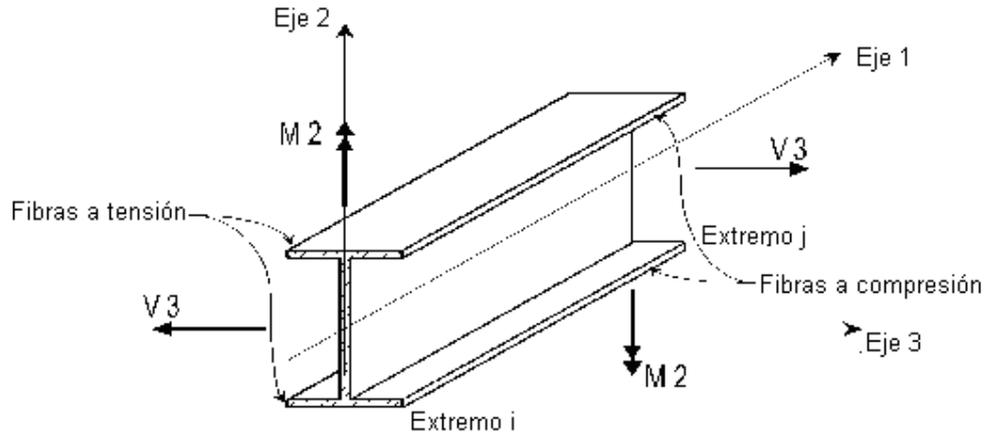


Figura 5.6 Momento y cortante en el plano 1 – 3 SAP 2000

La respuesta de los elementos representada en diagramas de fuerza axial, cortante y momento flector se encuentra en el Anexo I.

5.1.3 RESPUESTA DE LOS AMORTIGUADORES

Además de los elementos se puede obtener las respuestas para el amortiguador. SAP 2000 lo designa con otro nombre por lo que no existe confusión. También existe una designación para las reacciones y se muestra en la Figura 5.7:

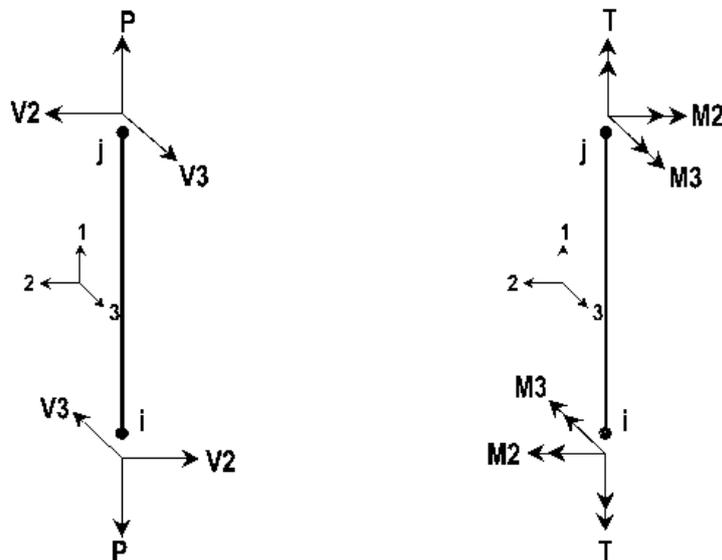


Figura 5.7 Reacciones del amortiguador SAP2000*

Una de las características principales de un amortiguador viscoso es la de únicamente dar como reacción una fuerza axial, por lo tanto el cortante y el momento flector son ignorados en un análisis de dos dimensiones. Además las propiedades dadas anteriormente (elasticidad y amortiguamiento) solo permiten su funcionamiento en análisis por variación del tiempo.

* SAP 2000 Analysis Reference

Se debe recordar que el análisis por historia del tiempo divide a los valores de la aceleración en función del tiempo (acelerograma), en intervalos de tiempo iguales (0.02 s) y analiza la respuesta de la estructura para cada intervalo de manera similar a la estática, igualándolo con el análisis modal. Las fuerzas axiales son:

Tabla 5.1 Fuerza axial amortiguador (datos de laboratorio)

Extremo	Tipo de Análisis	Respuesta	P
			N
I	Por historia del tiempo lineal	Máx	3,09
J			3,09
I		Mín	-3,38
J			-3,38
I	Por historia del tiempo no lineal	Máx	2,8
J			2,8
I		Mín	-3,33
J			-3,33

Fuente: SAP 2000

Tabla 5.2 Fuerza axial amortiguador (datos preliminares)

Extremo	Tipo de Análisis	Respuesta	P
			N
I	Por historia del tiempo lineal	Máx	124,22
J			124,22
I		Mín	-263,35
J			-263,35
I	Por historia del tiempo no lineal	Máx	123,6
J			123,6
I		Mín	-262,2
J			-262,2

Fuente: SAP 2000

Igualmente en las deformaciones solo se consideran los desplazamientos axiales, estas se encuentran en el Anexo H.

5.1.4 ANÁLISIS ESPECTRAL

Despejando de la Ecuación 4.1 con el análisis modal de eigenvectores, se pueden determinar la aceleración espectral, con la cual se podrá obtener los otros parámetros de este tipo de

análisis. Se da solamente para los casos de análisis espectral (CEC 2000 y UBC 94). Los resultados obtenidos para el análisis espectral fueron:

Tabla 5.3 Análisis espectral – Pórtico sin amortiguador

Espectro	Modo	Período	Relación amortiguamiento	Aceleración U1	Amplitud U1
		s		cm/s ²	cm
CEC2000	1	0,06504	0,02	2452,5	-0,305225
CEC2000	2	0,004574	0,02	2452,5	-2,531E-16
CEC2000	3	0,004571	0,02	2452,5	0,0000028
CEC2000	4	0,004566	0,02	2452,5	3,33E-16
UBC94	1	0,06504	0,02	647,617	-0,080599
UBC94	2	0,004574	0,02	410,348	-4,235E-17
UBC94	3	0,004571	0,02	410,337	4,684E-07
UBC94	4	0,004566	0,02	410,317	5,57E-17

Fuente: SAP 2000

Tabla 5.4 Análisis espectral – Pórtico con amortiguador (datos de laboratorio)

Espectro	Modo	Período	Relación amortiguamiento	Aceleración U1	Amplitud U1
		s		cm/s ²	cm
CEC2000	1	0,065212	0,0246	423,19	-0,053087
CEC2000	2	0,004597	0,0202	440,915	3,399E-07
CEC2000	3	0,004578	0,0203	440,22	6,234E-09
CEC2000	4	0,004572	0,02	441,631	-3,772E-07
UBC94	1	0,065212	0,0246	621,219	-0,077929
UBC94	2	0,004597	0,0202	409,77	3,159E-07
UBC94	3	0,004578	0,0203	409,051	5,793E-09
UBC94	4	0,004572	0,02	410,34	-3,505E-07

Fuente: SAP 2000

Tabla 5.5 Análisis espectral – Pórtico con amortiguador (datos preliminares)

Espectro	Modo	Período	Relación amortiguamiento	Aceleración U1	Amplitud U1
		s		cm/s ²	cm
CEC2000	1	0,065064	0,51	220,817	0,027512
CEC2000	2	0,004576	0,0353	390,959	-1,886E-07

CEC2000	3	0,004572	0,0221	432,811	4,484E-07
CEC2000	4	0,004568	0,0544	352,205	-1,057E-09

**Tabla 5.5 Análisis espectral – Pórtico con amortiguador (datos preliminares)
(Continuación)**

UBC94	1	0,065064	0,51	323,856	0,04035
UBC94	2	0,004576	0,0353	363,272	-1,752E-07
UBC94	3	0,004572	0,0221	402,144	4,166E-07
UBC94	4	0,004568	0,0544	327,235	-9,82E-10

Fuente: SAP 2000

Las reacciones en la base (respuesta de la estructura) obtenidas del análisis de las aceleraciones de respuesta de la estructura también fueron obtenidas y se muestran en el Anexo J.

5.1.5 ANÁLISIS ENERGÉTICO

La energía es obtenida mediante las ecuaciones especificadas en el Capítulo 2 (2.49 a la 2.56). La resolución de dichas integrales se realiza por medio de la resolución de la ecuación de movimiento (4.9 a 4.11) es decir realizando el análisis modal (obteniendo el desplazamiento $u(t)$ y sus derivadas para cada modo), y realizando la combinación modal (CQC) para cada incremento de aceleración del suelo en función del tiempo (intervalo de 0.02 s).

Solamente se pueden obtener los valores de energía para el análisis por historia del tiempo (lineal y no lineal), ya que aquí se puede observar la variación del movimiento realizado y por lo tanto de los componentes de la energía del sistema. Los resultados obtenidos fueron:

Tabla 5.6 Análisis energético – Pórtico sin amortiguador

Tipo de análisis	Componentes de la energía					
	Entrada	Cinética	Elástica	Amortiguamiento estructura	Amortiguador viscoso	Error
	N-cm	N-cm	N-cm	N-cm	N-cm	N-cm
Por historia del tiempo lineal	47,03	4,19	11,89	45,91	0	1,652E-13

Tabla 5.6 Análisis energético – Pórtico sin amortiguador (Continuación)

Por historia del tiempo no	47,03	4,19	11,89	45,91	0	1,652E-13
----------------------------	-------	------	-------	-------	---	-----------

lineal						
---------------	--	--	--	--	--	--

Fuente: SAP 2000

Tabla 5.7 Análisis energético – Pórtico con amortiguador (datos de laboratorio)

Tipo de análisis	Componentes de la energía					
	Entrada	Cinética	Elástica	Amortiguamiento estructura	Amortiguador viscoso	Error
	N-cm	N-cm	N-cm	N-cm	N-cm	N-cm
Por historia del tiempo lineal	48,28	4,3	12,59	47,26	0	1,874E-13
Por historia del tiempo no lineal	48	4,2	12,3	41,65	5,25	0,05349

Fuente: SAP 2000

Tabla 5.8 Análisis energético – Pórtico con amortiguador (datos preliminares)

Tipo de análisis	Componentes de la energía					
	Entrada	Cinética	Elástica	Amortiguamiento estructura	Amortiguador viscoso	Error
	N-cm	N-cm	N-cm	N-cm	N-cm	N-cm
Por historia del tiempo lineal	109,29	2,29	6,81	109,26	0	1,968E-13

**Tabla 5.8 Análisis energético – Pórtico con amortiguador (datos preliminares)
(Continuación)**

Por historia del tiempo no lineal	108,65	2,27	6,73	4,26	104,34	0,02587
-----------------------------------	--------	------	------	------	--------	---------

Fuente: SAP 2000

5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.2.1 RESPUESTA DE LAS UNIONES

Las siguientes figuras muestran la variación del desplazamiento de la unión 2 a lo largo de la duración del sismo “El Centro”. Estos desplazamientos son representativos de las uniones móviles y similares al acelerograma (movimiento del suelo).

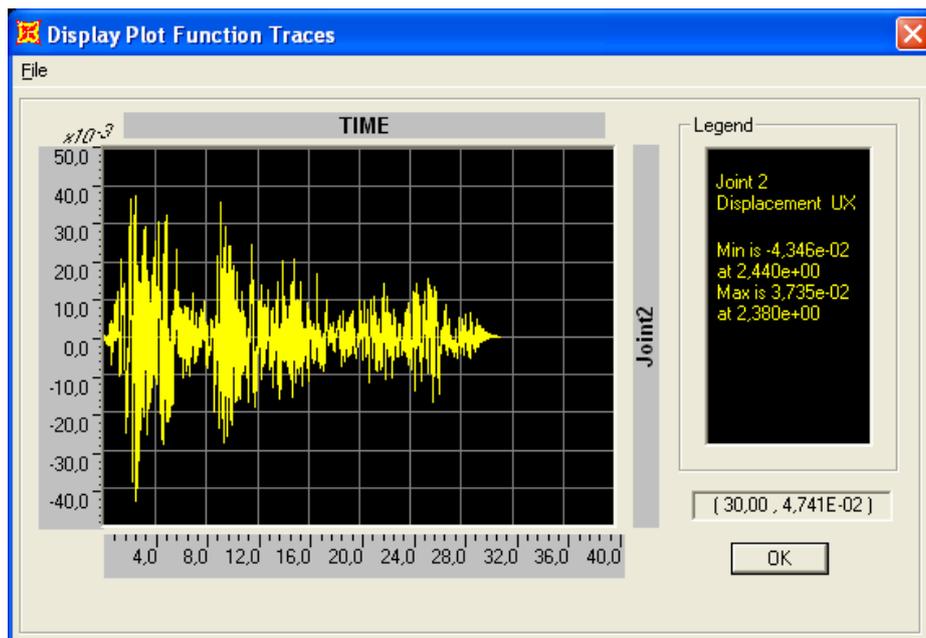


Figura 5.8 Desplazamiento de las uniones – Pórtico sin amortiguador

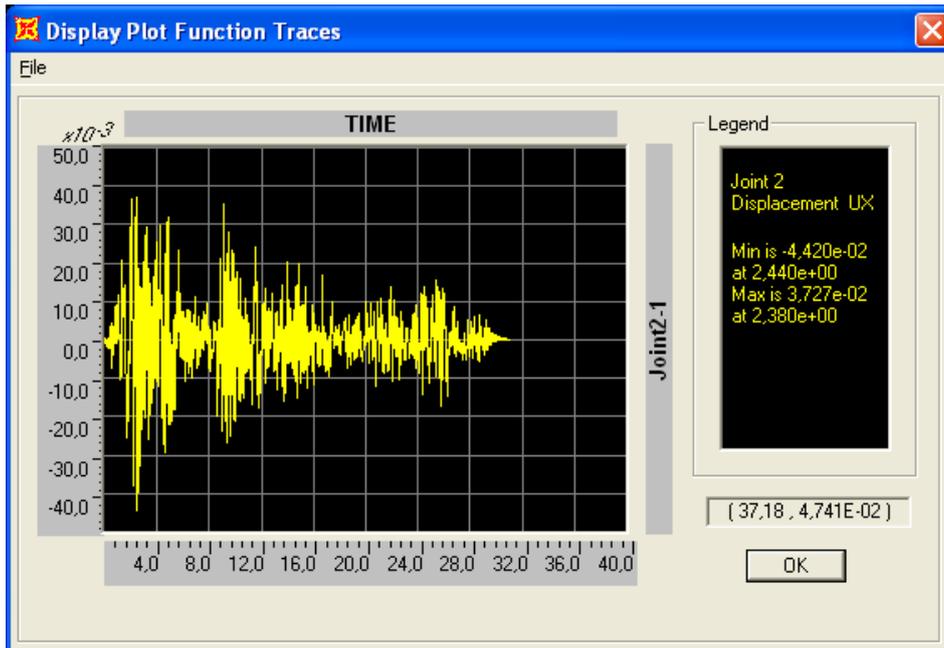


Figura 5.9 Desplazamiento de las uniones – Pórtico con amortiguador (datos laboratorio)

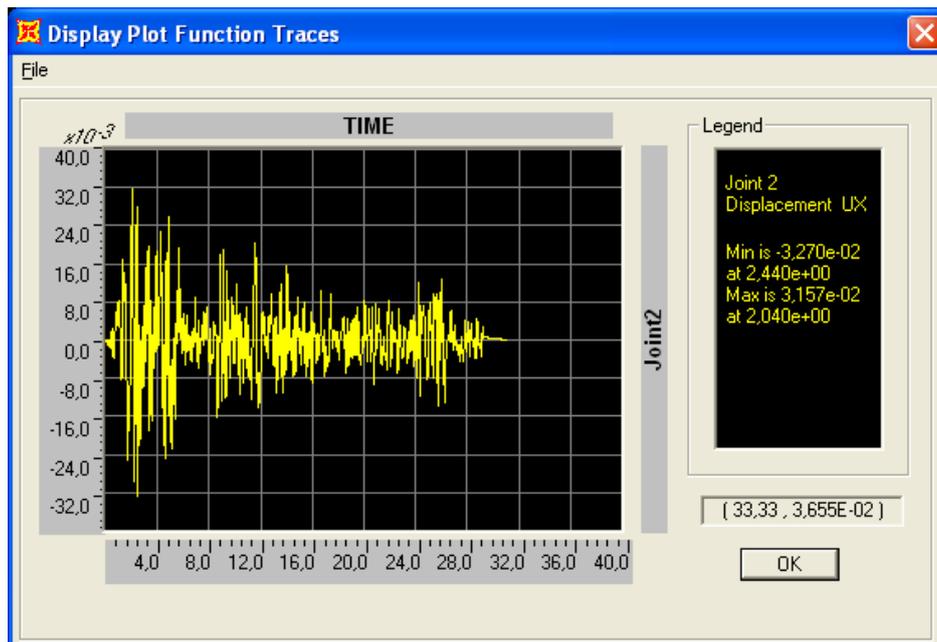


Figura 5.10 Desplazamiento de las uniones – Pórtico con amortiguador (datos preliminares)

Se puede observar que la disminución del desplazamiento de las uniones no es significativa para el pórtico con el amortiguador de ensayo. Sin embargo con el amortiguador de ejemplo (llamado de datos preliminares) la variación del desplazamiento disminuye ya que se tiene mayor dificultad para superar la fuerza de amortiguamiento viscoso del dispositivo.

La Figura 5.11 compara los desplazamientos de la unión 2 para las diferentes cargas de sismo. Se puede observar que el amortiguador de ensayo reduce los desplazamientos de ensayo pero no en la misma proporción que el amortiguador de ejemplo, excepto para el análisis del CEC2000 donde el amortiguador si reduce el desplazamiento notablemente.

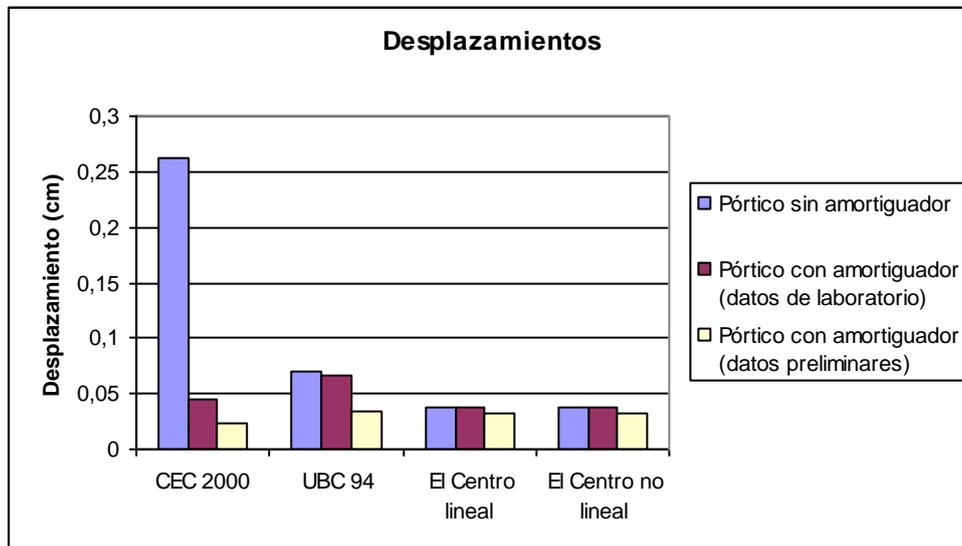


Figura 5.11 Desplazamientos de las uniones

La Figura 5.12 compara las velocidades de la unión 2 para las diferentes cargas de sismo. Se puede observar un comportamiento similar que los desplazamientos, ya que es una derivada de estos en función del tiempo.

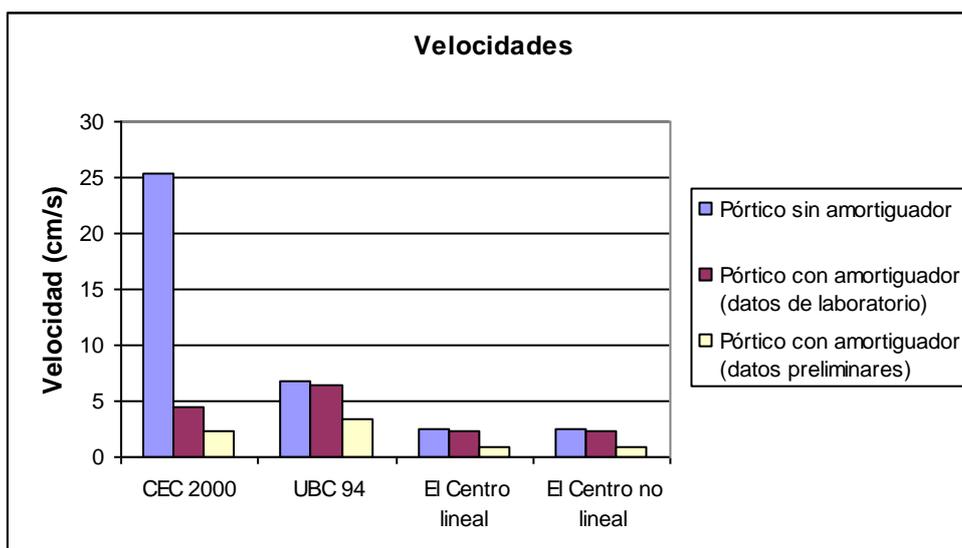


Figura 5.12 Velocidades de las uniones

La Figura 5.13 compara las aceleraciones de la unión 2 para las diferentes cargas de sismo. Se puede observar un comportamiento similar que en las velocidades, ya que es una derivada de estas en función del tiempo.

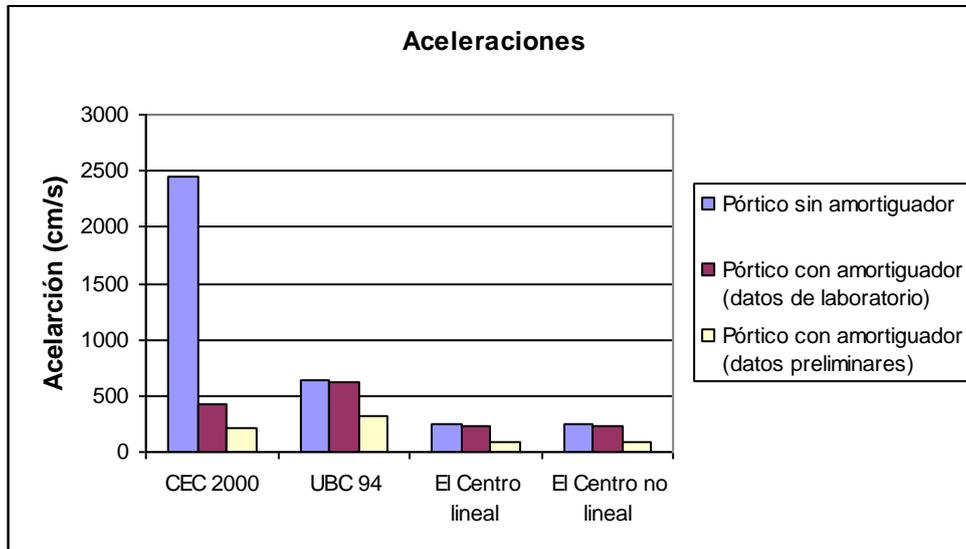


Figura 5.13 Aceleraciones de las uniones

Las figura 5.14 a 5.16 comparan las reacciones en los apoyos para las diferentes cargas de sismo. Los amortiguadores disminuyen las cargas de reacción para los análisis espectrales, sin embargo en el análisis histórico incrementan las reacciones, debido a que se presenta una fuerza de respuesta del amortiguador debido a su comportamiento viscoso y la rigidez de los nudos donde está conectado.

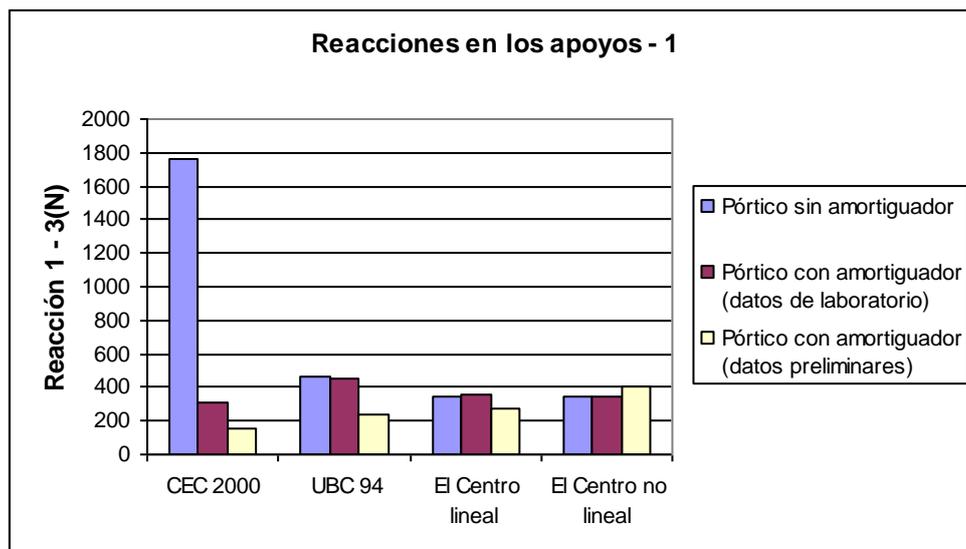


Figura 5.14 Reacciones del apoyo 1

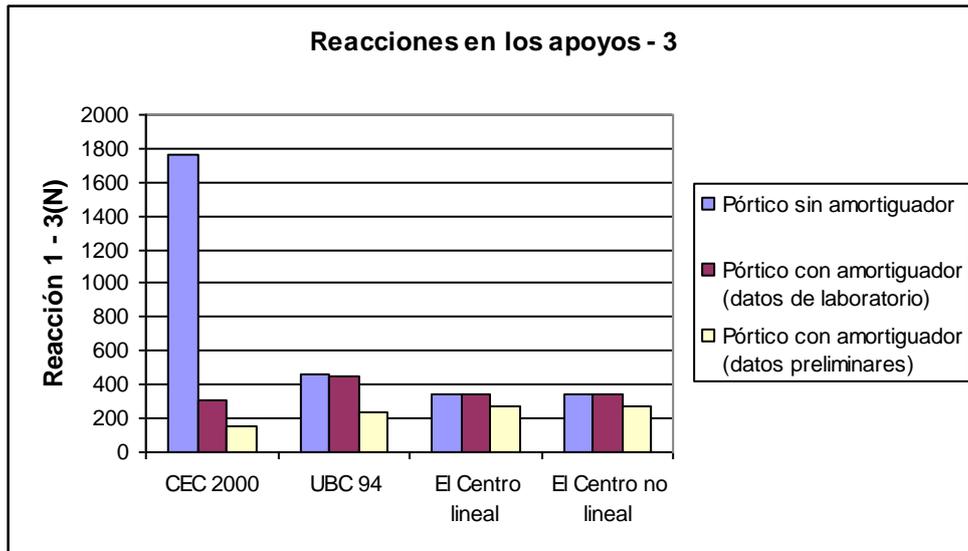


Figura 5.15 Reacciones del apoyo 3

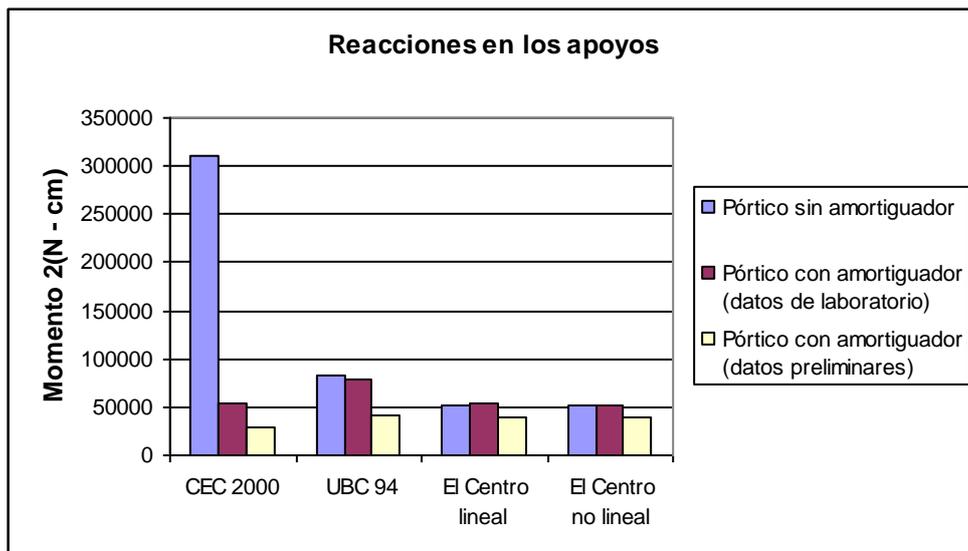


Figura 5.16 Momento de los apoyos

5.2.2 RESPUESTA DE LOS ELEMENTOS

El análisis de los solamente se lo realizó para el elemento 1 (representando a las columnas) y el elemento 3 (representando a la viga). Se debe recordar que los análisis de resultados son realizados solamente para las cargas sísmicas ya que las demás cargas (muerta y modal) son similares entre sí o no representan una respuesta real de la estructura

En las columnas se puede observar (figuras 5.17 a 5.22) que las fuerzas axiales, cortantes y momentos flectores disminuyen notablemente en el CEC 2000.

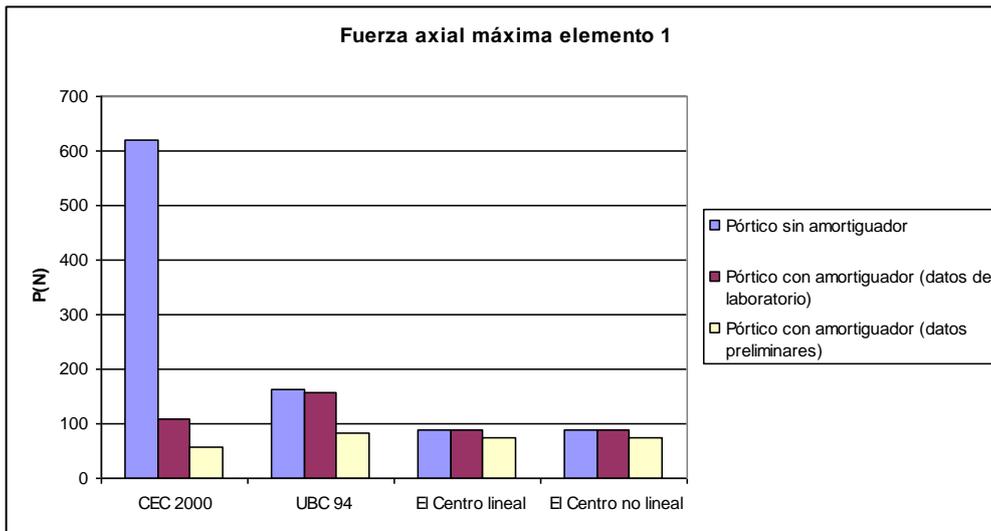


Figura 5.17 Fuerzas axiales máximas - columnas

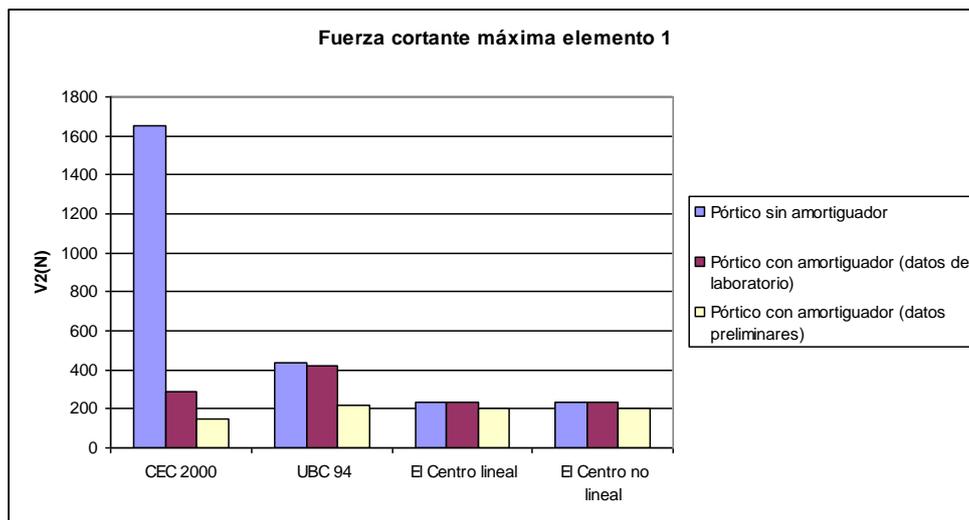


Figura 5.18 Fuerzas cortantes máximas columnas

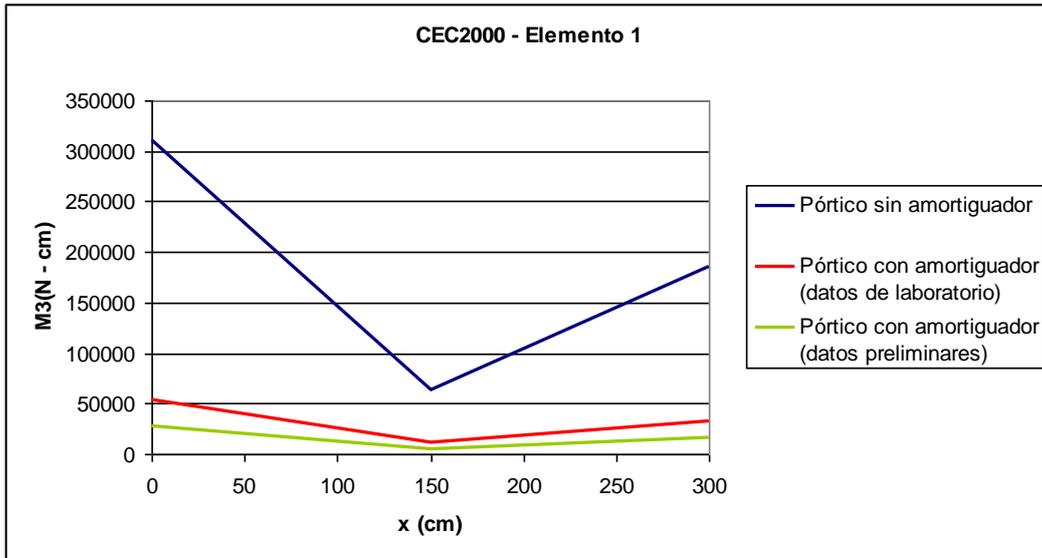


Figura 5.19 Momento flector CEC 2000 - columnas

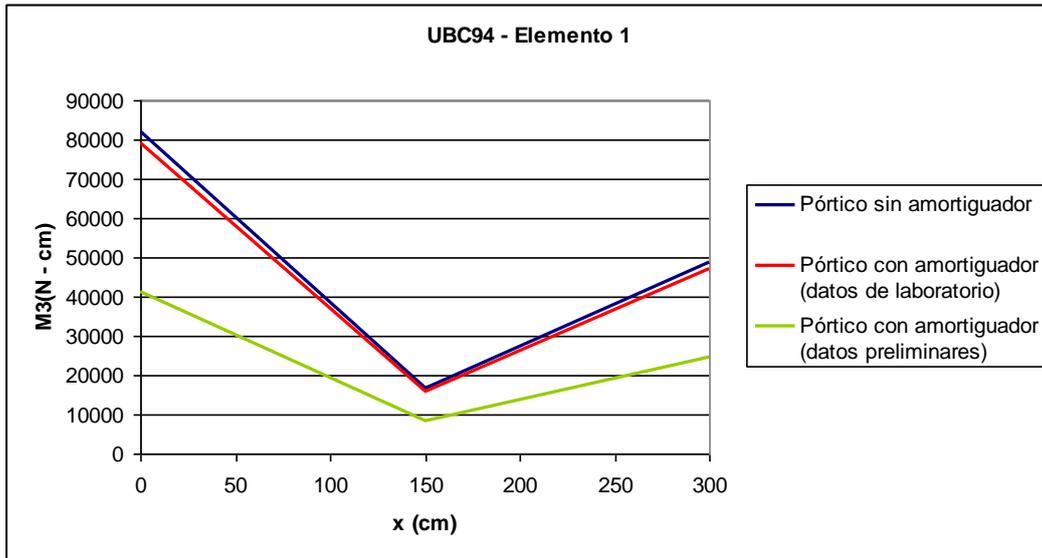


Figura 5.20 Momento flector UBC 94 - columnas

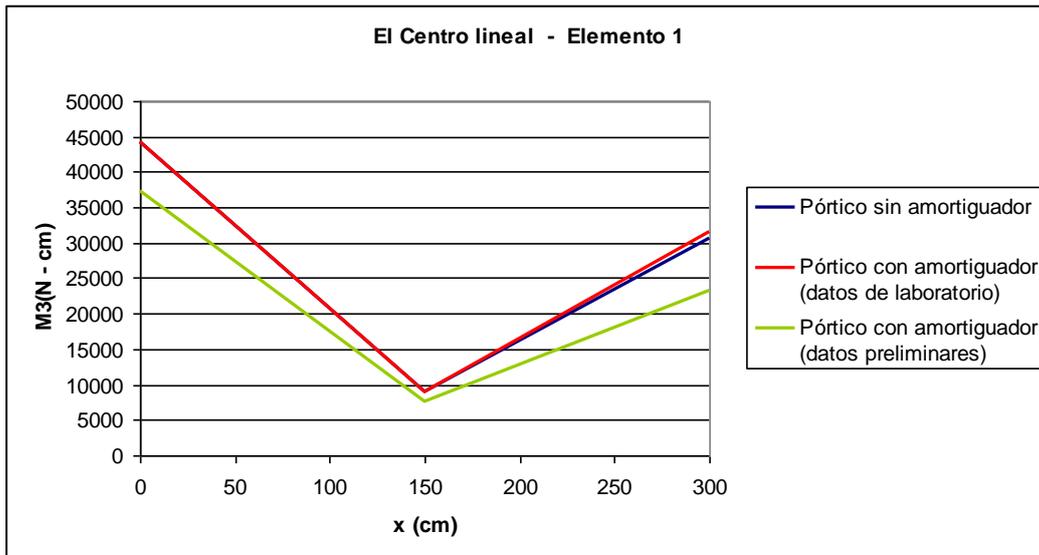


Figura 5.21 Momento flector El Centro lineal - columnas

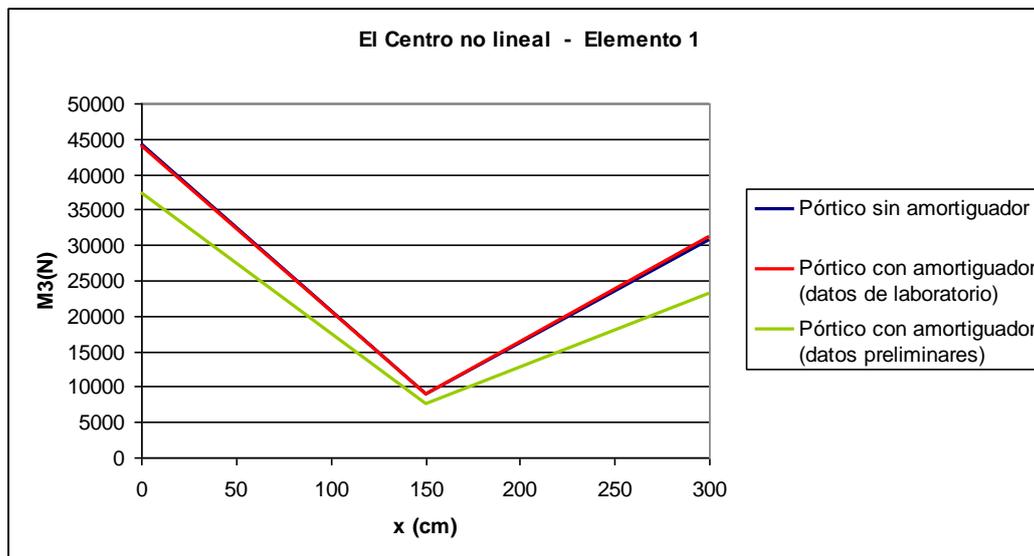


Figura 5.22 Momento flector El Centro no lineal - columnas

En la viga se puede observar (figuras 5.23 a 5.28) que las fuerzas axiales, cortantes y momentos flectores disminuyen notablemente en el CEC 2000. La fuerza axial de la viga en el análisis histórico no lineal es mayor ya que la fuerza de salida del amortiguador actúa en el extremo 4 de la viga.

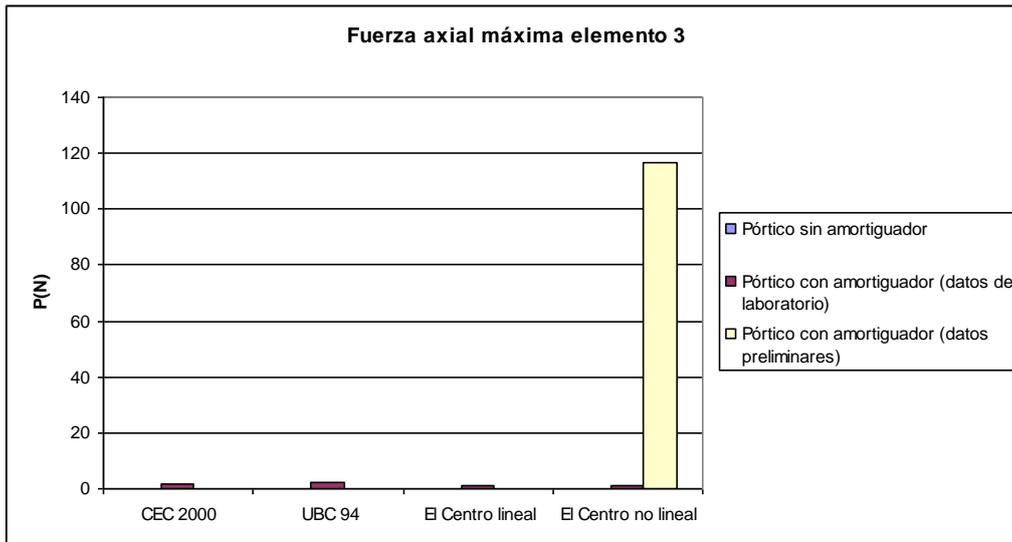


Figura 5.23 Fuerzas axiales máximas - viga

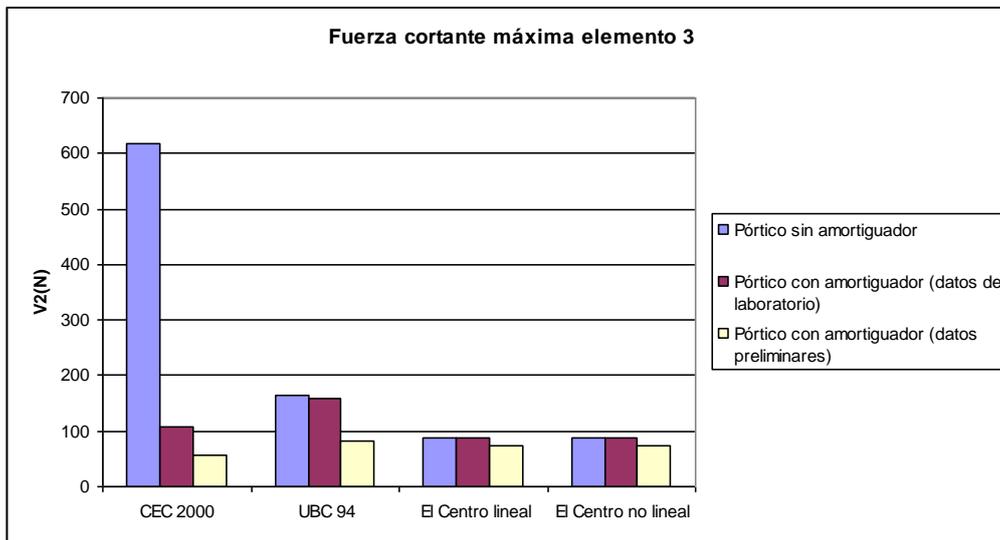


Figura 5.24 Fuerzas cortantes máximas - viga

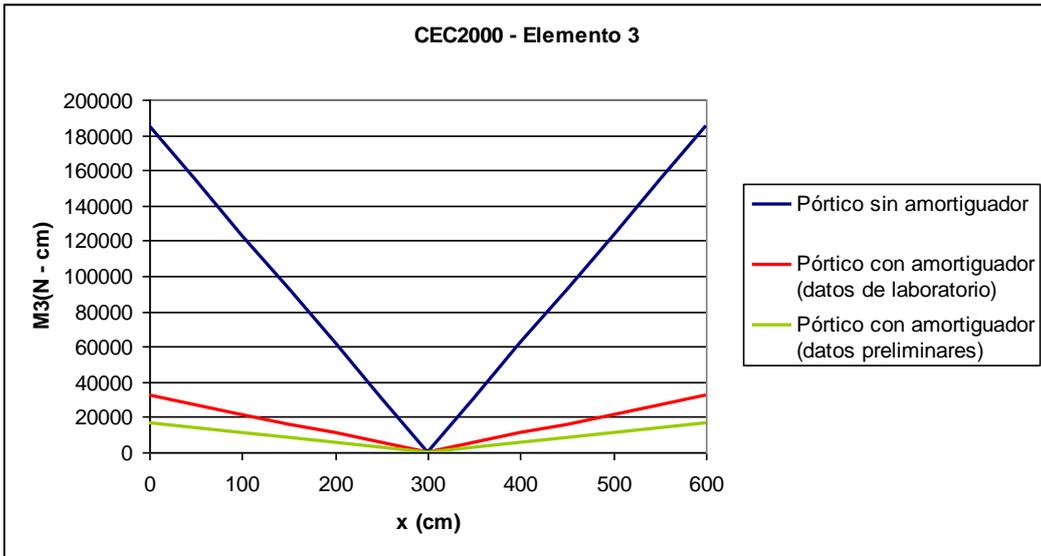


Figura 5.25 Momento flector CEC 2000 - viga

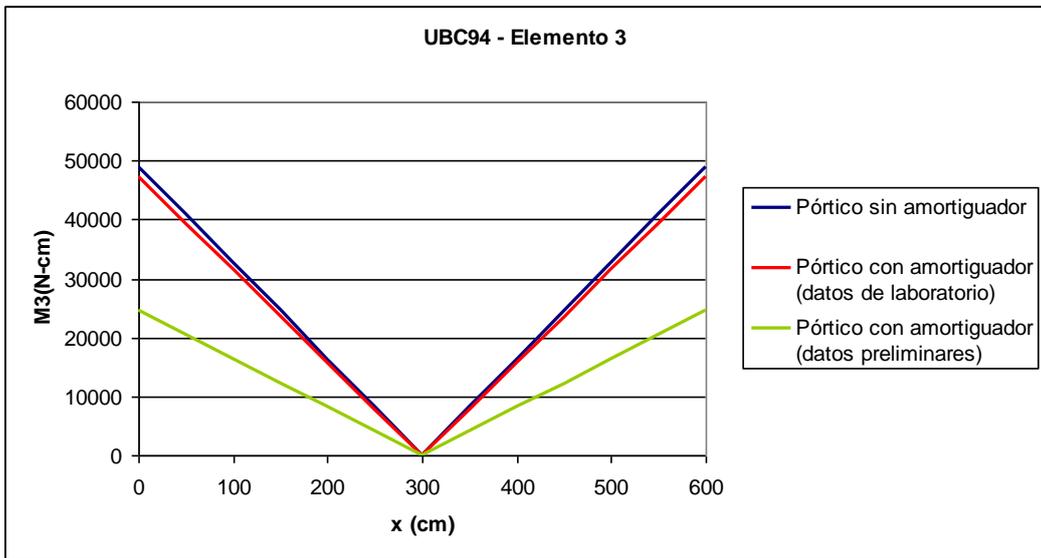


Figura 5.26 Momento flector UBC 94 - viga

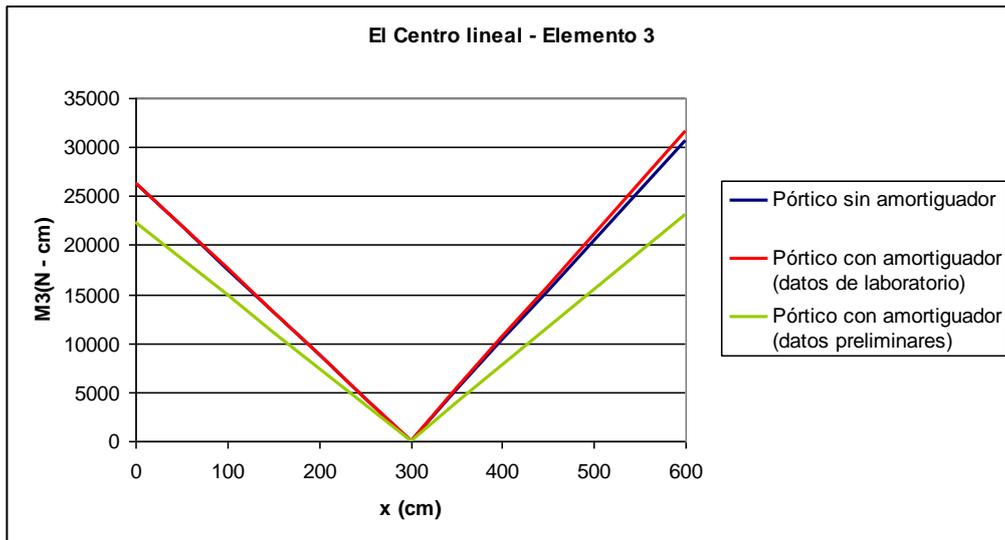


Figura 5.27 Momento flector El Centro lineal - viga

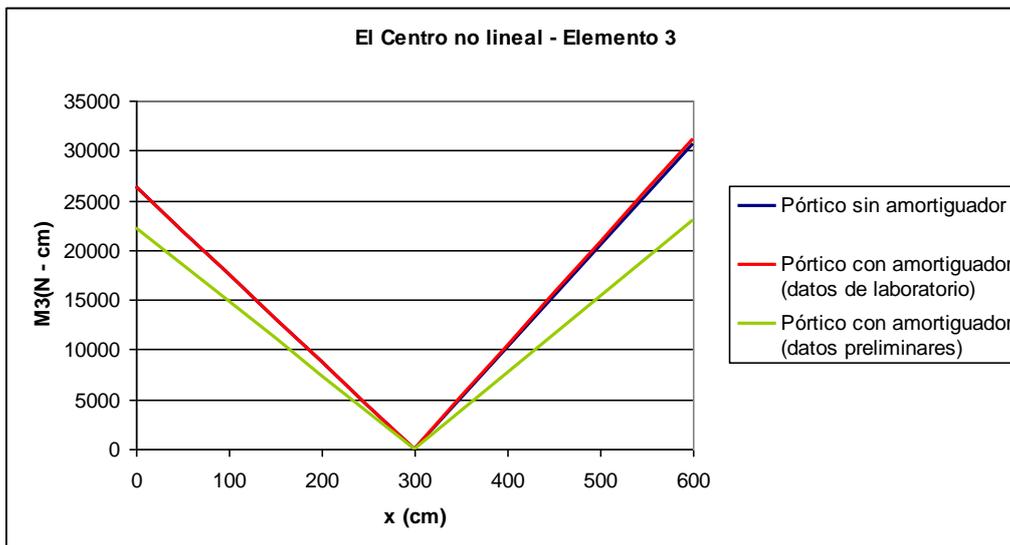


Figura 5.28 Momento flector El Centro no lineal - viga

5.2.3 RESPUESTA DE LOS AMORTIGUADORES

La Figura 5.29 muestra el comportamiento histerético del amortiguador de ensayo (instalado en el pórtico) ante las condiciones de carga del acelerograma del sismo “El Centro”. Se puede observar que no se presenta una curva que represente notablemente el comportamiento del amortiguador, por lo que fue necesario realizar los ensayos especificados en el Capítulo 3.

Comparando este comportamiento con el del amortiguador de ejemplo (Figura 5.30) se puede observar que aunque poseen desplazamientos que no varían significativamente entre sí, la diferencia en las fuerzas de salida son muy grandes. El amortiguador de ejemplo es el que presenta mayor fuerza de salida.

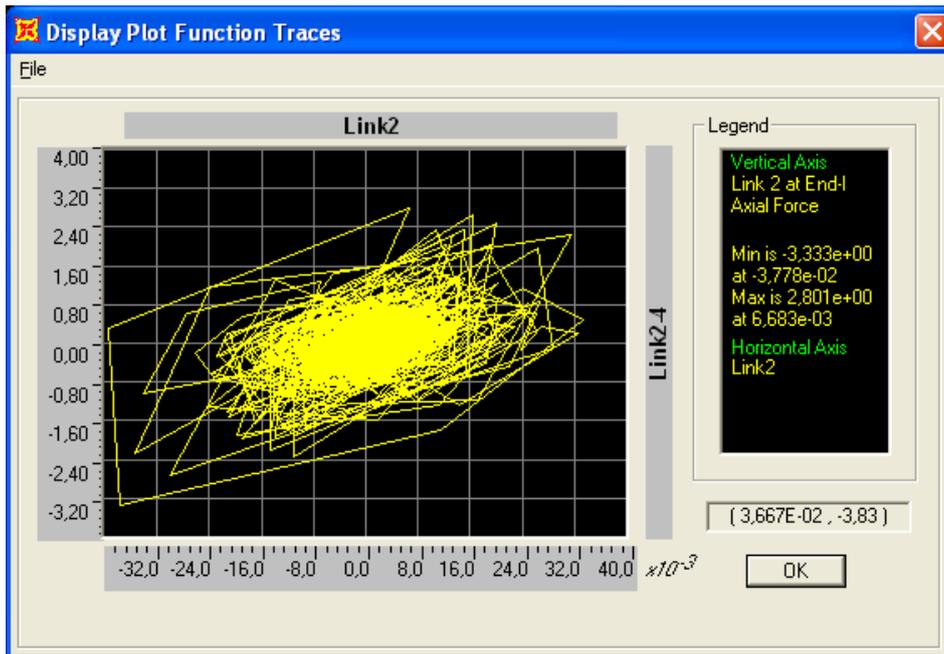


Figura 5.29 Comportamiento histerético amortiguador (datos laboratorio)

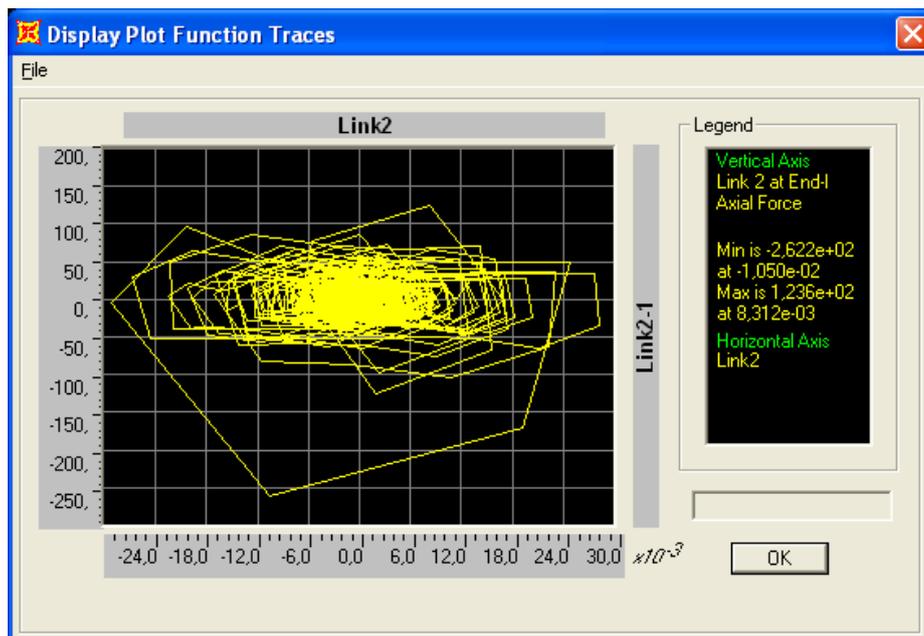


Figura 5.30 Comportamiento histerético amortiguador (datos preliminares)

Las figuras 5.3, 5.32 y 5.33 muestran las deformaciones máximas y fuerzas axiales de salida de los amortiguadores. El amortiguador de ejemplo presenta menores deformaciones ante las mismas cargas sísmicas. Sin embargo las fuerzas de salida son mayores, lo que indica que en el comportamiento óptimo se necesita mayor elasticidad efectiva.

También se puede observar que las fuerzas necesarias para comprimir los amortiguadores son mayores, lo que demuestra el comportamiento descrito para los amortiguadores telescópicos en el Capítulo 2, en el cual se especifica una necesidad de mayor resistencia del amortiguador en compresión.

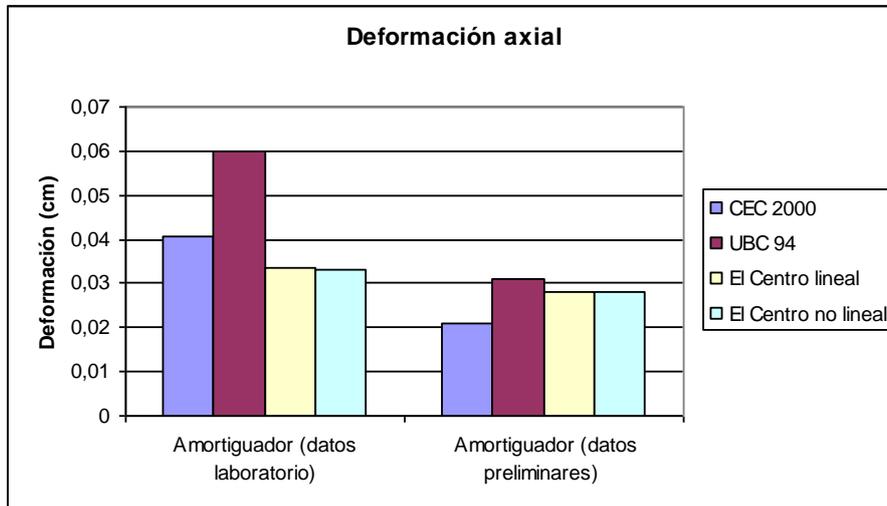


Figura 5.31 Deformaciones axial de los amortiguadores

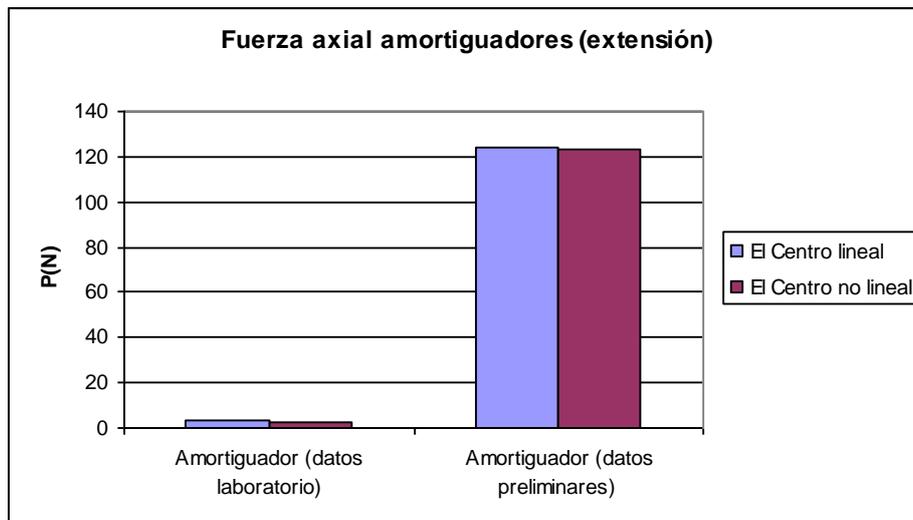


Figura 5.32 Fuerzas de extensión de los amortiguadores

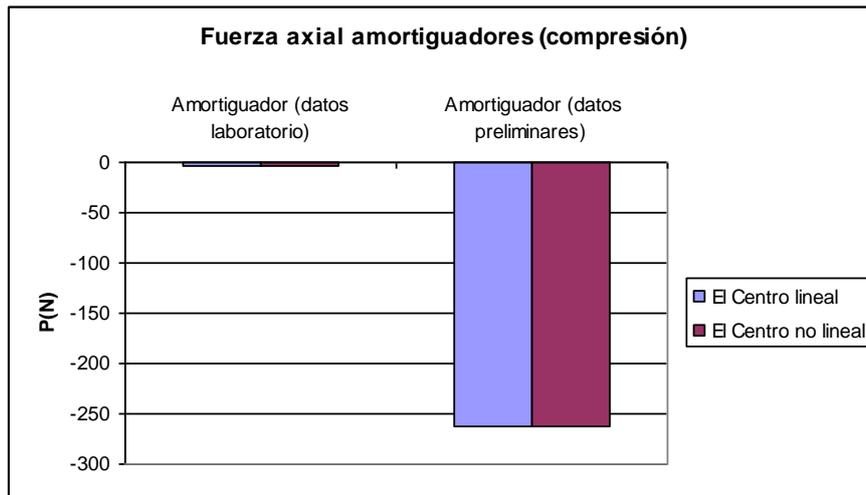


Figura 5.33 Fuerzas de compresión de los amortiguadores

5.2.4 ANÁLISIS ESPECTRAL

En la Figura 5.34 se muestra una comparación de los valores de amortiguamiento del pórtico ante las cargas espectrales. Estas relaciones de amortiguamiento se presentan únicamente para el período natural de la estructura, lo que implica que son una respuesta del análisis modal.

El amortiguador de ensayo solo incrementa un 0,5% al amortiguamiento de la estructura. El amortiguador de ejemplo incrementa esta relación hasta el 50% , lo que se encuentra dentro de los niveles aceptables para estructuras metálicas con disipación de energía.

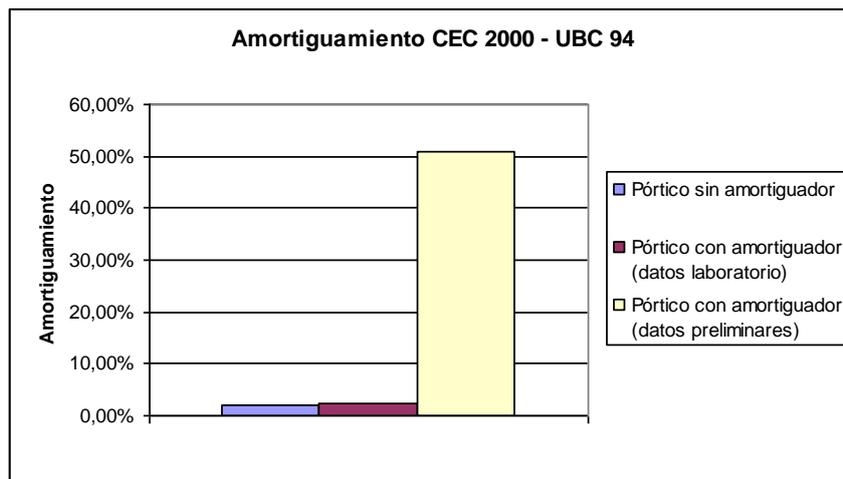


Figura 5.34 Amortiguamiento de la estructura

En la Figura 5.35 se comparan las aceleraciones espectrales de la estructura. Se puede observar una disminución notable para el amortiguador de ejemplo, ya que con la

implementación de este se aumenta el coeficiente de amortiguamiento viscoso en la estructura, y por lo tanto su relación con el crítico.

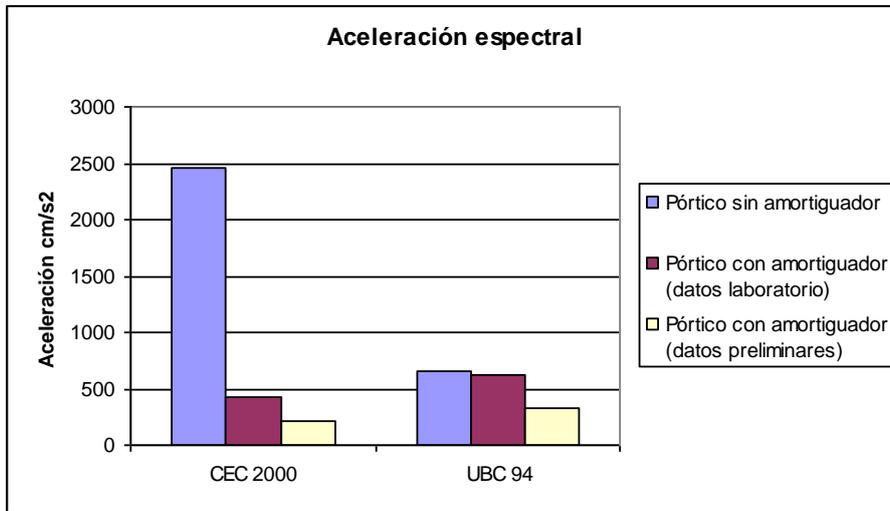


Figura 5.35 Aceleración espectral de la estructura

La combinación de las propiedades de elasticidad y coeficiente de amortiguamiento efectivos mayores hacen que se reduzca la respuesta de la estructura ante las cargas sísmicas, como se puede observar en la Figura 5.36. Esta combinación óptima es obtenida por el fluido de trabajo y la respuesta de la estructura disminuye notablemente en el análisis CEC 2000 ya que sus aceleraciones espectrales son muy grandes, lo que lo hace un método muy conservador, además que el amortiguador se comporta como un elemento rígido ante dicha carga.

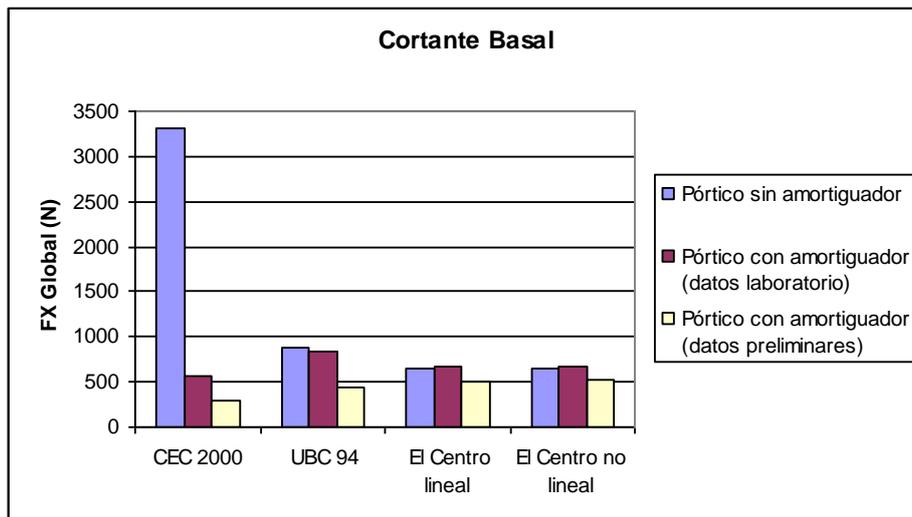


Figura 5.36 Cortante Basal

5.2.5 ANÁLISIS ENERGÉTICO

Se puede observar en la Figura 5.37 que el pórtico sin amortiguador disipa casi toda la energía de entrada en el amortiguamiento modal (o inherente a la estructura). La energía de entrada al sistema depende en gran parte del amortiguamiento global. Si este aumenta, aumenta la energía del sismo que absorbe la estructura.

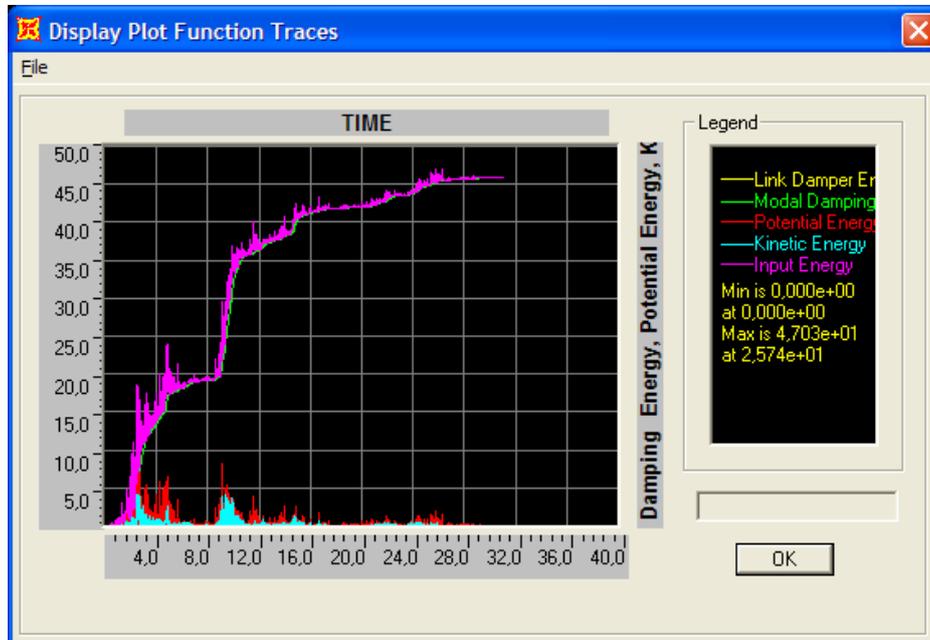


Figura 5.37 Variación de la energía en el tiempo – Pórtico sin amortiguador

Si se utiliza el amortiguador de ensayo se disipa alrededor del 10% de la energía como se observa en la Figura 5.38. Pero este resultado, como se indicó anteriormente, no se debe aceptar, ya que la energía disipada se debe mayormente al comportamiento elástico del amortiguador y como un elemento adicional de la estructura.

No se debe confundir la energía absorbida por el amortiguador en el ensayo ya que las condiciones de entrada de energía eran muy diferentes a las reales. En el ensayo casi toda la energía proveniente de la máquina era absorbida por el amortiguador, en la estructura también intervienen los elementos.

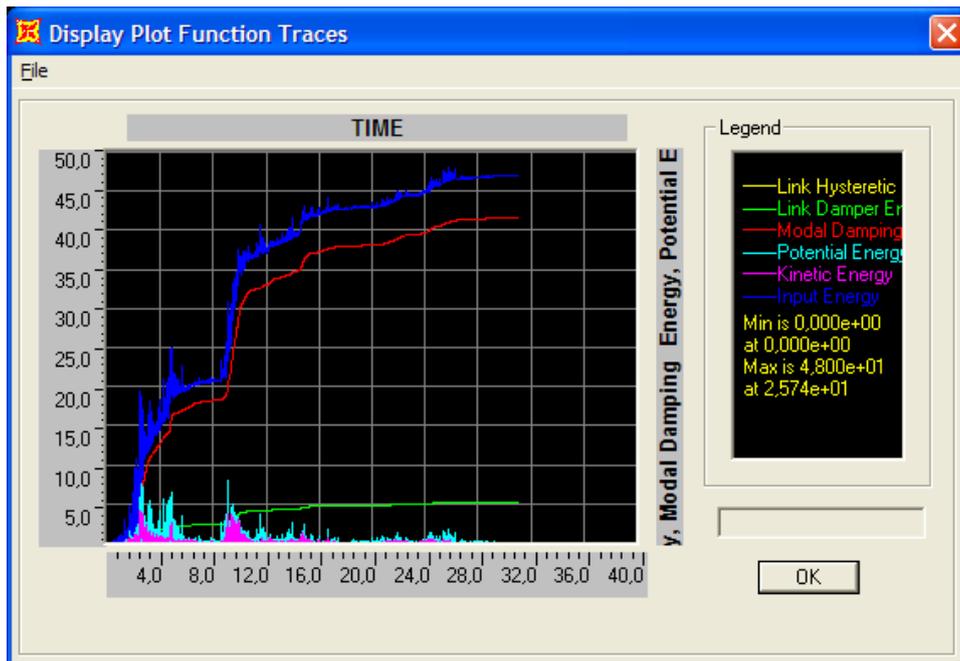


Figura 5.38 Variación de la energía en el tiempo – Pórtico con amortiguador (datos de laboratorio)

El amortiguador con las propiedades indicadas preliminarmente (o de ejemplo) tiene un comportamiento óptimo ya que además de reducir de manera significativa la demanda de energía de los elementos de la estructura, absorbe casi toda la energía de entrada al sistema (Figura 5.39) y funcionando propiamente como amortiguador (reduciendo la oscilación de la estructura).

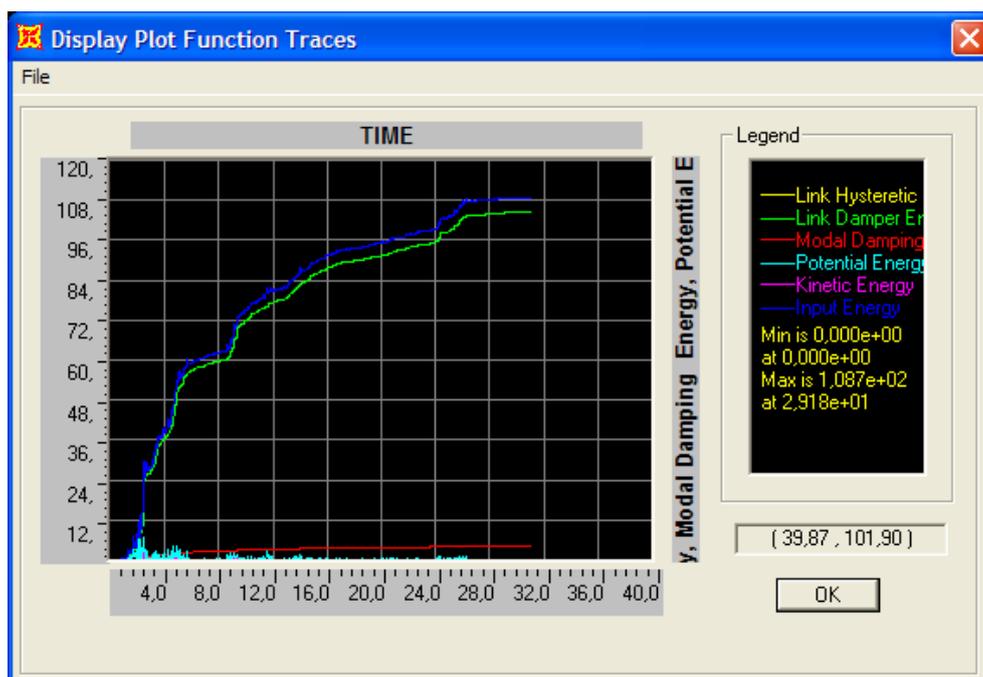


Figura 5.39 Variación de la energía en el tiempo – Pórtico con amortiguador (datos preliminares)

5.3 ADAPTACIÓN DE RESULTADOS A ESTRUCTURAS REALES

5.3.1 DISPOSITIVOS UTILIZADOS ACTUALMENTE

Para analizar las propiedades óptimas de un amortiguador se pueden tomar como ejemplo los amortiguadores Taylor Devices, que comercializan este tipo de dispositivos tanto para aislamiento de base como amortiguadores de disipación de energía.

Los amortiguadores de disipación de energía están disponibles con fuerzas de salida desde las 2000 hasta las 2000000 de libras de salida, con deformaciones axiales máximas de más de 6 pulgadas. La salida para estos elementos es lineal, es decir la fuerza es proporcional a la velocidad, lo que permite amortiguamientos mayores al 50% del crítico en cualquier estructura.

Este tipo de amortiguadores han sido estudiados en el Centro Multidisciplinario de Investigación e Ingeniería Sísmica (MCEER por sus siglas en inglés) Universidad Estatal de New York en Buffalo, de cuyos estudios provienen los datos del amortiguador de ejemplo (SUNY Buffalo Report).

En muchos amortiguadores se necesita una pequeña cantidad de amortiguamiento comparada con la elasticidad de sus elementos. Por ejemplo en un automóvil los amortiguadores son utilizados para reducir las oscilaciones de los resortes que soportan las cargas de choque.

Los amortiguadores viscosos reducen los esfuerzos y las deflexiones debido a que la fuerza de salida proveniente del amortiguamiento está completamente fuera de fase con los esfuerzos debidos a la flexión de las columnas. Este comportamiento se debe a que su fuerza depende de la velocidad, al contrario de otros dispositivos (elasto plásticos o plásticos) cuya fuerza de salida

depende de la deformación, por lo que para reducir esta deformación aumentan los esfuerzos de las columnas. La máxima fuerza de salida del amortiguador se produce cuando se produce la máxima velocidad, y esto se presenta cuando las columnas regresan a la posición en la cual no presentan deformación alguna.

Los amortiguadores viscosos no se ven afectados por los cambios de temperatura al poseer dispositivos internos que actúan como termostatos. Además permite que la estructura vuelva a su posición original al no presentar deformación permanente.

Para dimensionar dichos amortiguadores es necesario determinar las fuerzas y deformaciones máximas a las que estará sometido, además de la variación en el tiempo a fin de determinar los parámetros de ensayo de prototipos (como los mostrados en el Capítulo 3).

Para el montaje del amortiguador como elemento adicional del pórtico se necesitan placas base, cuya deformación no sea mayor de 2 pulgadas. Estas placas base se adaptan al brazo extensivo del amortiguador (Figura 5.42), el cual se enrosca para determinar la posición de equilibrio. La sección de estas placas se selecciona de acuerdo a las fuerzas de salida del amortiguador provenientes del análisis dinámico como se indica en la Figura 5.40. En el análisis lineal por historia del tiempo son consideradas las propiedades de estas placas pero solamente como una revisión general y no para el diseño del amortiguador.

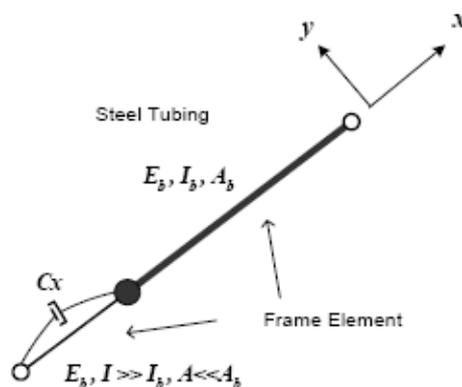


Figura 5.40 Modelo del amortiguador y el arriostamiento transversal*

La fabricación de estos dispositivos se da con aceros de alta calidad, finamente pulidos e impregnados con Teflón. El pistón de acero 17 – 4 PH, se protege con hojas de acero transversales para evitar su deformación ante aplicaciones de deformación grandes. El conjunto es protegido con tratamientos superficiales para evitar la corrosión. Un ejemplo de las dimensiones se muestra en la Figura 5.41



Figura 5.41 Amortiguador de fluido viscoso – 50000 libras**

El fluido de trabajo de estos elementos es silicona fluida fabricada con las normas internacionales. Este fluido circula por orificios mostrados en la Figura. 5.42 .Por lo tanto el coeficiente de amortiguamiento y la fuerza de salida dependen de la apertura de estos orificios y la viscosidad del fluido de trabajo. Debido a la compresibilidad del fluido, la reducción de volumen dentro del cilindro provoca una fuerza elástica que aumenta la rigidez del conjunto cuando aumenta la velocidad del pistón. Es por esta razón que existe un punto de corte, es decir una frecuencia bajo la cual no se produce dicha elasticidad. Las temperaturas de operación no son un problema ya que van desde un rango desde -40 °F hasta 160 °F (40 °C hasta 70 °C aproximadamente)

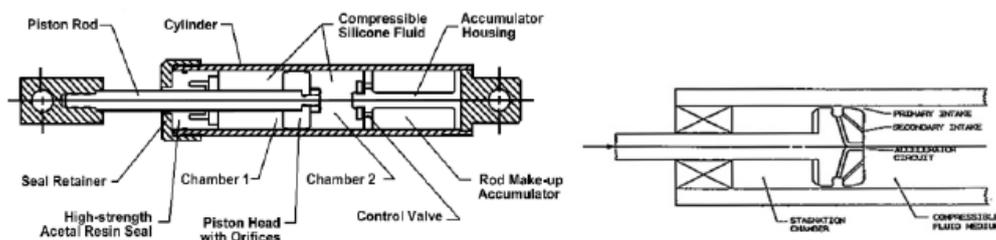


Figura 5.42 Control del fluido viscoso*

* CASAROTTI CH. Bridge Isolation and Dissipation Devices

** www.taylordevices.com

* CASAROTTI CH. Bridge Isolation and Dissipation Devices

Los valores obtenidos para el amortiguador de ejemplo fueron obtenidos de ensayos muy similares a los realizados en el Capítulo 3 (Figura 3.5). Se obtuvieron valores entre 135 y 185 N – s/cm (lo que da un promedio de 160 N – s/cm). Los valores de elasticidad para el análisis no lineal (1000000 N/cm) consideran las placas de unión, el material de fabricación y el comportamiento de fluido de trabajo (elasticidad en serie con el amortiguamiento). Para el análisis no lineal se busco llevar a cabo solamente el amortiguamiento del dispositivo combinado con la elasticidad de los demás elementos del pórtico.

5.3.2 ADAPTACIÓN PARA EL AMORTIGUADOR DE ENSAYO

De acuerdo a varias observaciones e investigaciones se ha determinado que el factor más influyente en el fenómeno de amortiguamiento es la elasticidad y el coeficiente amortiguamiento del conjunto amortiguador. Para tal motivo se necesita que el fluido de trabajo del amortiguador tenga una alta elasticidad. Para poder cumplir con este requerimiento, se puede asociar la elasticidad del fluido con su viscosidad; ya que si esta aumenta, se pueden aumentar las propiedades elásticas y de amortiguamiento. La viscosidad es una medida de la resistencia de dicho fluido.

El fluido de trabajo utilizado en el amortiguador de ensayo es aceite hidráulico. La viscosidad de los aceites de amortiguador en función de la temperatura se observa en la Figura 5.43

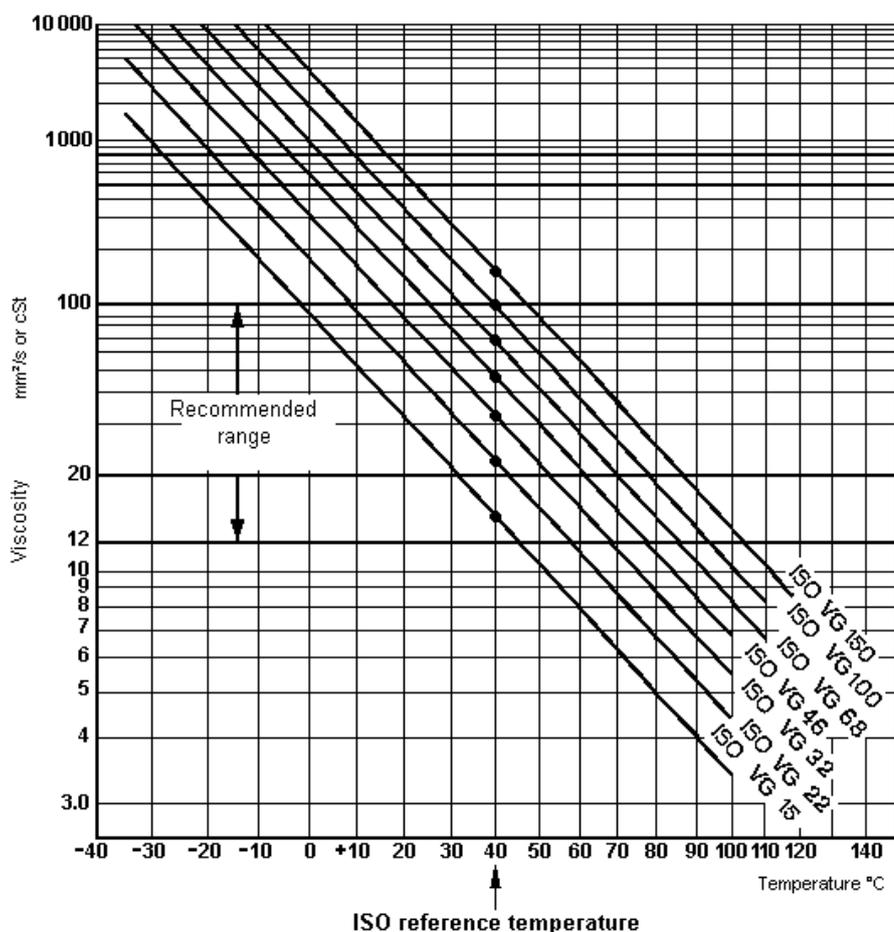


Figura 5.43 Viscosidad del aceite hidráulico en función de la temperatura*

Se puede observar que la viscosidad del aceite hidráulico a temperatura ambiente llega hasta los 100 cSt, y en condiciones extremas (-40 °C) llega hasta 10000 cSt.

Los amortiguadores de ejemplo (SUNY Buffalo o Taylor Devices) utilizan silicona líquida como fluido de trabajo (polímero polydimethylsiloxano de alta densidad). Esta silicona es de alta compresibilidad, alta acción amortiguadora y baja sensibilidad a la temperatura. De acuerdo a normas internacionales existen siliconas con rangos de viscosidad desde 10000 cSt hasta 100000 cSt, que no varían significativamente con la temperatura. Las propiedades se muestran en la Figura 5.44.

* www.phoenix.sce.fct.unl.pt

	10,000cSt	30,000cSt	60,000cSt	100,000cSt
Appearance	Clear	Clear	Clear	Clear
Specific Gravity	0.975	0.971	0.971	0.971
Refractive Index	1.4036	1.4036	1.4036	1.4037
Flash Point (Open Cup) °C (°F)	>326°C (>620°F)	>326°C (>620°F)	>326°C (>620°F)	>326°C (>620°F)
Pour Point °C (°F)	-47°C (-53°F)	-43°C (-45°F)	-41°C (-42°F)	-33°C (-27°F)
Surface Tension @ 25°C	21.3	21.5	21.5	
Operating Temp Range (Open System) °C (°F)	-37°C (-35°F) to 177°C (350°F)			
Operating Temp Range (Closed System) °C (°F)	-37°C (-35°F) to 232°C (450°F)			
Thermal Conductivity (BTU)	0.090	0.090	0.090	0.090
Dielectric Strength (volts/mil)	400	400	400	400

Figura 5.44 Propiedades de la silicona fluida *

Se puede determinar que la relación de las viscosidades, aún en situaciones extremas es de 10 veces, y a temperatura ambiente cercana a 1000 veces, por lo que se puede decir que es un factor crítico de la fuerza de salida, la elasticidad y el amortiguamiento dentro de un pórtico sometido a cargas sísmicas.

La relación entre el esfuerzo cortante y la viscosidad se puede expresar como:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (5.1)$$

donde $\frac{du}{dy}$ es la deformación angular del fluido, $\tau = \frac{F}{A}$ es el esfuerzo cortante y

μ es la viscosidad del fluido. Para un fluido newtoniano la viscosidad es constante y por lo tanto esta relación es lineal.

Es también importante tomar en cuenta la geometría de las válvulas u orificios del pistón dentro del amortiguador. A mayor número de orificios o mayor sea su diámetro habrá menor resistencia al movimiento, por lo que se necesita una regulación exacta de estos parámetros para el fluido de trabajo del amortiguador de ensayo.

A fin de comprobar esta información se realizará una simulación del pórtico sometido a cargas sísmicas con un amortiguador dimensionalmente similar al

* Information about High Viscosity Silicone Fluids 200® Fluid

original pero que presenta algunas variaciones con el objetivo de mejorar la capacidad de amortiguamiento del mismo:

- El fluido de trabajo será silicona líquida de alta densidad (100000 cSt), con las mismas propiedades que las utilizadas para los amortiguadores de ejemplo (marca Taylor Devices).
- Los orificios o válvulas serán ajustados para aumentar la capacidad de amortiguamiento del conjunto amortiguador, pero sin modificar las dimensiones de los cilindros, cámaras y pistón.

Al cambiar los parámetros mencionados anteriormente, el amortiguador de aceite hidráulico originalmente seleccionado para los ensayos pasa a asemejarse en gran medida al amortiguador modelo 1 – ½ x 3 HS de la Figura 5.45:

1 Model	3/4 x 1/2 HS	3/4 x 1 HS	1 x 1 HS	1 x 2 HS	1-1/4 x 1 HS	1-1/4 x 2 HS	1-1/2 x 2 HS	1-1/2 x 3 HS
2 Energy Capacity (in-lbs.)	480	960	2,000	4,000	4,000	8,000	12,800	19,200
3 Shock Force (lbs.)	1,200	1,200	2,500	2,500	5,000	5,000	8,000	8,000
4 Stroke (in.)	.50	1.00	1.00	2.00	1.00	2.00	2.00	3.00
5 Plunger Diameter (in.)	.56	.56	.81	.81	1.09	1.09	1.35	1.35
6 Body Length (in.)	3.12	4.62	5.00	8.00	5.25	8.25	8.75	11.75
7 Body Diameter (in.)	.75	.75	1.00	1.00	1.37	1.37	1.62	1.62
8 Mounting Stud Thread	3/8-24	3/8-24	1/2-20	1/2-20	3/4-16	3/4-16	1-14	1-14
9 Mounting Stud Length	.38	.38	.50	.50	.75	.75	1.00	1.00

Figura 5.45 Amortiguadores Serie M Taylor Devices *

Tomando en cuenta las propiedades de la figura 5.45, y utilizando las ecuaciones 3.1 a 3.4 se pueden obtener las propiedades relacionadas al amortiguamiento del conjunto que serán utilizadas para realizar la nueva simulación:

Tabla 5.9 Valores a utilizar en la simulación (modificación amortiguador de ensayo)

Valores para el análisis lineal	
Elasticidad efectiva (N/cm)	0
Coefficiente de amortiguamiento efectivo (N – s/cm)	45
Valores para el análisis no lineal	

* www.taylordevices.com

Elasticidad (N/cm)	36000
Coefficiente de amortiguamiento (N – s/cm)	45
Exponente de amortiguamiento	1

Fuente: SAP 2000

Realizando la simulación se obtuvieron los siguientes resultados:

- Fuerza axial amortiguador, y comparación con los otros amortiguadores simulados en la estructura (Figura 5.46), donde la fuerza de respuesta aumenta (debido a la relación expuesta en la ecuación 5.1).

Tabla 5.10 Fuerza axial amortiguador (modificación)

Terminación	Tipo de Análisis	Respuesta	P
			N
I	Por historia del tiempo lineal	Máx	60
J			60
I		Mín	-99,43
J			-99,43
I	Por historia del tiempo no lineal	Máx	61
J			61
I		Mín	-100,44
J			-100,44

Fuente: SAP 2000

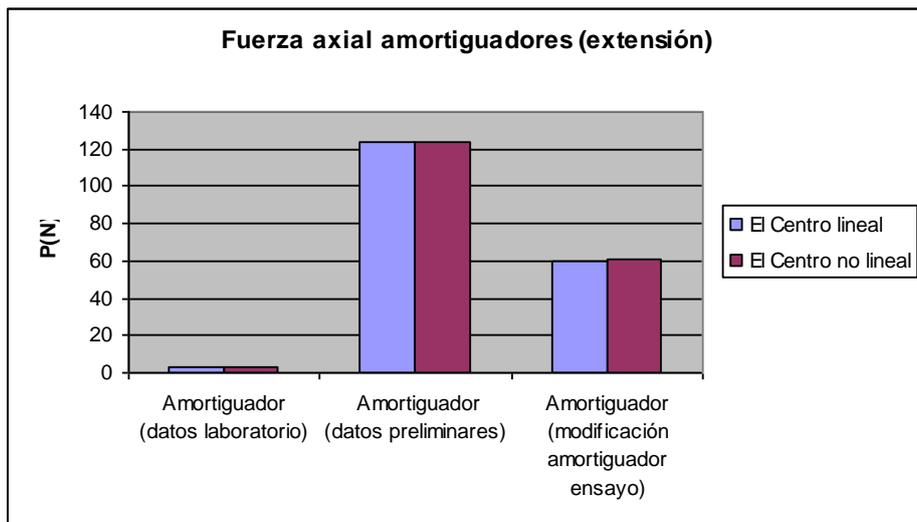


Figura 5.46 Fuerza axial amortiguadores (extensión)

- Análisis espectral, y la comparación de los valores de amortiguamiento y aceleración espectral de los otros amortiguadores simulados.

Tabla 5.11 Análisis espectral – Pórtico con amortiguador (modificación)

Espectro	Modo	Período	Relación amortiguamiento	Aceleración U1	Amplitud U1
		s		cm/s ²	cm
CEC2000	1	0,065221	0,1575	257,184	-0,032275
CEC2000	2	0,004598	0,0248	422,258	-3,268E-07
CEC2000	3	0,004579	0,0296	406,732	-6,146E-09
CEC2000	4	0,004572	0,02	441,57	-3,763E-07
UBC94	1	0,065221	0,1575	377,551	-0,04738
UBC94	2	0,004598	0,0248	392,436	-3,037E-07
UBC94	3	0,004579	0,0296	377,936	-5,711E-09
UBC94	4	0,004572	0,02	410,284	-3,496E-07

Fuente: SAP 2000

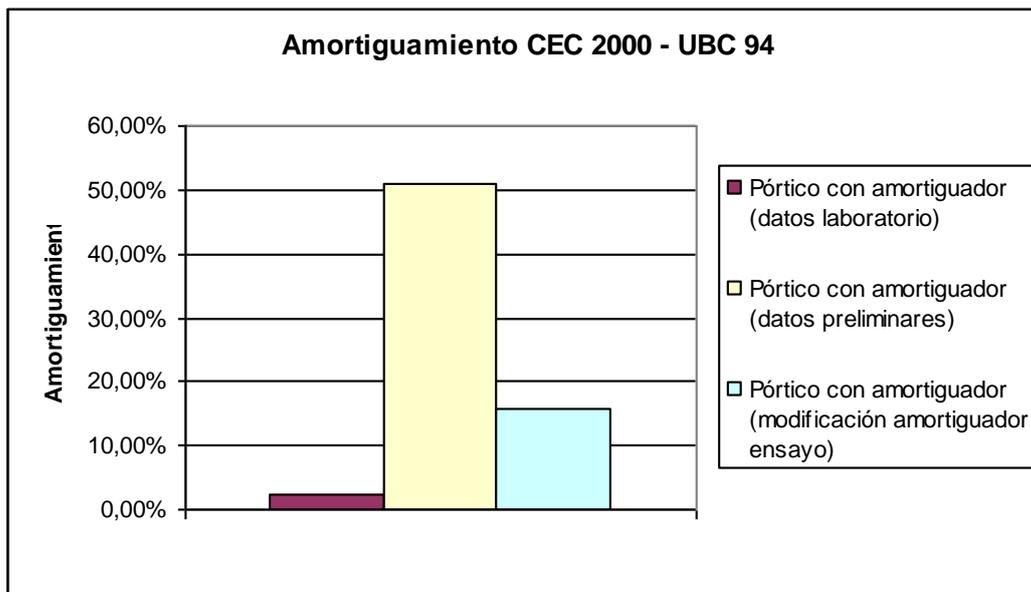


Figura 5.47 Amortiguamiento de la estructura (solo amortiguadores)

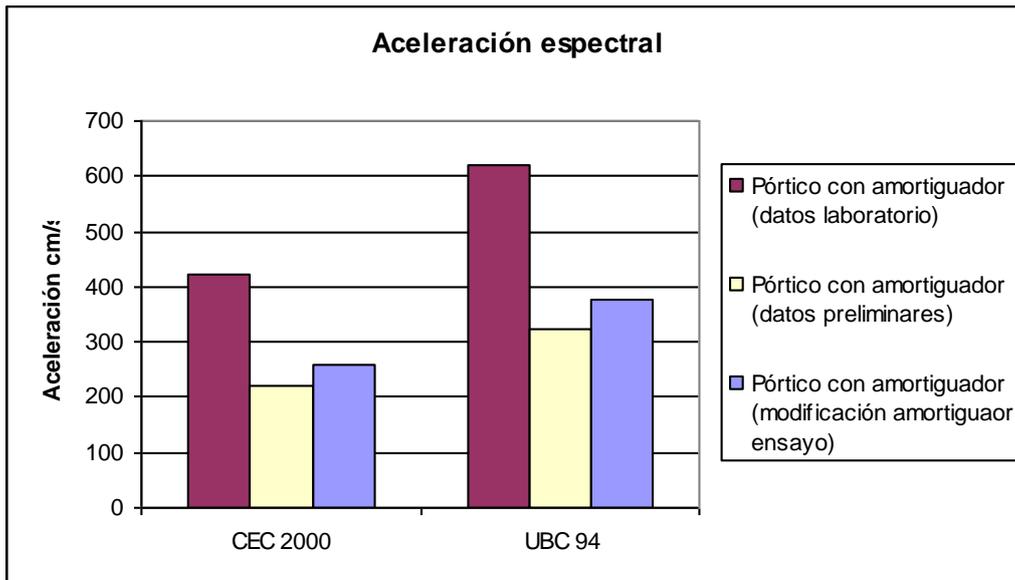


Figura 5.48 Aceleración espectral de la estructura (solo amortiguadores)

- Análisis energético y la variación de la energía a través del evento sísmico. Se puede observar en la Figura 5.49 que el amortiguador modificado disipa una buena parte de la energía (alrededor del 90%) y con el amortiguamiento deseado para una estructura (cercano al 20%) como se observa en la Figura 5.47.

Tabla 5.12 Análisis energético – Pórtico con amortiguador (modificación)

Tipo de análisis	Componentes de la energía					
	Entrada	Cinética	Elástica	Amortiguamiento estructura	Amortiguador viscoso	Error
	N-cm	N-cm	N-cm	N-cm	N-cm	N-cm
Por historia del tiempo lineal	67,9	4,15	13,24	67,37	0	1,02E-13
Por historia del tiempo no lineal	66,5	3,98	12,63	8,45	57,47	0,05657

Fuente: SAP 2000

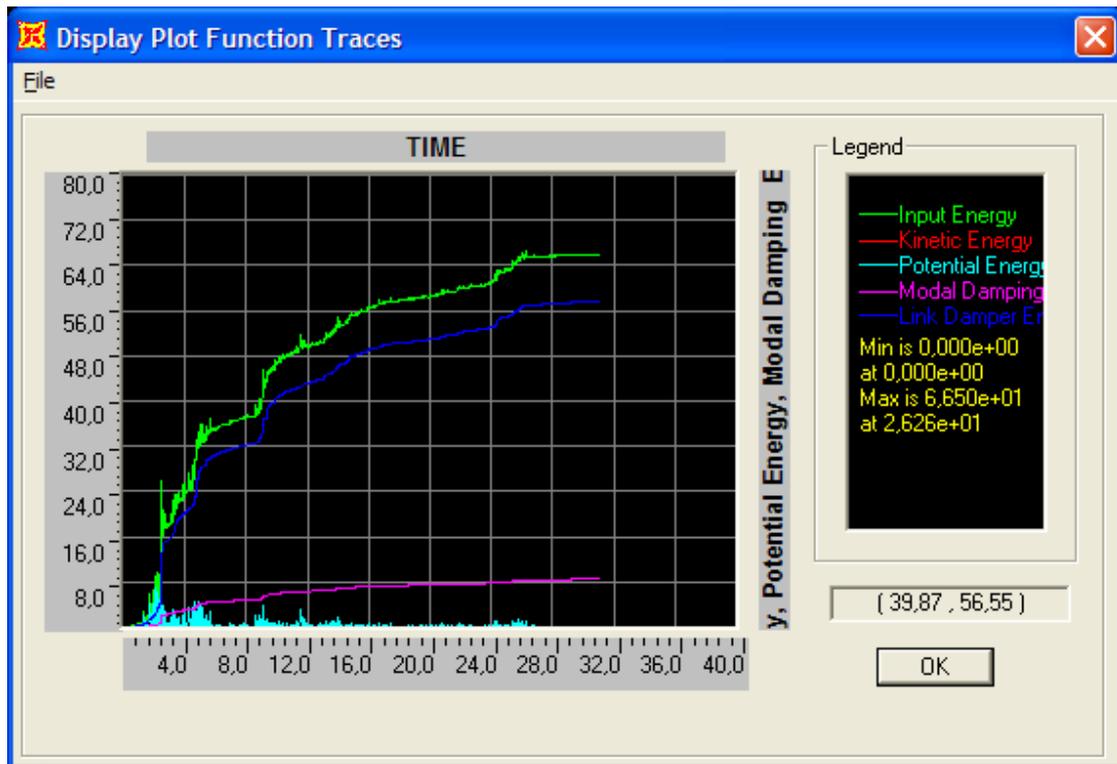


Figura 5.49 Variación de la energía en el tiempo – Pórtico con amortiguador (modificación)

- De forma general, se puede observar en la Figura 5.50 que el amortiguador modificado disminuye la respuesta de la estructura pero no en la misma proporción que un amortiguador fabricado para el propósito.

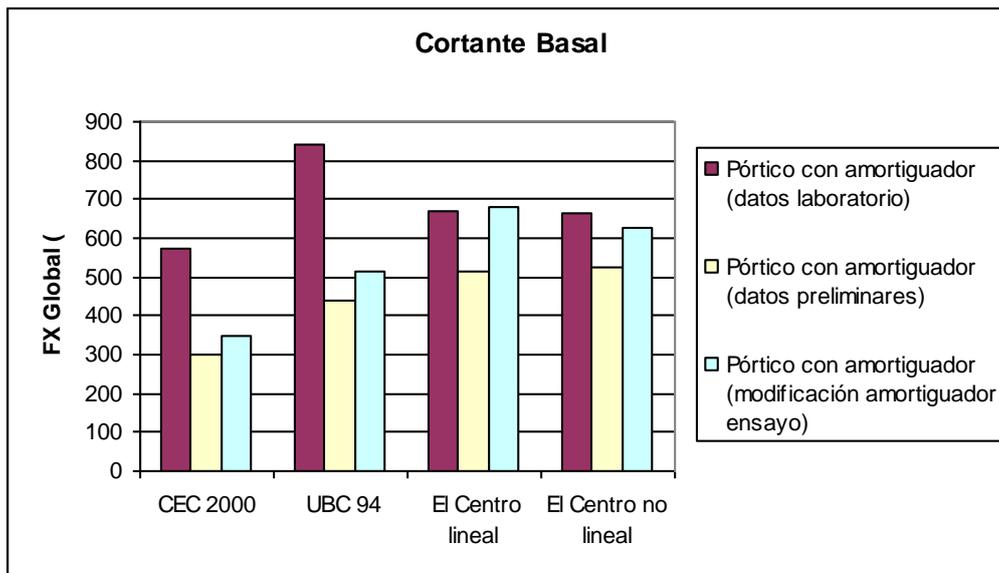


Figura 5.50 Cortante basal (solo amortiguadores)

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO

6.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

6.1.1 COSTOS INDIRECTOS

6.1.1.1 Misceláneos

Tabla 6.1 Descripción de costos misceláneos

No	Descripción	Costo Unitario	Costo Total
1	Libro acerca de Amortiguadores y Vibraciones	50	50
1	Libros acerca de Análisis Sísmico en Estructuras	50	50
7	Transporte	50	350
7	Suministros de Oficina	30	210
7	Otros	10	70
			730

6.1.2 COSTOS DIRECTOS

6.1.2.1 Materiales Directos

Tabla 6.2 Descripción de costos de materiales directos

No	Descripción	Costo Unitario	Costo Total
1	Amortiguador 1	70	70
1	Amortiguador 2	70	70
1	Ensayos Mecánicos de Materiales	150	150
1	Ensayos Dinámicos	150	150
			440

6.1.2.2 Remuneraciones

Tabla 6.3 Descripción de costos de remuneraciones

No	Descripción	Costo Unitario	Costo Total
1	Director de Tesis	750	750

Tabla 6.3 Descripción de costos de remuneraciones (Continuación)

1	Codirector de Tesis	450	450
2	Estudiantes	300	300
			1500

6.1.3 RESUMEN

Tabla 6.4 Resumen de costos

Total Costos Directos	1940
Total Costos Indirectos	730
Subtotal	2670
5% Imprevistos	133.5
Total	2803.5

El monto total de los costos fue financiado por los responsables del proyecto en su totalidad. El análisis económico involucra solamente los costos que implican la realización del presente proyecto y los métodos de financiamiento.

6.2 ANÁLISIS FINANCIERO

6.2.1 COSTOS Y GASTOS

Al ser un proyecto de investigación no tiene como objetivo la obtención de un producto tangible, sino el aporte de conocimientos. Para darle valor a este aporte se asume el proyecto como una

prestación de servicios de prácticas de laboratorio en las cuales se incluye la nueva información obtenida.

Tabla 6.5 Descripción de costos y gastos

COSTOS	TIPO DE COSTO	Valor
Prestación de Servicio Lab. Mecánica de Materiales	Costo de producción	150,00
Prestación de Servicio Lab. CAD - CAM	Costo de producción	150,00
Electricidad	Costo de producción	10,00
Mantenimiento de Equipos	Costo de producción	10,00
Movilización	Gasto de venta	38,40
Conexión a Internet	Costo de producción	20,00

Tabla 6.5 Descripción de costos y gastos (Continuación)

Material de oficina	Gasto de administración	210,00
TOTAL COSTOS Y GASTOS		588,40

6.2.2 INGRESOS

Se considera como ingreso el pago por parte de 20 alumnos, pagando 2 créditos al semestre por concepto de prácticas de laboratorio. El costo del crédito se asume como \$24.00.

Tabla 6.6 Descripción de ingresos

	Total
Prestación de Servicios a ESPE (Práctica de Laboratorio - Mecánica de Materiales)	960,00
Prestación de Servicios a ESPE (Práctica de Laboratorio - CAD - CAM)	960,00
TOTAL INGRESOS	1920,00

6.2.3 DEPRECIACIÓN

Para el cálculo de la depreciación se considera un método lineal, es decir el valor de los activos para la vida útil. Los amortiguadores tienen una vida útil de 5 años (en las condiciones de los ensayo). Los libros tienen una vida útil definida por el uso que se le de, sin embargo su valor tecnológico puede disminuir.

Tabla 6.7 Valores de depreciación de activos

	Año 1	Año 2
Amortiguador 1	14,00	14,00
Amortiguador 2	14,00	14,00

Libro de Amortiguadores y Vibraciones	15,00	15,00
Libro de Estructuras Metálicas	15,00	15,00

6.2.4 INVERSIONES Y VALOR RESIDUAL

Se considera como inversión los materiales necesarios y del capital de trabajo de estudiantes y asesores (director y codirector) para hacer el presente proyecto, además del formato de las prácticas de laboratorio posteriores.

Tabla 6.8 Descripción de inversiones y valor residual

INVERSIONES	Valor	Total inversión	Valor residual
Amortiguador 1	70,00	70,00	42,00
Amortiguador 2	70,00	70,00	42,00
Libro de Amortiguadores y Vibraciones	50,00	50,00	20,00
Libro de Estructuras Metálicas	50,00	50,00	20,00
Capital de Operación	1500,00	1500,00	1500,00
TOTAL		1740,00	1624,00

6.2.5 FLUJO DE CAJA

Se asume como horizonte de vida del proyecto 2 años. Esto no significa que deje de ser un proyecto rentable sino que puede dar paso a otro proyectos de investigación, diseño o construcción.

Tabla 6.9 Flujo de caja

	Año 0	Año 1	Año 2
Ingresos	0,00	1920,00	1920,00
(-) Costos de producción	0,00	340,00	340,00
(-) Gastos de venta	0,00	38,40	38,40
(-) Gastos de administración	0,00	210,00	210,00
(-) Depreciación	0,00	58,00	58,00
= Utilidad antes de impuestos y participación	0,00	1273,60	1273,60
(-) 15% participación	0,00	191,04	191,04
= Utilidad antes de impuestos	0,00	1082,56	1082,56

(-) 25% de impuestos	0,00	270,64	270,64
= Utilidad neta	0,00	811,92	811,92
(+) Depreciación	0,00	58,00	58,00
(-) Inversión	240,00	0,00	0,00

Tabla 6.9 Flujo de caja (Continuación)

(-) Capital de trabajo	1500,00	0,00	0,00
(+) Valor residual	0,00	0,00	1624,00
FLUJO DE CAJA EFECTIVO	-1740,00	869,92	2493,92

6.2.6 CÁLCULO DEL VALOR ACTUAL NETO CON TASA DE DESCUENTO DE 5%

Se asume una tasa de descuento baja ya que el proyecto es de bajo riesgo, al definirse horizontes de vida fijos y remuneraciones exactas.

Tabla 6.10 Cálculo del VAN

Año	Flujo efectivo	Tasa 5%	Valor Actual
0	-1740,00	0,00	-1740,00
1	869,92	1,05	828,50
2	2493,92	1,10	2262,06
VAN			1350,55

6.2.7 CÁLCULO DE LA TASA INTERNA DE RETORNO

Debido a que la tasa e interés escogida es menor que el TIR se puede aceptar el proyecto como válido. Sin embargo este proyecto no tiene un valor financiero fijo sino que debe ser considerado como un proyecto de alto valor intelectual.

Tabla 6.11 Cálculo del TIR

Año	Tasa 40%	Valor Actual	Tasa 50%	Valor Actual	Tasa 47,2997%	Valor Actual
0	0,00	-1740,00	0,00	-1740,00	0,00	-1740,00
1	1,40	621,37	1,50	579,95	1,47300	590,58
2	1,96	1272,41	2,25	1108,41	2,16972	1149,42
TIR		153,78		-51,64		0,00

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

1. Un amortiguador telescópico hidráulico no es adaptable a una estructura metálica actuando como disipador de energía sísmica, ya que el mismo es solamente capaz de incrementar la capacidad de amortiguamiento de la estructura de 2% hasta 2.5%, lo cual no cumple con los requerimientos básicos de este tipo de elementos que tienen como objetivo incrementar la capacidad de amortiguamiento hasta un valor mínimo de 20%. Sin embargo es capaz de disipar hasta el 10% de la energía sísmica que entra al sistema al ser un elemento adicional del pórtico.

2. Las simulaciones realizadas abarcaron análisis de diferentes tipos de carga como son carga muerta, análisis sísmico espectral y análisis sísmico por acelerograma. Se realizaron un mínimo de dos estudios por cada tipo de carga para de esta manera realizar una comparación detallada de la respuesta de la estructura sometida a estas cargas. De esta manera se llegó a determinar que la carga más crítica a la que fue sometida la estructura fue el espectro de respuesta obtenido de acuerdo al Código Ecuatoriano de la Construcción 2000 ya que el mismo presenta un valor de aceleración del suelo máxima equivalente a 3.5 gravedades. Este análisis es demasiado conservador por lo que ha sido descartado para la comparación de resultados ya que da respuestas no aplicables a la realidad.

3. El comportamiento mecánico y dinámico del amortiguador varía según los parámetros de carga al que esté sometido en los ensayos. Las propiedades obtenidas de los ensayos (elasticidad efectiva y amortiguamiento efectivo) son distintas para cada frecuencia ya que la fuerza de salida del amortiguador es directamente proporcional a la

velocidad de movimiento del pistón. Sin embargo para las condiciones de carga como elemento adicional del pórtico (frecuencia cercana a 15Hz) se obtuvieron como resultados más relevantes una elasticidad efectiva de 150 N/cm y un amortiguamiento efectivo de 1.5 N – s/cm, los cuales no permiten al amortiguador trabajar como elemento disipador de energía sísmica al encontrarse estos valores muy por debajo de los requeridos para este tipo de servicio.

4. Se pudo comprobar que existe una frecuencia de corte, que para el presente caso es cercana a 5Hz, encima de la cual el elemento amortiguador presenta un comportamiento netamente rígido debido a las características del fluido que aumenta su elasticidad y disminuye su viscosidad. También se pudo observar que la respuesta del amortiguador es diferente para movimientos de extensión y compresión, debido a la disposición de las válvulas y cámaras dentro del amortiguador.
5. Por medio del SAP 2000 se pudieron simular cargas sísmicas de dos maneras con espectros de respuesta máxima de la estructura y con acelerogramas. Se ingresó un espectro de respuesta máxima basado en la norma CEC 2000, en el cual la aceleración máxima de respuesta era 3.5 gravedades. También se ingresó un espectro basado en la norma UBC 94 cuya máxima aceleración de respuesta es 1 gravedad.
6. El acelerograma utilizado fue el del sismo “El Centro”, el cual es una referencia muy utilizada para el análisis sísmico. En un acelerograma la aceleración varía en función del tiempo, la máxima aceleración del suelo registrada fue cercana a 0.3 gravedades. Se realizaron dos tipos de análisis con el acelerograma mencionado, un análisis lineal en el cual se considera el comportamiento elástico de los elementos, y otro no lineal en el cual se analiza el comportamiento no lineal de los elementos de la estructura.

7. Para simular el comportamiento de un amortiguador en el programa SAP 2000 dentro de un pórtico metálico fue necesario ingresar los valores obtenidos en los ensayos y los de un amortiguador de ejemplo, el cual tenía un elasticidad efectiva de 1000000 N/cm y 160 N – s/cm (valores obtenidos en ensayos). El valor de la elasticidad efectiva para el análisis lineal es de 0 N/cm para observar un comportamiento puramente de amortiguamiento. La salida para los amortiguadores es lineal lo que indica que el exponente de amortiguamiento es 1.
8. El análisis espectral muestra que la estructura sin amortiguador tiene una relación de amortiguamiento de 2% (estructura metálica). Con el amortiguador de ensayo este valor se eleva apenas hasta el 2.5%. Utilizando el amortiguador de ejemplo el amortiguamiento se eleva hasta el 51%, lo que indica que se puede mejorar la respuesta de la estructura con estos dispositivos.
9. El análisis histórico no lineal utilizando el acelerograma indica los valores de energía manejados dentro de la estructura. El pórtico sin amortiguador disipa 45.91 N – cm de 47.03 N – cm de energía de entrada solamente en amortiguamiento inherente. El amortiguador de ensayo disipa 5.25 N –cm de 48 N – cm de energía de entrada a la estructura. El amortiguador de ejemplo disipa 104.34 N – cm de 108.65 N – cm de energía de entrada a la estructura. La energía de entrada a la estructura aumenta si existe mayor amortiguamiento global de la estructura.
10. Las fuerzas de salida para el amortiguador de ensayo en el análisis histórico no lineal son de 2.8 N en extensión y 3.33 N en compresión. El amortiguador de ejemplo tiene fuerzas de salida de 123.6 N en extensión y 262.2 N en compresión. Esto indica que la fuerza necesaria para poder deformar al amortiguador de ejemplo debe ser mayor, debido a las características viscosas de su fluido de trabajo.

11. De acuerdo al promedio de la reacción de base, que es una medida de la respuesta de la estructura, el amortiguador de ensayo reduce la respuesta de la estructura en un 0.9% comparado con el amortiguador de ejemplo que reduce la respuesta de la estructura en un 30%.
12. Si se realizan los cambios necesarios para mejorar el amortiguador de ensayo, como son la implementación de silicona como fluido de trabajo y la regulación de válvulas, se obtuvo en el análisis espectral un aumento del amortiguamiento estructural hasta 15.75%, disipando 57.47 N – cm de 66.5 N – cm de energía de entrada a la estructura. Además su fuerza de salida en extensión aumenta a 60 N por el aumento de viscosidad del fluido de trabajo. Se puede decir que su comportamiento como elemento adicional es cercano al óptimo ya que disminuye la reacción de base (respuesta de la estructura) en un 17.27%.
13. Con respecto al análisis económico el costo de la presente investigación fue de \$2803.50, financiado totalmente por los interesados. En el análisis financiero se obtuvo un TIR de 47.3% que indica una gran rentabilidad del proyecto si se aplicaran los conocimientos en la realización de prácticas de laboratorio. En general la presente investigación es invaluable ya que sienta las bases para futuras investigaciones y amplía los conocimientos del área.

7.2 RECOMENDACIONES

1. Se recomienda analizar minuciosamente el propósito principal de los dispositivos de ensayo que van a ser utilizados en aplicaciones distintas a las originales, así como las condiciones de trabajo en estas nuevas aplicaciones, ya que como se pudo observar en el presente proyecto, el desempeño de estos dispositivos (amortiguador hidráulico) varían en gran medida si sus aplicaciones no son las originales.

2. Se recomienda realizar el análisis de carga sísmica con diferentes tipos de estudios y modelos a fin de comparar los resultados y determinar cuales de ellos se adaptan a la realidad práctica del problema.
3. Es muy importante familiarizarse con el funcionamiento del equipo a ser utilizado para los ensayos, así como las normas que rigen el procedimiento para realizarlos, ya que pequeños errores pueden provocar resultados que se diferencien en gran medida de la realidad. Se recomienda utilizar un graficador de mayor sensibilidad para observar de mejor manera el comportamiento del dispositivo.
4. En el momento de utilizar software especializado para cualquier análisis de ingeniería, es de gran relevancia conocer los principios de análisis y cálculo de resultados del programa. Dichos programas nos brindan gran facilidad para la resolución de problemas pero se debe ser muy cuidadoso en el momento de ingresar las condiciones iniciales del problema ya que en caso de hacerlo de manera errónea los resultados distaran en gran medida de la solución.
5. Debido a que el amortiguador utilizado en el proyecto no mejora la respuesta de la estructura sometida a cargas sísmicas se recomienda modificar ciertas características del amortiguador original (viscosidad del fluido de trabajo y válvulas internas) como se pudo observar en el análisis de resultados, a fin de mejorar su desempeño ante cargas sísmicas. Este amortiguador puede ser analizado mediante el procedimiento de ensayo realizado en este proyecto.
6. En este tipo de proyectos de investigación se debe tomar en cuenta los aspectos financieros pero los mismos no deben ser determinantes en la ejecución del mismo. En el caso de la presente investigación, la misma ofrece un beneficio invaluable puesto que sienta las bases para futuras investigaciones que representan un gran progreso para nuestra sociedad.

REFERENCIAS

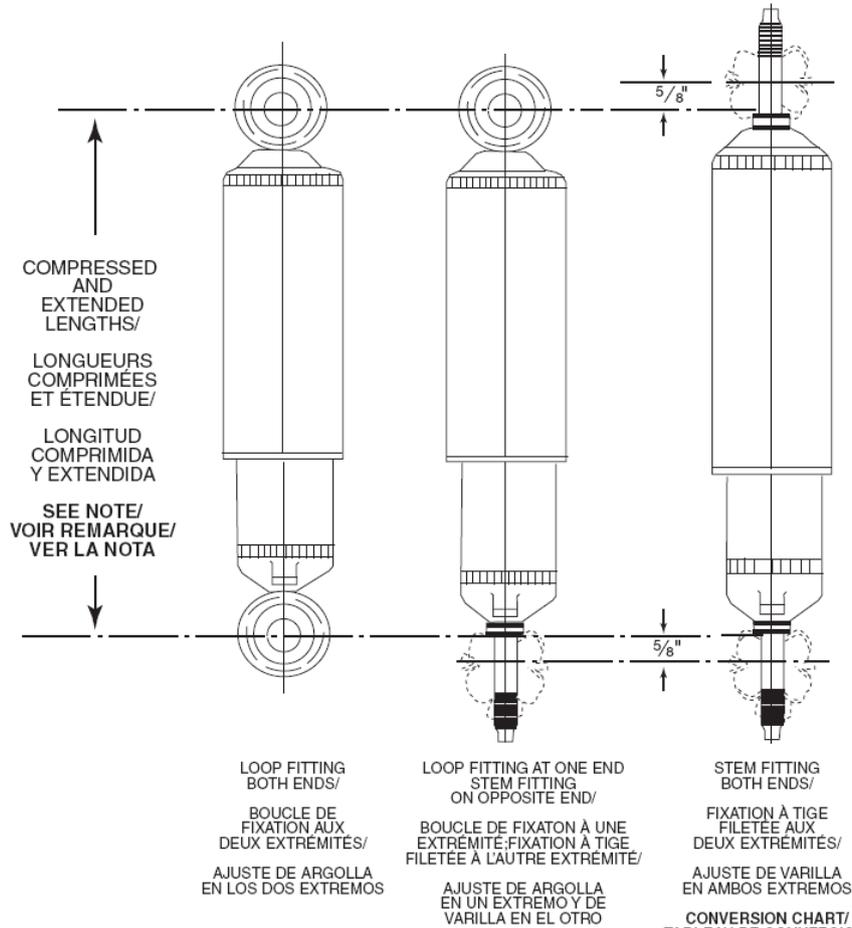
- URIBE G. Estructuras Antisísmicas. Mexico. Compañía Editorial Continental S. A. 1981. pp. 203 – 242, 273 – 298, 15 – 184.
- BEER F., JOHNSTON E. Mecánica Vectorial Para Ingenieros. México. McGraw Hill. 2004. pp. 1186 – 1240.
- CRAWLER S., DILLON R. Estructuras de Acero, Análisis y Diseño. México. Grupo Noriega Editores. 1992. pp. 383 - 429
- GALAMBOS T., LIN F., JOHNSTON B. Diseño de Estructuras de Acero con LRFD. México. Prentice Hall. 1999. pp. 214 – 249.
- JIMENEZ M. Análisis Experimental de un Disipador de Energía Viscoelástico. Tesis Ing. Civil. Sangolquí. Escuela Politécnica del Ejército. Facultad de Ingeniería Civil. 2007.134 p.
- BARAHONA M., MORENO C. Estudio del Comportamiento Mecánico del Puente Metálico Carrozable sobre el Río Monjas en el acceso a la Urbanización La Pampa. Tesis Ing. Mec. Sangolquí. Escuela Politécnica del Ejército. Facultad de Ingeniería Mecánica. 2003. pp. 55 – 113.
- GUTIERREZ G., REYES J. C. Metodología simplificada para el Análisis Dinámico no Lineal de edificios con amortiguadores viscosos. Colombia. Universidad de los Andes. 2004.
- OVIEDO J. A., DUQUE M. P. Sistemas de Control de Respuesta Sísmica en Edificaciones. Colombia. Escuela de Ingeniería de Antioquia. 2006.
- Standard ASCE / SEI 7 – 05. ASCE. 2005
- INEN. Peligro sísmico, Espectros de diseño y Requisitos mínimos de cálculo para diseño sismo-resistente. Ecuador. Código Ecuatoriano de la Construcción. 2002.
- Information about High Viscosity Silicone Fluids 200® Fluid. E.E.U.U. Dow Corning Corporation. 1997.

- Example 6 – 006 Link – SUNY Buffalo Damper with Linear Velocity Exponent. SAP 2000. s.f..
- CRISAFULLI F., VILLAFANE E. Espectros de Respuesta y Diseño. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. 2002.
- AIKEN I., Ph.D., P.E., Energy Dissipation Devices. E.E.U.U. SIE inc. 2006.
- ZEVALLOS J., BLONDET M., MUÑOZ A. Estado del Arte en Protección Sísmica. Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú. 2000.
- CASAROTTI CH. Bridge Isolation and Dissipation Devices. Italia. ROSE School, European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk. 2004.
- VALDENEBRO BUENO F. Reforzamiento y Protección Sísmica de Estructuras. Colombia. Universidad del Cauca. 2001
- CRAIG R. Mecánica de Materiales. México. Compañía Editorial Continental. 2002. pp. D – 3.
- SANCHEZ A. Curso de Mecánica de Fluidos. s.f.
- SERRANO N. Oleohidráulica. Madrid. McGraw – Hill. s.f. pp. 268 – 271.
- URBIETA J. Amortiguadores y Suspensión. España. TECNUM, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Navarra. s.f.
- TUMIPAMBA E. Análisis Financiero. Apuntes materia Preparación y Evaluación de Proyectos. Escuela Politécnica del Ejército. 2007
- Manual MTS – 810.
- Enciclopedia Microsoft Encarta 2006.
- www.taylordevices.com, Dispositivos de amortiguamiento sísmico.
- www.monroe.com, Amortiguadores telescópico hidráulicos para automóviles.
- www.vibrationdata.com, Datos de acelerograma sismo “El Centro”.

- www.gueandpartners.com.my, Ingeniería Sísmica.
- www.phoenix.sce.fct.unl.pt, Mecánica de fluidos, viscosidad.
- www.umss.edu.bo, Dinámica estructural.

ANEXO A
CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES Y DE
INSTALACIÓN DEL AMORTIGUADOR DE ENSAYO

SHOCK ABSORBER LENGTH DIMENSIONING LONGUEUR DES AMORTISSEURS LONGITUD DE LOS AMORTIGUADORES



Special Construction - Construction not the same as standard shock mounts listed.

NOTE: Compressed and extended lengths listed in the following pages of this book are taken from the center of loops and/or from the stem shoulders.

When measuring from the brackets on a vehicle, subtract $\frac{5}{8}$ " for each stem end. See illustrations above.

Fabrication spéciale - La fabrication des fixations est différente de celle des amortisseurs standard.

REMARQUE: Les longueurs en compression et en extension indiquées dans les pages suivantes sont mesurées entre les épaulements des tiges filetées et/ou le centre des boucles. Lors de la mesure à partir des ferrures, soustraire $\frac{5}{8}$ " pour chaque tige filetée. Voir les illustrations.

Fabricación especial - La fabricación es diferente a la de las series de los amortiguadores listadas.

NOTA: Las longitudes comprimida y extendida listadas en las páginas siguientes de este libro, son tomadas desde el centro de las argollas y/o desde los resaltes de la varilla.

Quando se mide desde los ajustes, en un vehículo quite $\frac{5}{8}$ " por cada extremo de varilla. Ver ilustración arriba.

CONVERSION CHART/ TABLEAU DE CONVERSION/ TABLA DE CONVERSION

Fraction/ Fractionnaire Fracción (Inches/pouces/pulgadas)	Decimal/ Décimale Decimal
$\frac{1}{8}$.12
$\frac{1}{4}$.25
$\frac{3}{8}$.37
$\frac{1}{2}$.50
$\frac{5}{8}$.62
$\frac{3}{4}$.75
$\frac{7}{8}$.87
1	1.00

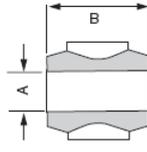
MOUNTING CODES

STEM



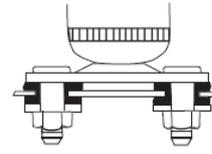
CODE	THREAD
S1	M10
S2	M12
S3	3/8 - 24
S4	3/8 - 16
S5	1/2 - 13
S6	5/8 - 11

LOOP MOUNTING



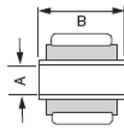
CODE	A	B
L1	5/8	1 5/16
L2	1 1/16	1 9/16
L3	3/4	1 9/16
L4	1	1 3/4
L5	1 1/4	2 9/16

STUD PLATE



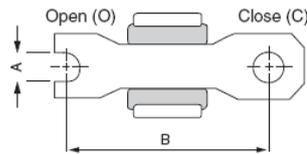
CODE SP

BUSHING & SLEEVE



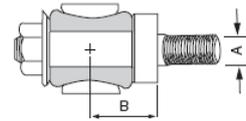
CODE	A	B	CODE	A	B	CODE	A	B	CODE	A	B
LS1	10MM	1 5/16	LS23	12MM	1 1/4	LS45	14MM	2 7/16	LS67	3/4	1 11/16
LS2	10MM	1	LS24	12MM	1 3/8	LS46	14MM	3 1/8	LS68	3/4	1 7/8
LS3	10MM	1 1/4	LS25	12MM	1 7/16	LS47	9/16	1 5/8	LS69	3/4	1 15/16
LS4	10MM	1 3/8	LS26	12MM	1 1/2	LS48	9/16	2 7/16	LS70	3/4	2 1/4
LS5	10MM	1 7/16	LS27	12MM	1 9/16	LS49	5/8/16MM	1 3/16	LS71	3/4	2 9/4
LS6	10MM	1 9/16	LS28	12MM	1 5/8	LS50	5/8/16MM	1 1/2	LS72	7/16	2
LS7	10MM	1 5/8	LS29	12MM	1 3/4	LS51	5/8/16MM	1 9/16	LS73	7/16	2 1/2
LS8	10MM	2	LS30	12MM	1 7/8	LS52	5/8/16MM	1 11/16	LS74	12MM	1 11/16
LS9	10MM	2 1/8	LS31	12MM	2	LS53	5/8/16MM	2	LS75	20MM	1 3/4
LS10	10MM	2 3/8	LS32	12MM	2 1/8	LS54	3/4	1 3/4	LS76	1/2	2 3/8
LS11	10MM	3	LS33	12MM	2 5/16	LS55	18MM	1 5/8	LS77	1/2	2 7/16
LS12	7/16	1 1/4	LS34	12MM	2 7/8	LS56	20MM	1 9/16	LS78	9/16	1 1/2
LS13	7/16	1 5/16	LS35	1/2	1 1/4	LS57	20MM	2	LS79	5/8/16MM	1 3/8
LS14	7/16	1 3/8	LS36	1/2	1 5/16	LS58	20MM	2 7/16	LS80	5/8/16MM	1 3/4
LS15	7/16	1 7/16	LS37	1/2	1 3/8	LS59	3/4	3 3/16	LS81	5/8/16MM	1 7/8
LS16	7/16	1 5/8	LS38	1/2	1 1/2	LS60	3/4	3 3/16	LS82	5/8/16MM	1 1/2
LS17	7/16	1 7/8	LS39	1/2	1 5/8	LS61	5/8/16MM	4	LS83	18MM	2
LS18	7/16	2 1/8	LS40	1/2	1 11/16	LS62	5/8/16MM	2 9/16	LS84	12MM	2 3/8
LS19	7/16	3 3/16	LS41	1/2	2 1/4	LS63	1/2	1 1/2	LS85	5/8/16MM	1 3/16
LS20	7/16	3 3/8	LS42	14MM	1 5/16	LS64	21MM	1 15/16	LS86	3/4	2 5/16
LS21	12MM	1	LS43	14MM	1 9/16	LS65	1	2			
LS22	12MM	1 1/8	LS44	14MM	1 7/8	LS66	3/4	1 3/8			

CROSS PIN MOUNTING



CODE	END	A	B	CODE	END	A	B
XP1	O	5/16	2 3/16	XP8	O	5/16	3
XP2	O	5/16	2 3/8	XP9	O	5/16	3 5/8
XP3	O	5/16	2 7/16	XP10	O	3/8	2 5/8
XP4	C	5/16	2 7/16	XP11	C	3/8	2 3/4
XP5	C	5/16	2 1/2	XP12	O	3/8	3 3/16
XP6	O	5/16	2 3/4	XP13	C	12MM	2 15/16
XP7	C	5/16	2 7/8				

CANTILEVER PIN MOUNTING

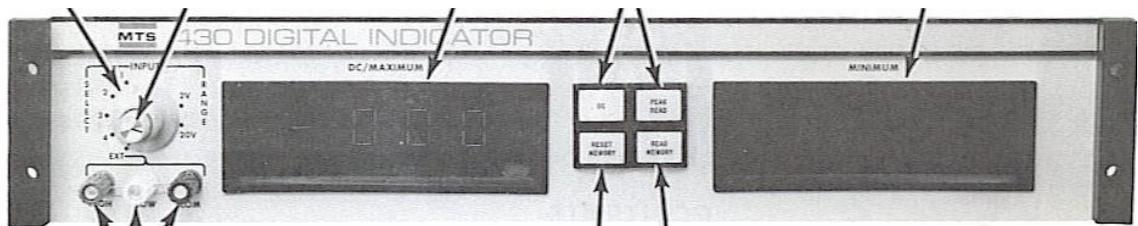


CODE	A	B
CP1	1/2	1 1/16
CP2	1/2	1 3/16
CP3	1/2	1 5/16
CP4	1/2	1 1/2
CP5	5/8	1 5/16

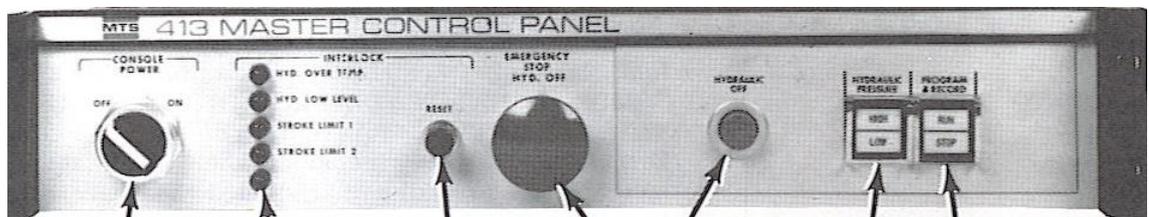
ANEXO B
PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO MECÁNICO Y
DINÁMICO

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DINÁMICO DE
AMORTIGUADOR TELESCÓPICO HIDRÁULICO

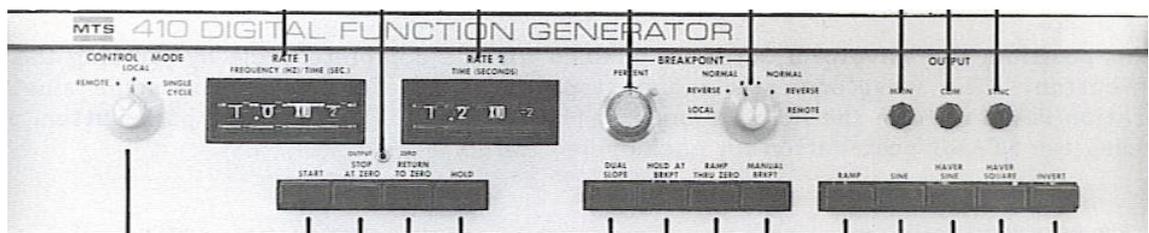
1. Encender la bomba del circuito hidráulico.
2. Encender el transformador para el control del equipo.
3. Encender el control del equipo accionando el interruptor **Console Power** en la parte de **413 Master Control Panel**.
4. Esperar que se estabilice el equipo por minutos
5. Encerar en las perillas de **Operation Controls** ubicados detrás de la parte de **442 Controller**. Los voltajes en el indicador digital deben ser cero para los tres tipos de control: carga, deformación y desplazamiento. Para esto giramos en las perillas de **430 Digital Indicator** en 1, 2 y 3 respectivamente.



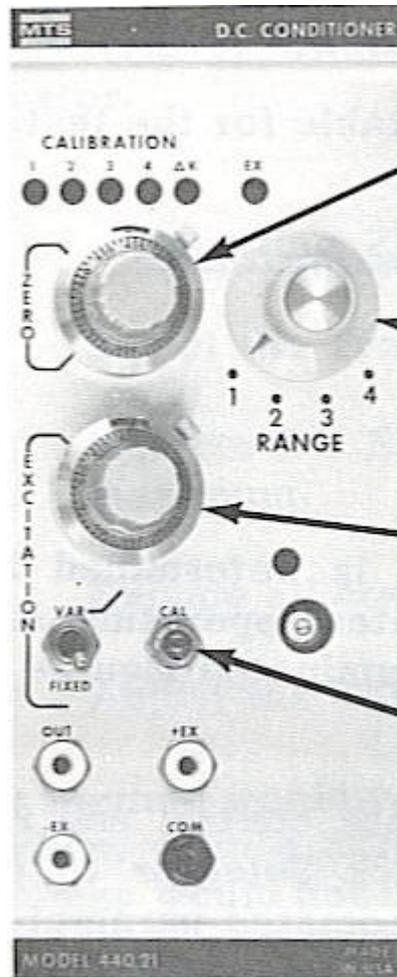
6. Una vez encendido se debe pulsar el botón **Interlock Reset** ubicado en la sección **Interlock** de **413 Master Control Panel**. Esto sirve para que el cilindro hidráulico de la respuesta que nosotros programamos en el control.



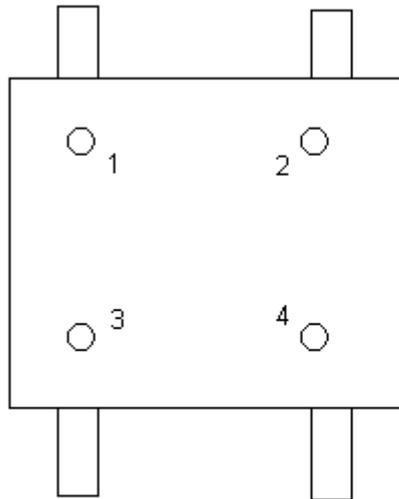
7. En esta misma parte encendemos el botón **Low** en la sección de **Hydraulic Pressure**. Esto nos permite manejar las instalaciones móviles para colocar las probetas o dispositivos de prueba.
8. Para poder manejar el movimiento del cilindro hidráulico tenemos que mover la perilla de **Control Mode**, ubicada en **410 Digital Function Generator**, hacia **Local**.



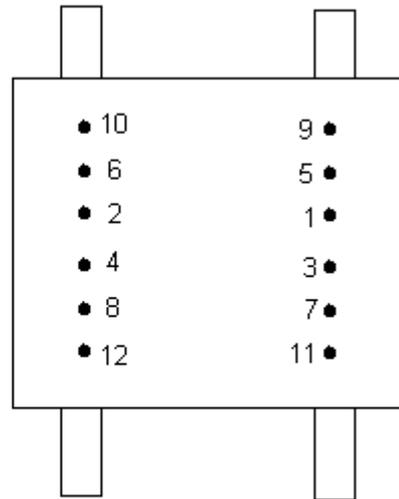
9. Utilizando la perilla en la sección **Excitation**, detrás de **442 Controller**, y la perilla **Range** en 3 (correspondiente a desplazamiento), controlamos el movimiento del cilindro hidráulico para poder colocar el amortiguador.



10. Si es que en la posición de equilibrio del amortiguador y del cilindro hidráulico nos faltase espacio para poder realizar un movimiento libre, necesitamos levantar el cabezal. Para esto aflojamos los pernos hexagonales (llave Allen 5/8") en el orden especificado en la figura a continuación, luego mediante la apertura de las válvulas hidráulicas en la parte de atrás de las instalaciones levantamos el cabezal hasta la posición deseada para realizar el ensayo.

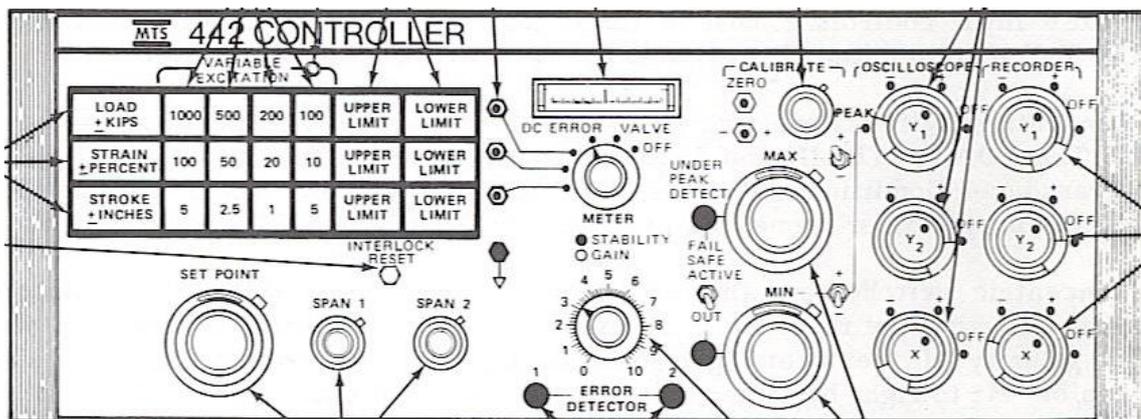


VISTA FRONTAL



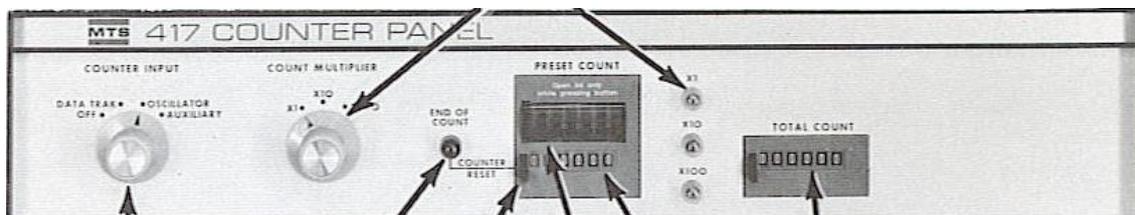
VISTA POSTERIOR

11. Una vez sujeto el amortiguador nos aseguramos de que no exista juego entre los extremos del amortiguador y las mordazas ya que esto nos genera errores en la sensibilidad de la graficación.
12. Accionamos el botón de control desplazamiento **Stroke ± inches** en **442 Controller** para realizar una prueba de control de desplazamiento, **Strain ± Percent** para control de deformación, **Load ± Kips** para control de carga. También se acciona el porcentaje del valor máximo de la máquina utilizado para los ensayos. En este caso seleccionamos **Stroke** (desplazamiento) y el **100%** del desplazamiento total.



13. Observamos en el indicador digital (con la perilla colocada en 3) los valores de voltaje que corresponden a los valores de desplazamiento del cilindro hidráulico para programarlos a continuación.
14. Colocamos en la perilla **Span 1** el valor máximo de voltaje al que va a llegar en la prueba de control de desplazamiento.

15. En el generador de funciones (**410 Digital Function Generator**) accionamos el botón **Sine** (o **Inverted Sine** si queremos comprimirlo en primer lugar), también colocamos la frecuencia en la que queremos que se realice el ensayo en Hz.
16. Cambiamos la perilla **Control Mode** de **Local** a **Remote** para que la máquina realice el ensayo según los parámetros programados.
17. Para realizar la gráfica colocamos en las perillas de la sección **Recorder (442 Controller)** los valores de los parámetros correspondientes en los ejes **X, Y1 ó Y2** (X para desplazamiento, Y1 para carga).
18. Colocamos el papel milimetrado en el graficador (**Recorder**), centrando el marcador en el punto de inicio, y teniendo en cuenta las escalas y equivalencias para los diferentes ejes.
19. En el panel de control (**413 Master Control Panel**) accionamos el botón **High** en **Hydraulic Pressure** (para encender la presión alta). Luego accionamos el botón **Run** en **Program & Record** para iniciar el ensayo.
20. Durante el ensayo se debe observar en la sección **Interlock** que los indicadores estén apagados y no indiquen ninguna anomalía. En caso de existir dicha anomalía se debe detener el ensayo accionando el botón **Stop** o en caso de emergencia accionar el botón **Emergency Stop** el cual apaga la bomba del circuito hidráulico
21. En **417 Counter Panel** observamos el número de ciclos que realiza la máquina para el ensayo. Esto nos permite controlar el ensayo deseado.



22. Para terminar el ensayo accionamos el botón **Stop** en el panel de control, también accionamos el botón **Low** para bajar la presión hidráulica mientras se programa el siguiente ensayo.
23. Se obtienen los valores máximos del indicador digital y de las gráficas.

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO MECÁNICO DE AMORTIGUADOR TELESCÓPICO HIDRÁULICO

Es un procedimiento similar al ensayo dinámico, pero cambia en ciertos pasos:

1. En el paso 12 seleccionamos **Load** (carga) y el **10%** de la carga total (50000 N).
2. En los pasos 13 y 14, antes de colocar los valores de voltaje en **Span 1 (442 Controller)** correspondientes a los valores máximos de carga, debemos observar los desplazamientos realizados por el pistón (con el amortiguador en las mordazas) para poder realizar comparaciones

y programar correctamente. Se pueden utilizar desplazamientos similares a los del ensayo dinámico.

3. En el paso 15, al seleccionar la frecuencia, se debe ser muy cauteloso, ya que se debe programar hasta una frecuencia máxima que permita apreciar de mejor manera el comportamiento mecánico del amortiguador.

Fuente figuras: Manual MTS 810

ANEXO C

HOJAS DE DATOS OBTENIDAS EN LOS ENSAYOS

ANEXO D
GRÁFICAS OBTENIDAS EN LOS ENSAYOS

ANEXO E
PLANOS ESTRUCTURALES DEL PÓRTICO

ANEXO F
ASPECTOS IMPORTANTES DEL CÓDIGO
ECUATORIANO DE LA CONSTRUCCIÓN (CEC)

Tabla 1. Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada

Zona sísmica	I	II	III	IV
Valor factor Z	0.15	0.25	0.30	0.4

Figura 1. Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño

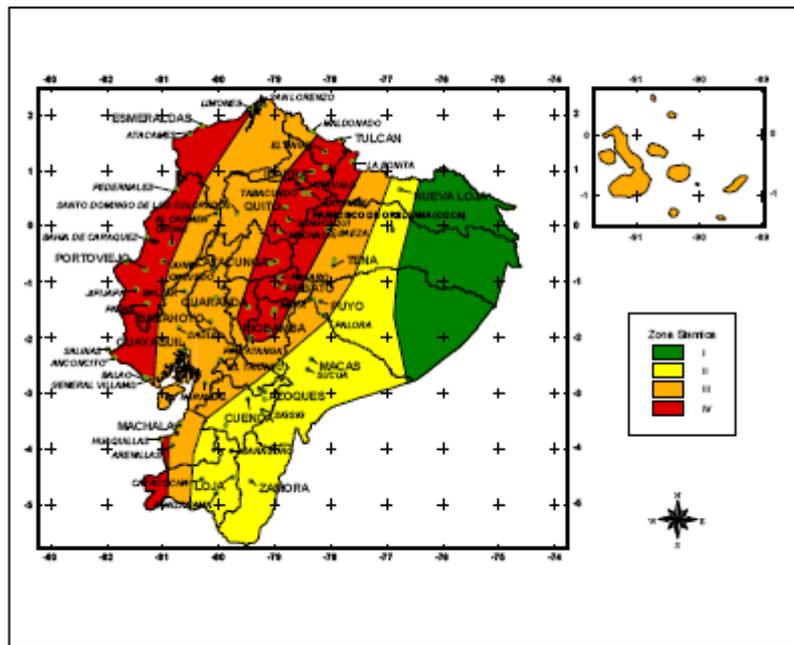


Tabla 2. Poblaciones ecuatorianas y valor del factor Z

PEDRO VICENTE MALDONADO	PICHINCHA	PEDRO VICENTE MALDONADO	PEDRO VICENTE MALDONADO	3
PUERTO QUITO	PICHINCHA	PUERTO QUITO	PUERTO QUITO	3
SAN MIGUEL DE LOS BANCOS	PICHINCHA	SAN MIGUEL DE LOS BANCOS	SAN MIGUEL DE LOS BANCOS	3
STO DOMINGO DE COLORADOS	PICHINCHA	SANTO DOMINGO	ZARACAY	3
CAYAMBE	PICHINCHA	CAYAMBE	CAYAMBE	4
MACHACHI	PICHINCHA	MEJA	MACHACHI	4
QUITO	PICHINCHA	QUITO	QUITO	4
SANGOLQUI	PICHINCHA	RUMINAHUI	RUMIPAMBA	4
TABACUNDO	PICHINCHA	PEDRO MONCAYO	TABACUNDO	4

Fuente: INEN. Peligro sísmico, Espectros de diseño y Requisitos mínimos de cálculo para diseño sismo-resistente. Ecuador. Código Ecuatoriano de la Construcción. 2002.

ANEXO G

TABLAS DE DATOS DE RESPUESTA DE LAS UNIONES

RESPUESTAS DE LAS UNIONES

DESPLAZAMIENTOS

Pórtico sin amortiguador

Unión	Tipo de Análisis	Respuesta	U1	U3	R2
			cm	cm	rad
2	Carga Muerta		0,000135	-0,00052	0,000107
2	Modal	Modo 1	0,860974	0,001599	0,002405
2		Modo 2	-4,181E-11	0,860975	-2,767E-13
2		Modo 3	-0,001599	0,860974	0,001243
2		Modo 4	0,860975	1,446E-10	0,003375
2	Espectral CEC 2000	Máx	0,262791	0,000488	0,000734
2	Espectral UBC94	Máx	0,069394	0,000129	0,000194
2	Por historia del tiempo lineal	Máx	0,03735	0,000069	0,000104
2		Mín	-0,043457	-0,00008	-0,000121
2	Por historia del tiempo no lineal	Máx	0,03735	0,000069	0,000104
2		Mín	-0,043457	-0,00008	-0,000121
4	Carga Muerta		-0,000135	-0,00052	-0,000107
4	Modal	Modo 1	0,860974	-0,001599	0,002405
4		Modo 2	4,209E-11	0,860975	5,221E-14
4		Modo 3	-0,001599	-0,860974	0,001243
4		Modo 4	-0,860975	-6,067E-11	-0,003375
4	Espectral CEC 2000	Máx	0,262791	0,000488	0,000734
4	Espectral UBC94	Máx	0,069394	0,000129	0,000194
4	Por historia del tiempo lineal	Máx	0,03735	0,00008	0,000104
4		Mín	-0,043457	-0,000069	-0,000121
4	Por historia del tiempo no lineal	Máx	0,03735	0,00008	0,000104
4		Mín	-0,043457	-0,000069	-0,000121

Pórtico con amortiguador (datos preliminares)

Unión	Tipo de Análisis	Respuesta	U1	U3	R2
			cm	cm	rad
2	Carga Muerta		0,000135	-0,00052	0,000107
2	Modal	Modo 1	0,858679	0,001594	0,002399
2		Modo 2	-0,000378	-0,071897	0,000823
2		Modo 3	-0,863257	-0,00373	-0,003381
2		Modo 4	0,003798	-1,215472	-0,000919
2	Espectral CEC 2000	Máx	0,045585	0,000085	0,000127
2	Espectral UBC94	Máx	0,066916	0,000124	0,000187
2	Por historia del tiempo lineal	Máx	0,037394	0,000069	0,000104
2		Mín	-0,044721	-0,000083	-0,000125

2	Por historia del tiempo no lineal	Máx	0,037268	0,000069	0,000104	
2		Mín	-0,044201	-0,000082	-0,000123	
4	Carga Muerta			-0,000135	-0,00052	-0,000107
4	Modal	Modo 1	0,858724	-0,001595	0,002399	
4		Modo 2	-0,001739	-1,209086	0,000818	
4		Modo 3	0,854163	-0,000741	0,003351	
4		Modo 4	-0,001392	0,07152	-0,000939	
4	Espectral CEC 2000		Máx	0,045587	0,000085	0,000127
4	Espectral UBC94		Máx	0,066919	0,000124	0,000187
4	Por historia del tiempo lineal	Máx	0,037396	0,000083	0,000104	
4		Mín	-0,044724	-0,000069	-0,000125	
4	Por historia del tiempo no lineal	Máx	0,03727	0,000082	0,000104	
4		Mín	-0,044203	-0,000069	-0,000123	

Pórtico con amortiguador (datos laboratorio)

Unión	Tipo de Análisis	Respuesta	U1	U3	R2	
			cm	cm	rad	
2	Carga Muerta		0,000135	-0,00052	0,000107	
2	Modal	Modo 1	-0,860652	-0,001598	-0,002405	
2		Modo 2	0,000544	0,418418	-0,000523	
2		Modo 3	-0,000886	1,143451	0,001129	
2		Modo 4	0,861298	-0,000684	0,003374	
2	Espectral CEC 2000		Máx	0,023678	0,000044	0,000066
2	Espectral UBC94		Máx	0,034727	0,000064	0,000097
2	Por historia del tiempo lineal	Máx	0,031628	0,000058	0,000088	
2		Mín	-0,032882	-0,000061	-0,000092	
2	Por historia del tiempo no lineal	Máx	0,031574	0,000058	0,000088	
2		Mín	-0,032703	-0,000061	-0,000091	
4	Carga Muerta			-0,000135	-0,00052	-0,000107
4	Modal	Modo 1	-0,860658	0,001598	-0,002405	
4		Modo 2	0,000803	1,142605	-0,000522	
4		Modo 3	-0,002011	-0,418106	0,001125	
4		Modo 4	-0,860015	0,000445	-0,003372	
4	Espectral CEC 2000		Máx	0,023679	0,000044	0,000066
4	Espectral UBC94		Máx	0,034728	0,000064	0,000097
4	Por historia del tiempo lineal	Máx	0,031629	0,000061	0,000088	
4		Mín	-0,032882	-0,000058	-0,000092	
4	Por historia del tiempo no lineal	Máx	0,031599	0,000114	0,000088	
4		Mín	-0,0327	-0,000069	-0,000091	

VELOCIDADES

Pórtico sin amortiguador

Unión	Tipo de Análisis	Respuesta	U1	U3	R2
			cm/s	cm/s	rad/s
2	Modal	Modo 1	83,17	0,15	0,232
2		Modo 2	-5,743E-08	1182,7	-3,8E-10

2		Modo 3	-2,2	1183,44	1,708
2		Modo 4	1184,77	1,989E-07	4,644
2	Espectral CEC 2000	Máx	25,39	0,04726	0,071
2	Espectral UBC94	Máx	6,7	0,01246	0,019
2	Por historia del tiempo lineal	Máx	2,42	0,004498	0,006769
2		Mín	-2,49	-0,004605	-0,00696
2	Por historia del tiempo no lineal	Máx	2,42	0,004498	0,006769
2		Mín	-2,49	-0,004605	-0,00696
4	Modal	Modo 1	83,17	-0,15	0,232
4		Modo 2	5,782E-08	1182,7	7,171E-11
4		Modo 3	-2,2	-1183,44	1,708
4		Modo 4	-1184,77	-8,349E-08	-4,644
4	Espectral CEC 2000	Máx	25,39	0,04726	0,071
4	Espectral UBC94	Máx	6,7	0,01246	0,019
4	Por historia del tiempo lineal	Máx	2,42	0,004605	0,006769
4		Mín	-2,49	-0,004498	-0,00696
4	Por historia del tiempo no lineal	Máx	2,42	0,004605	0,006769
4		Mín	-2,49	-0,004498	-0,00696

Pórtico con amortiguador (datos preliminares)

Unión	Tipo de Análisis	Respuesta	U1	U3	R2
			cm/s	cm/s	rad/s
2	Modal	Modo 1	82,73	0,15	0,231
2		Modo 2	-0,52	-98,27	1,125
2		Modo 3	-1184,79	-5,12	-4,64
2		Modo 4	5,22	-1670,21	-1,262
2	Espectral CEC 2000	Máx	4,39	0,008177	0,012
2	Espectral UBC94	Máx	6,45	0,01198	0,018
2	Por historia del tiempo lineal	Máx	2,31	0,004268	0,006441
2		Mín	-2,52	-0,004656	-0,007037
2	Por historia del tiempo no lineal	Máx	2,35	0,004369	0,006574
2		Mín	-2,49	-0,004601	-0,006954
4	Modal	Modo 1	82,74	-0,15	0,231
4		Modo 2	-2,38	-1652,64	1,118
4		Modo 3	1172,31	-1,02	4,599
4		Modo 4	-1,91	98,28	-1,29
4	Espectral CEC 2000	Máx	4,39	0,008178	0,012
4	Espectral UBC94	Máx	6,45	0,01199	0,018
4	Por historia del tiempo lineal	Máx	2,31	0,004657	0,006441
4		Mín	-2,52	-0,004269	-0,007038
4	Por historia del tiempo no lineal	Máx	2,35	0,004658	0,006573
4		Mín	-2,49	-0,004447	-0,006954

Pórtico con amortiguador (datos laboratorio)

Unión	Tipo de Análisis	Respuesta	U1	U3	R2
			cm/s	cm/s	rad/s
2	Modal	Modo 1	-83,11	-0,15	-0,232
2		Modo 2	0,75	574,46	-0,718

2		Modo 3	-1,22	1571,4	1,552
2		Modo 4	1184,78	-0,94	4,642
2	Espectral CEC 2000	Máx	2,29	0,004288	0,006388
2	Espectral UBC94	Máx	3,35	0,006252	0,009369
2	Por historia del tiempo lineal	Máx	0,87	0,001607	0,002427
2		Mín	-1,84	-0,003406	-0,005146
2	Por historia del tiempo no lineal	Máx	0,86	0,001598	0,002413
2		Mín	-1,83	-0,003389	-0,00512
4	Modal	Modo 1	-83,11	0,15	-0,232
4		Modo 2	1,1	1568,71	-0,717
4		Modo 3	-2,76	-574,59	1,546
4		Modo 4	-1183,01	0,61	-4,639
4	Espectral CEC 2000	Máx	2,29	0,004281	0,006389
4	Espectral UBC94	Máx	3,35	0,006248	0,00937
4	Por historia del tiempo lineal	Máx	0,87	0,003406	0,002427
4		Mín	-1,84	-0,001607	-0,005146
4	Por historia del tiempo no lineal	Máx	0,86	0,006189	0,002415
4		Mín	-1,83	-0,004439	-0,005122

ACELERACIONES

Pórtico sin amortiguador

Unión	Tipo de Análisis	Respuesta	U1	U3	R2
			cm/s2	cm/s2	rad/s2
2	Modal	Modo 1	-8035,035	-14,92	-22,449
2		Modo 2	0,00007889	-1624639,45	5,221E-07
2		Modo 3	3020,514	-1626671,68	-2348,064
2		Modo 4	-1630339,13	-0,0002738	-6390,085
2	Espectral CEC 2000	Máx	2452,492	6,44	6,852
2	Espectral UBC94	Máx	647,615	1,424	1,809
2	Por historia del tiempo lineal	Máx	245,549	0,454	0,686
2		Mín	-228,72	-0,417	-0,639
2	Por historia del tiempo no lineal	Máx	245,549	0,454	0,686
2		Mín	-228,72	-0,417	-0,639
4	Modal	Modo 1	-8035,035	14,92	-22,449
4		Modo 2	-0,00007943	-1624639,45	-9,851E-08
4		Modo 3	3020,514	1626671,68	-2348,064
4		Modo 4	1630339,13	0,0001149	6390,085
4	Espectral CEC 2000	Máx	2452,492	6,44	6,852
4	Espectral UBC94	Máx	647,615	1,424	1,809
4	Por historia del tiempo lineal	Máx	245,549	0,417	0,686
4		Mín	-228,72	-0,454	-0,639
4	Por historia del tiempo no lineal	Máx	245,549	0,417	0,686
4		Mín	-228,72	-0,454	-0,639

Pórtico con amortiguador (datos preliminares)

Unión	Tipo de Análisis	Respuesta	U1	U3	R2
			cm/s ²	cm/s ²	rad/s ²
2	Modal	Modo 1	-7971,365	-14,802	-22,271
2		Modo 2	706,88	134324,468	-1538,365
2		Modo 3	1626087,63	7026,73	6367,835
2		Modo 4	-7171,822	2295086,4	1734,671
2	Espectral CEC 2000	Máx	423,177	1,136	1,182
2	Espectral UBC94	Máx	621,2	1,383	1,736
2	Por historia del tiempo lineal	Máx	236,162	0,436	0,66
2		Mín	-233,445	-0,425	-0,652
2	Por historia del tiempo no lineal	Máx	239,133	0,442	0,668
2		Mín	-230,386	-0,42	-0,644
4	Modal	Modo 1	-7971,781	14,803	-22,272
4		Modo 2	3248,282	2258914,03	-1528,404
4		Modo 3	-1608957,73	1396,687	-6311,867
4		Modo 4	2628,714	-135045,484	1773,084
4	Espectral CEC 2000	Máx	423,199	1,134	1,182
4	Espectral UBC94	Máx	621,233	1,381	1,736
4	Por historia del tiempo lineal	Máx	236,174	0,424	0,66
4		Mín	-233,457	-0,436	-0,652
4	Por historia del tiempo no lineal	Máx	239,217	0,43	0,668
4		Mín	-230,504	-0,425	-0,644

Pórtico con amortiguador (datos laboratorio)

Unión	Tipo de Análisis	Respuesta	U1	U3	R2
			cm/s ²	cm/s ²	rad/s ²
2	Modal	Modo 1	8026,079	14,903	22,424
2		Modo 2	-1025,211	-788688,236	986,156
2		Modo 3	1674,036	-2159509,96	-2132,677
2		Modo 4	-1629743,25	1294,967	-6384,831
2	Espectral CEC 2000	Máx	220,815	0,92	0,617
2	Espectral UBC94	Máx	323,854	0,973	0,905
2	Por historia del tiempo lineal	Máx	90,3	0,161	0,252
2		Mín	-79,408	-0,138	-0,222
2	Por historia del tiempo no lineal	Máx	88,804	0,16	0,248
2		Mín	-78,575	-0,138	-0,219
4	Modal	Modo 1	8026,138	-14,903	22,424
4		Modo 2	-1513,198	-2153731,38	984,243
4		Modo 3	3798,652	789630,189	-2124,35
4		Modo 4	1627314,73	-842,215	6381,149
4	Espectral CEC 2000	Máx	220,817	0,859	0,617
4	Espectral UBC94	Máx	323,856	0,923	0,905
4	Por historia del tiempo lineal	Máx	90,301	0,14	0,252
4		Mín	-79,408	-0,161	-0,222
4	Por historia del tiempo no lineal	Máx	89,249	0,22	0,249
4		Mín	-78,988	-0,195	-0,221

REACCIONES

Pórtico sin amortiguador

Unión	Tipo de Análisis	Respuesta	U1	U3	R2
			N	N	N-cm
1	Carga Muerta		172,24	881,96	16704,31
1	Modal	Modo 1	-5419,71	-2034,82	-1018487,62
1		Modo 2	3,319E-09	-1095836,11	0,00002414
1		Modo 3	2037,37	-1095834,22	199415,74
1		Modo 4	-3844,5	-0,000184	-865011,66
1	Espectral CEC 2000	Máx	1654,23	621,08	310867,64
1	Espectral UBC94	Máx	436,82	164	82088,99
1	Por historia del tiempo lineal	Máx	329,97	102,43	51407,28
1		Mín	-301,15	-87,91	-44183,06
1	Por historia del tiempo no lineal	Máx	329,97	102,43	51407,28
1		Mín	-301,15	-87,91	-44183,06
3	Carga Muerta		-172,24	881,96	-16704,31
3	Modal	Modo 1	-5419,71	2034,82	-1018487,62
3		Modo 2	-3,713E-07	-1095836,11	-0,00006015
3		Modo 3	2037,37	1095834,22	199415,74
3		Modo 4	3844,5	0,00007722	865011,66
3	Espectral CEC 2000	Máx	1654,23	621,08	310867,64
3	Espectral UBC94	Máx	436,82	164	82088,99
3	Por historia del tiempo lineal	Máx	329,97	87,91	51407,28
3		Mín	-301,15	-102,43	-44183,06
3	Por historia del tiempo no lineal	Máx	329,97	87,91	51407,28
3		Mín	-301,15	-102,43	-44183,06

Pórtico con amortiguador (datos preliminares)

Unión	Tipo de Análisis	Respuesta	U1	U3	R2
			N	N	N-cm
1	Carga Muerta		172,24	881,96	16704,31
1	Modal	Modo 1	-5405,31	-2029,39	-1015776,57
1		Modo 2	1342,47	91509,76	131015,65
1		Modo 3	3859,51	4747,93	867774,07
1		Modo 4	-1534,38	1547033,57	-151661,16
1	Espectral CEC 2000	Máx	286,95	107,74	53924,71
1	Espectral UBC94	Máx	421,23	158,15	79158,45
1	Por historia del tiempo lineal	Máx	335,03	105,41	52903,18
1		Mín	-303,53	-88,01	-44235,92
1	Por historia del tiempo no lineal	Máx	335,37	104,04	52287,64
1		Mín	-303,18	-87,93	-44086,8
3	Carga Muerta		-172,24	881,96	-16704,31
3	Modal	Modo 1	-5405,51	2029,5	-1015821,62
3		Modo 2	1348,55	1538905,6	132382,31
3		Modo 3	-3809,26	943,74	-857698,26
3		Modo 4	-1511,2	-91029,21	-146446,49
3	Espectral CEC 2000	Máx	286,96	107,74	53927,1
3	Espectral UBC94	Máx	421,25	158,16	79161,96

3	Por historia del tiempo lineal	Máx	333	88,01	52905,52
3		Mín	-301,44	-105,41	-44237,88
3	Por historia del tiempo no lineal	Máx	330,34	87,95	52290,19
3		Mín	-300,65	-104,04	-44088,38

Pórtico con amortiguador (datos laboratorio)

Unión	Tipo de Análisis	Respuesta	U1	U3	R2
			N	N	N-cm
1	Carga Muerta		172,24	881,96	16704,31
1	Modal	Modo 1	5417,69	2034,06	1018107,16
1		Modo 2	-856,27	-532555,66	-83738,01
1		Modo 3	1845,08	-1455367,01	180274,95
1		Modo 4	-3848,44	871,06	-865580,23
1	Espectral CEC 2000	Máx	149,05	55,96	28010,35
1	Espectral UBC94	Máx	218,6	82,08	41080,79
1	Por historia del tiempo lineal	Máx	256,57	77,43	38897,48
1		Mín	-265,96	-74,44	-37414,92
1	Por historia del tiempo no lineal	Máx	374,1	145,13	38685,72
1		Mín	-296,34	-88,13	-37354,65
3	Carga Muerta		-172,24	881,96	-16704,31
3	Modal	Modo 1	5417,72	-2034,07	1018113,51
3		Modo 2	-857,43	-1454290,54	-83998,11
3		Modo 3	1850,1	532158,57	181405,2
3		Modo 4	3837,7	-566,52	863802,32
3	Espectral CEC 2000	Máx	149,05	55,96	28010,53
3	Espectral UBC94	Máx	218,61	82,08	41081,04
3	Por historia del tiempo lineal	Máx	256,35	74,44	38897,72
3		Mín	-265,65	-77,43	-37415,15
3	Por historia del tiempo no lineal	Máx	255,2	88,13	38682,16
3		Mín	-265,58	-145,17	-37379,72

ANEXO H

TABLAS DE DATOS DE DEFORMACIONES DE LOS AMORTIGUADORES

DEFORMACIONES DE LOS AMORTIGUADORES

Amortiguador de ensayo

Tipo de Análisis	Respuesta	U1	U2	R3
		cm	cm	rad
Carga Muerta		-0,000353	-0,000404	0,000107
Modal	Modo 1	0,767353	-0,385459	-0,002399
	Modo 2	-0,542275	-1,080662	-0,000818
	Modo 3	0,763655	-0,382657	-0,003351
	Modo 4	0,030739	0,064592	0,000939
Espectral CEC 2000	Máx	0,040737	0,020463	0,000127
Espectral UBC94	Máx	0,059799	0,030038	0,000187
Por historia del tiempo lineal	Máx	0,033417	0,020075	0,000125

	Mín	-0,039965	-0,016786	-0,000104
Por historia del tiempo no lineal	Máx	0,033304	0,019841	0,000123
	Mín	-0,0395	-0,016729	-0,000104

Amortiguador SUNY Buffalo

Tipo de Análisis	Respuesta	U1	U2	R3
		cm	cm	rad
Carga Muerta		-0,000353	-0,000404	0,000107
Modal	Modo 1	-0,769081	0,386327	0,002405
	Modo 2	0,511707	1,021618	0,000522
	Modo 3	-0,188782	-0,373066	-0,001125
	Modo 4	-0,769021	0,385008	0,003372
Espectral CEC 2000	Máx	0,021159	0,010629	0,000066
Espectral UBC94	Máx	0,031033	0,015588	0,000097
Por historia del tiempo lineal	Máx	0,028263	0,01476	0,000092
	Mín	-0,029383	-0,014197	-0,000088
Por historia del tiempo no lineal	Máx	0,028243	0,01468	0,000091
	Mín	-0,02922	-0,014173	-0,000088

ANEXO I
DIAGRAMAS DE FUERZA AXIAL, CORTANTE Y
MOMENTO FLECTOR DE LOS ELEMENTOS DEL
PÓRTICO

I.1 Pórtico sin amortiguador

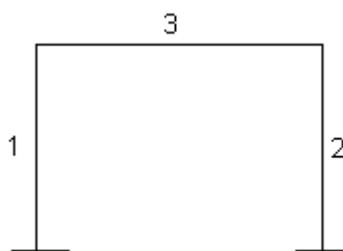


Figura I.1 Posición de los elementos

I.1.1 Elemento 1 y elemento 2



Figura I.2 Carga espectral CEC 2000 – Fuerza axial elemento 1



Figura I.3 Carga espectral CEC 2000 - Fuerza cortante y momento flector elemento 1



Figura I.4 Carga espectral UBC 94 – Fuerza axial elemento 1



Figura I.5 Carga espectral UBC 94 – Fuerza cortante y momento flector elemento 1

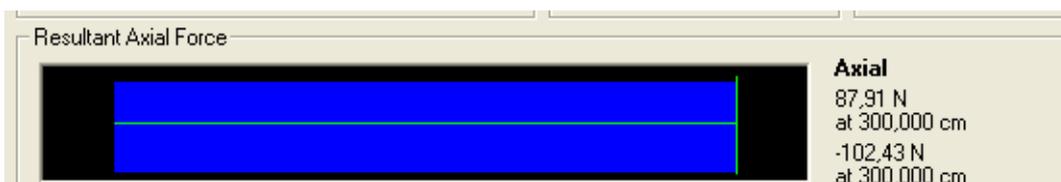


Figura I.6 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza axial elemento 1

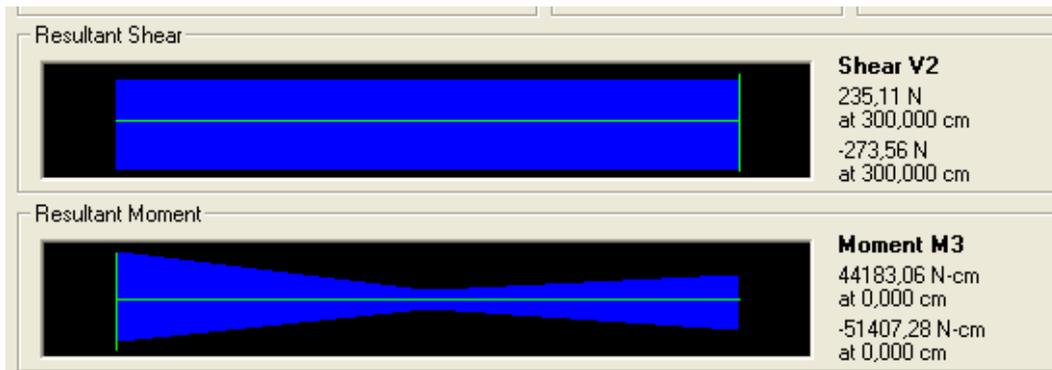


Figura I.7 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 1

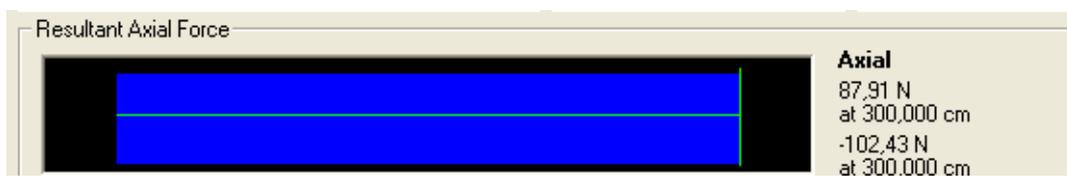


Figura I.8 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza axial elemento 1

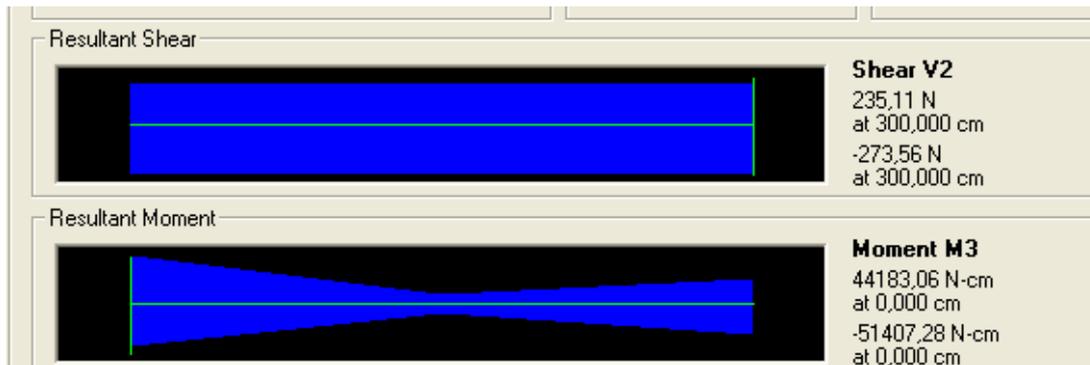


Figura I.9 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 1

I.1.2 Elemento 3

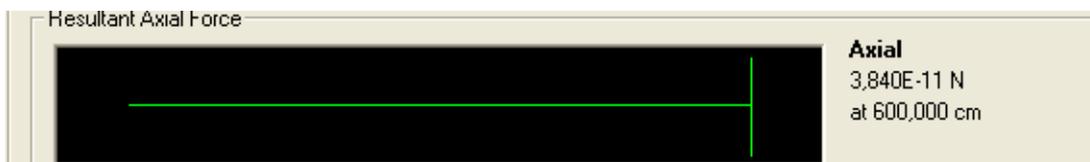


Figura I.10 Carga espectral CEC 2000 – Fuerza axial elemento 3



Figura I.11 Carga espectral CEC 2000 - Fuerza cortante y momento flector elemento 3

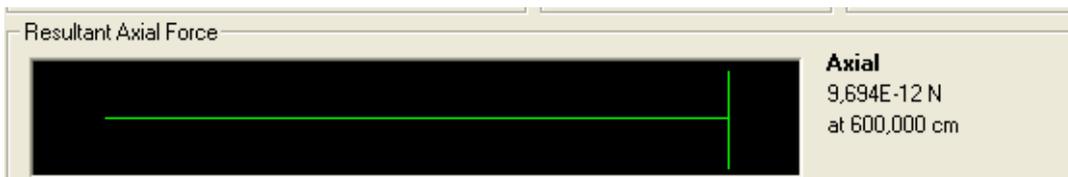


Figura I.12 Carga espectral UBC 94 – Fuerza axial elemento 3



Figura I.13 Carga espectral UBC 94 – Fuerza cortante y momento flector elemento 3

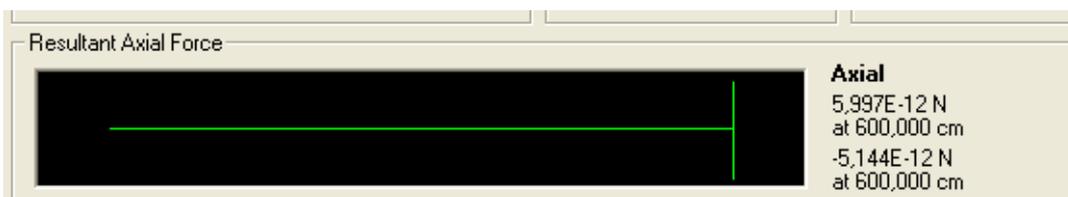


Figura I.14 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza axial elemento 3



Figura I.15 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 3

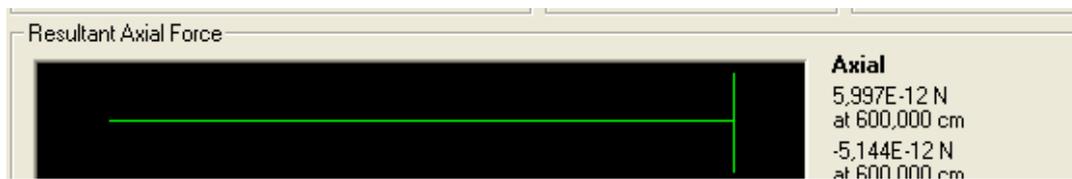


Figura I.16 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza axial elemento 3

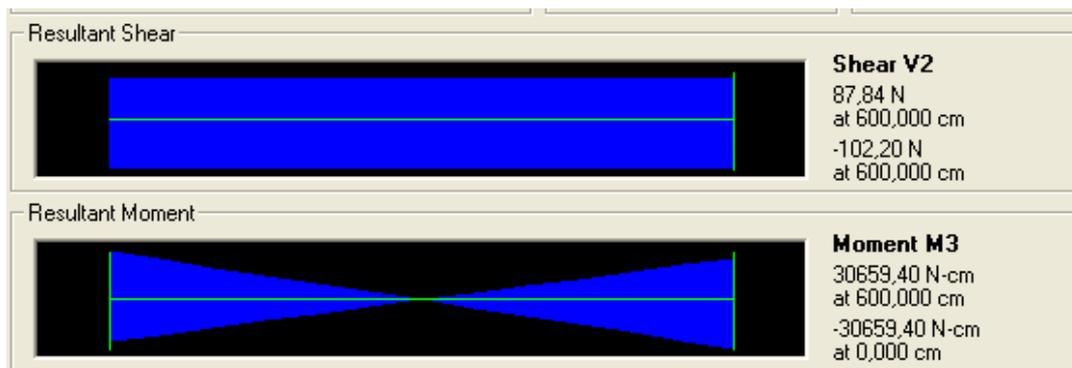


Figura I.17 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 3

I.2 Pórtico con amortiguador

I.2.1 Elemento 1



Figura I.18 Carga espectral CEC 2000 – Fuerza axial elemento 1



Figura I.19 Carga espectral CEC 2000 - Fuerza cortante y momento flector elemento 1



Figura I.20 Carga espectral UBC 94 – Fuerza axial elemento 1



Figura I.21 Carga espectral UBC 94 – Fuerza cortante y momento flector elemento 1

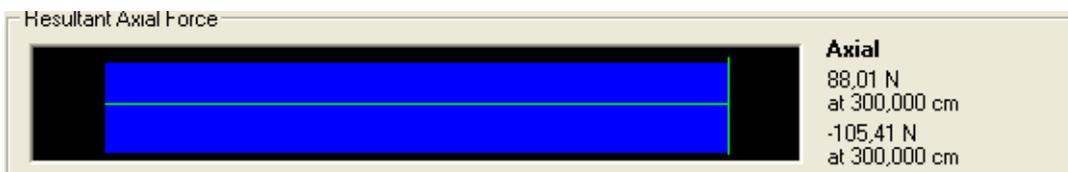


Figura I.22 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza axial elemento 1

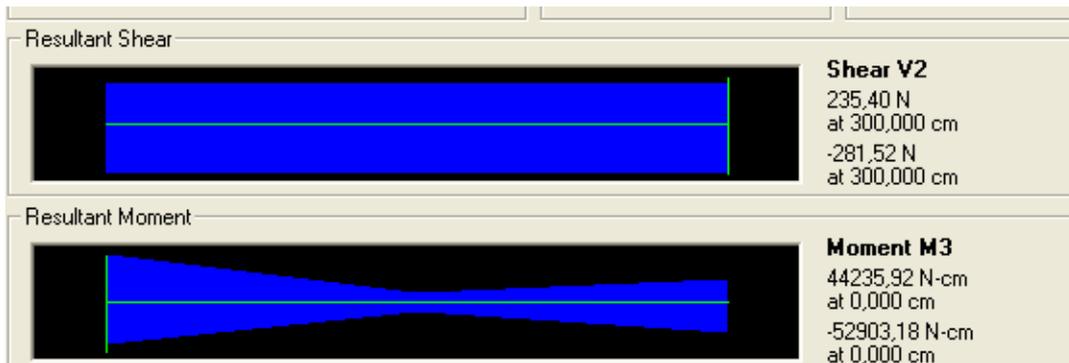


Figura I.23 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 1

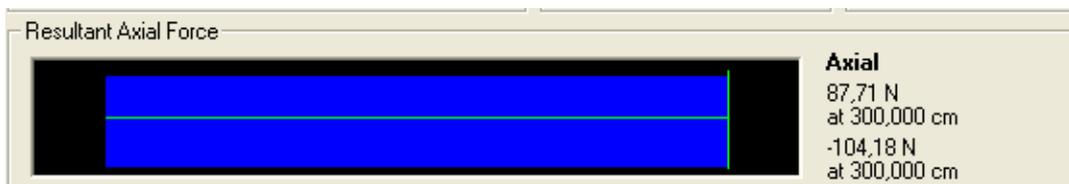


Figura I.24 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza axial elemento 1

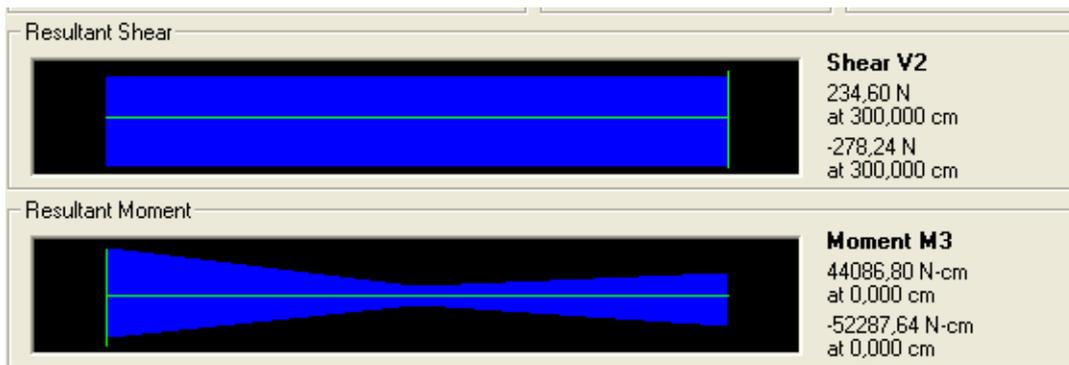


Figura I.25 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 1

I.2.2 Elemento 2



Figura I.26 Carga espectral CEC 2000 – Fuerza axial elemento 2



Figura I.27 Carga espectral CEC 2000 - Fuerza cortante y momento flector elemento 2



Figura I.28 Carga espectral UBC 94 – Fuerza axial elemento 2



Figura I.29 Carga espectral UBC 94 – Fuerza cortante y momento flector elemento 2

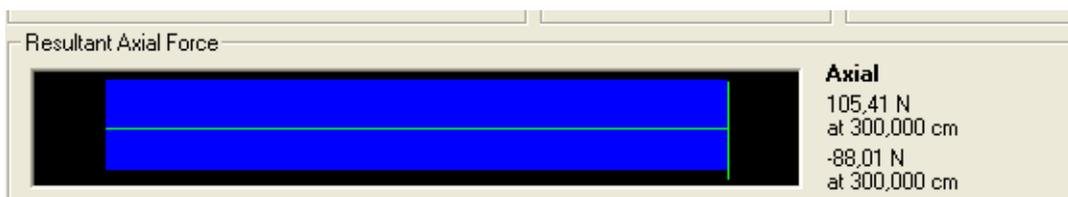


Figura I.30 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza axial elemento 2

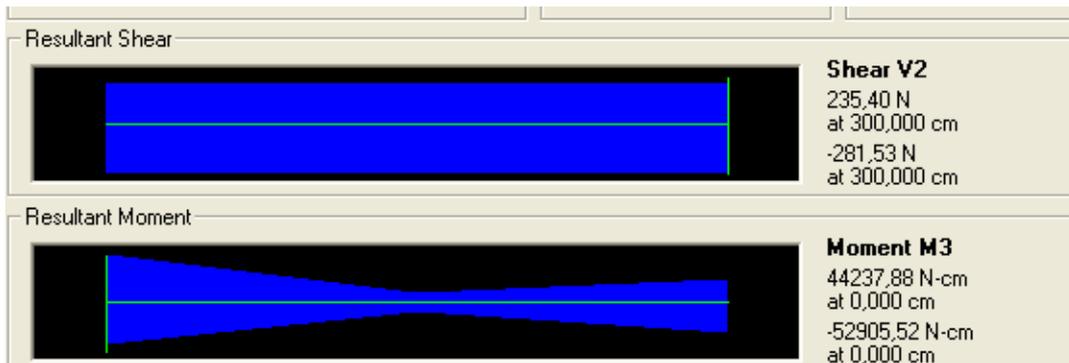


Figura I.31 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 2

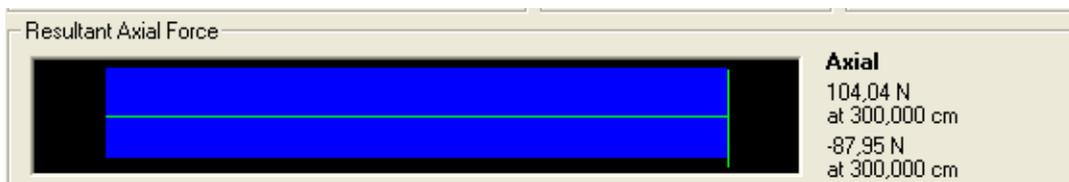


Figura I.32 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza axial elemento 2

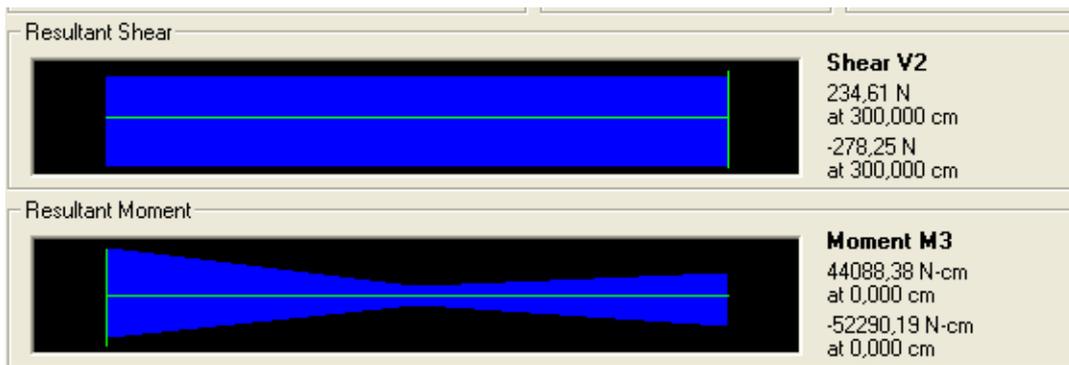


Figura I.33 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 2

I.2.3 Elemento 3



Figura I.34 Carga espectral CEC 2000 – Fuerza axial elemento 3



Figura I.35 Carga espectral CEC 2000 - Fuerza cortante y momento flector elemento 3



Figura I.36 Carga espectral UBC 94 – Fuerza axial elemento 3



Figura I.37 Carga espectral UBC 94 – Fuerza cortante y momento flector elemento 3

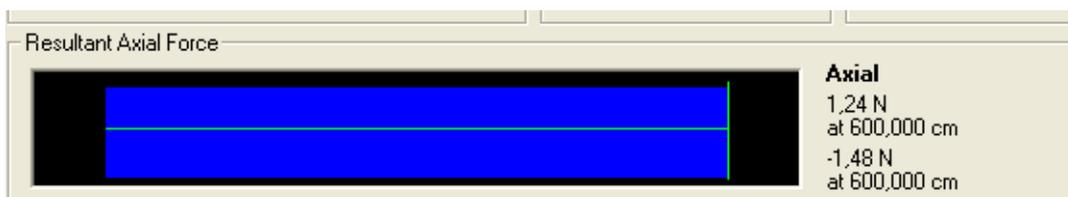


Figura I.38 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza axial elemento 3

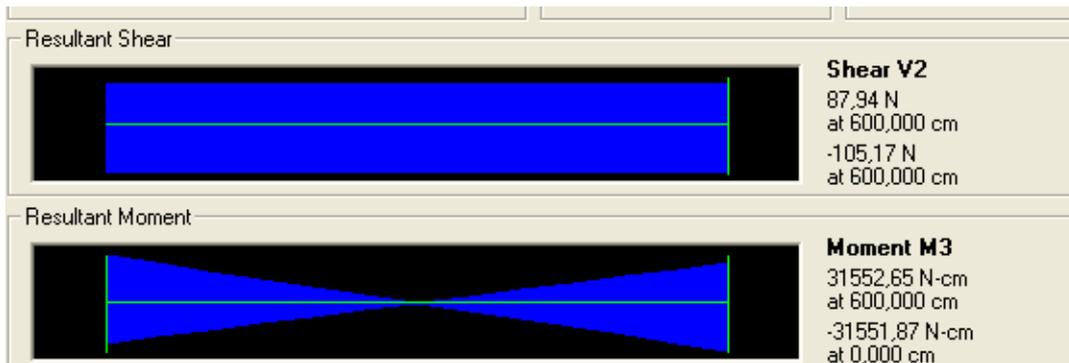


Figura I.39 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 3

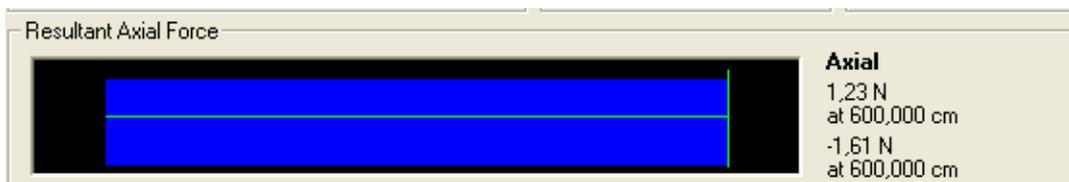


Figura I.40 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza axial elemento 3

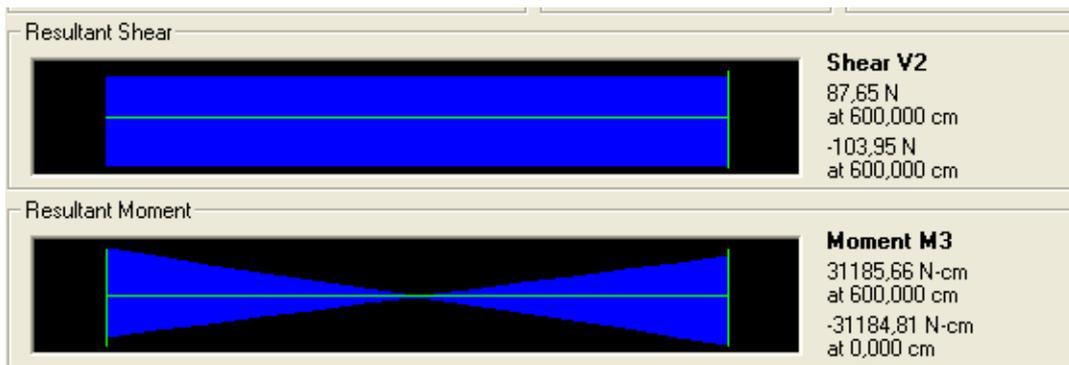


Figura I.41 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 3

I.3 Pórtico con amortiguador (Datos iniciales – Preliminares)

I.3.1 Elemento 1



Figura I.42 Carga espectral CEC 2000 – Fuerza axial elemento 1



Figura I.43 Carga espectral CEC 2000 - Fuerza cortante y momento flector elemento 1



Figura I.44 Carga espectral UBC 94 – Fuerza axial elemento 1



Figura I.45 Carga espectral UBC 94 – Fuerza cortante y momento flector elemento 1

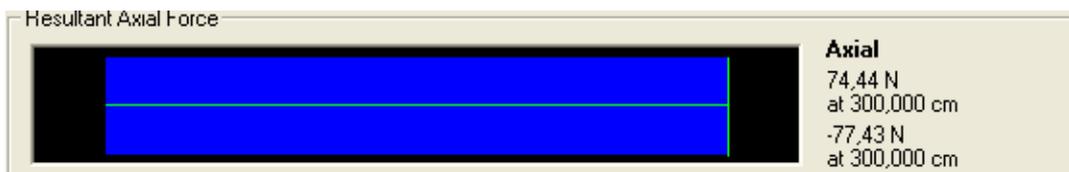


Figura I.46 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza axial elemento 1

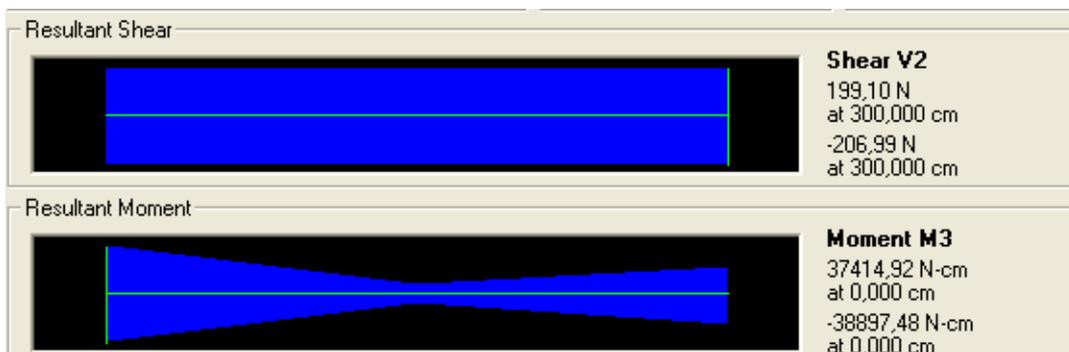


Figura I.47 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 1

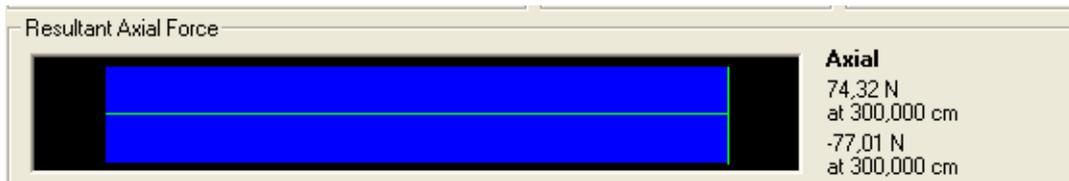


Figura I.48 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza axial elemento 1

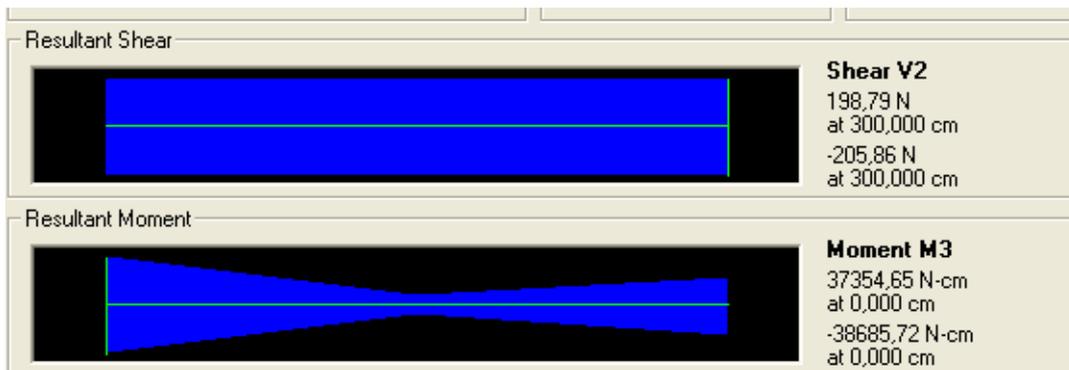


Figura I.49 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 1

I.3.2 Elemento 2



Figura I.50 Carga espectral CEC 2000 – Fuerza axial elemento 2



Figura I.51 Carga espectral CEC 2000 - Fuerza cortante y momento flector elemento 2



Figura I.52 Carga espectral UBC 94 – Fuerza axial elemento 2



Figura I.53 Carga espectral UBC 94 – Fuerza cortante y momento flector elemento 2

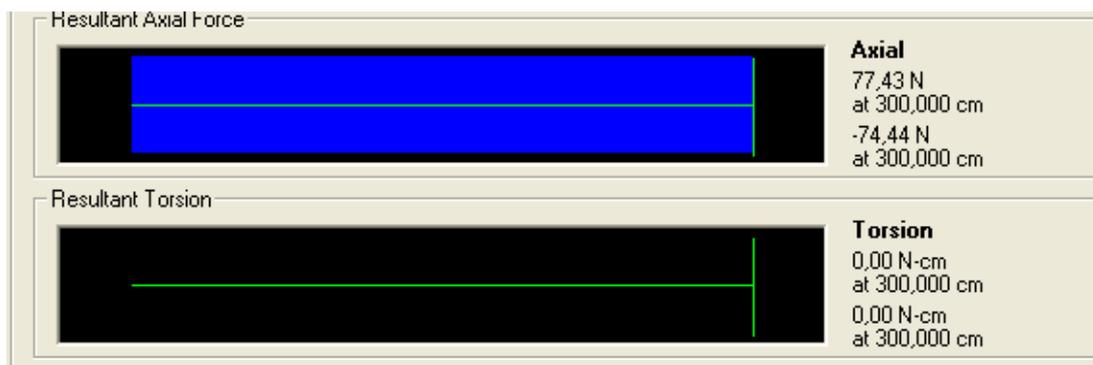


Figura I.54 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza axial elemento 2

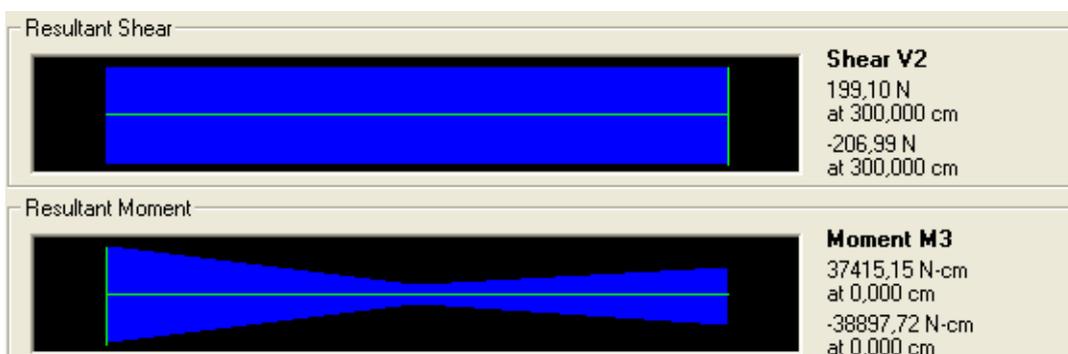


Figura I.55 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 2

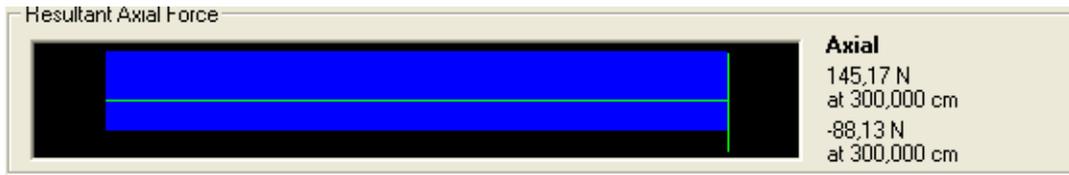


Figura I.56 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza axial elemento 2

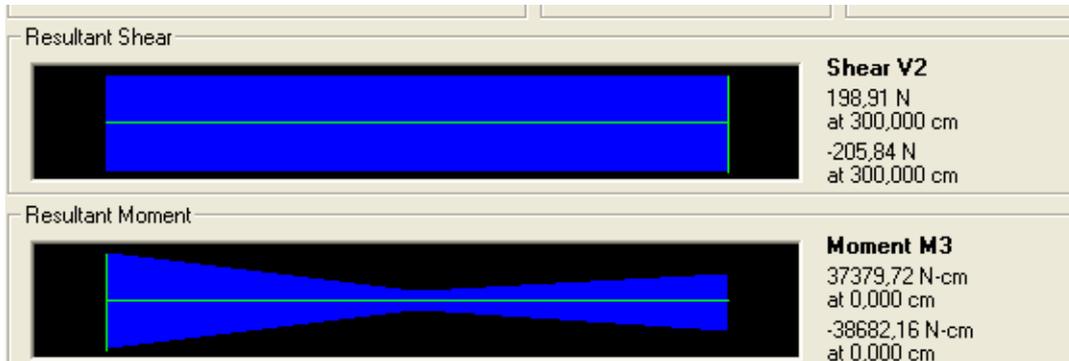


Figura I.57 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 2

I.3.3 Elemento 3



Figura I.58 Carga espectral CEC 2000 – Fuerza axial elemento 3



Figura I.59 Carga espectral CEC 2000 - Fuerza cortante y momento flector elemento 3



Figura I.60 Carga espectral UBC 94 – Fuerza axial elemento 3



Figura I.61 Carga espectral UBC 94 – Fuerza cortante y momento flector elemento 3

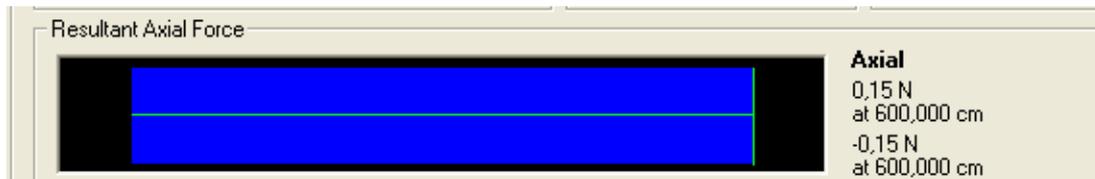


Figura I.62 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza axial elemento 3



Figura I.63 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 3

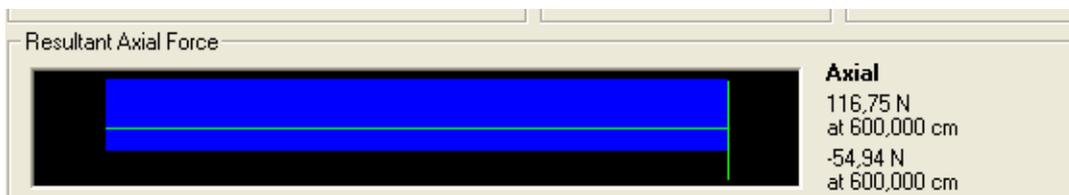


Figura I.64 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza axial elemento 3



Figura I.65 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 3

I.4 Pórtico con amortiguador de silicona

I.4.1 Elemento 1



Figura I.66 Carga espectral CEC 2000 – Fuerza axial elemento 1



Figura I.67 Carga espectral CEC 2000 - Fuerza cortante y momento flector elemento 1



Figura I.68 Carga espectral UBC 94 – Fuerza axial elemento 1



Figura I.69 Carga espectral UBC 94 – Fuerza cortante y momento flector elemento 1

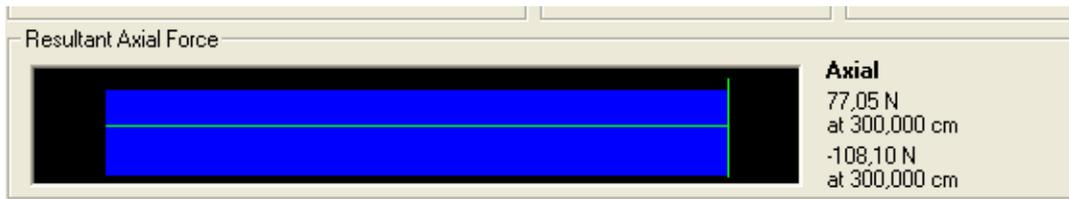


Figura I.70 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza axial elemento 1

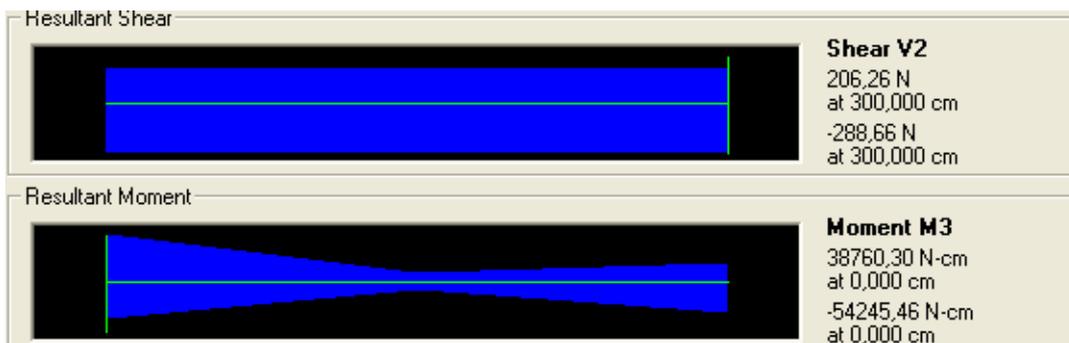


Figura I.71 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 1

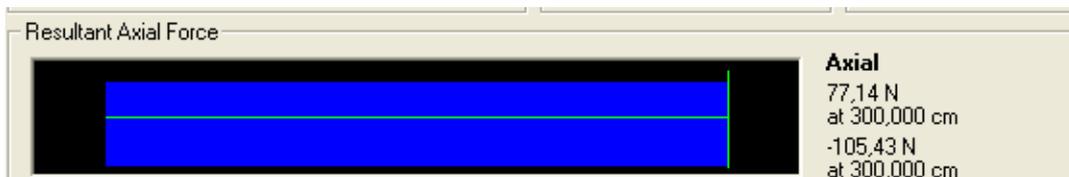


Figura I.72 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza axial elemento 1

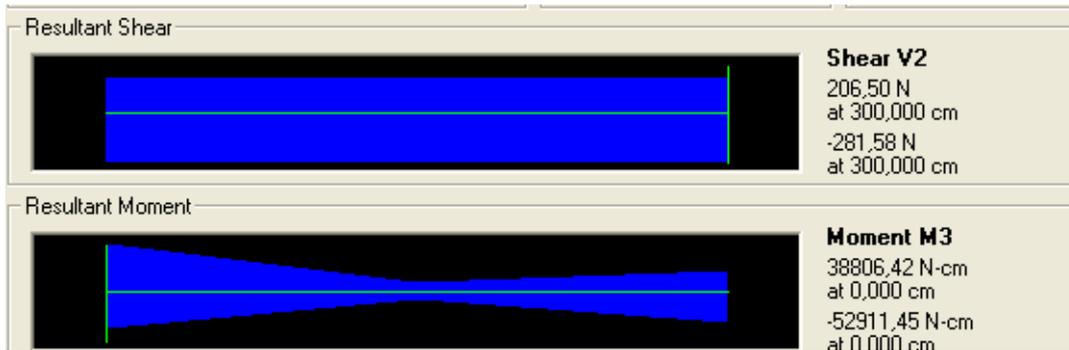


Figura I.73 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 1

I.4.2 Elemento 2



Figura I.74 Carga espectral CEC 2000 – Fuerza axial elemento 2



Figura I.75 Carga espectral CEC 2000 - Fuerza cortante y momento flector elemento 2



Figura I.76 Carga espectral UBC 94 – Fuerza axial elemento 2



Figura I.77 Carga espectral UBC 94 – Fuerza cortante y momento flector elemento 2

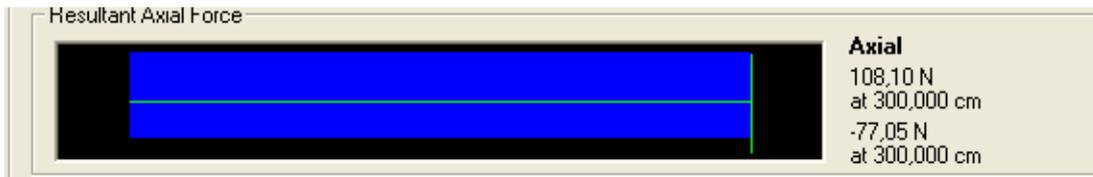


Figura I.78 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza axial elemento 2



Figura I.79 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 2

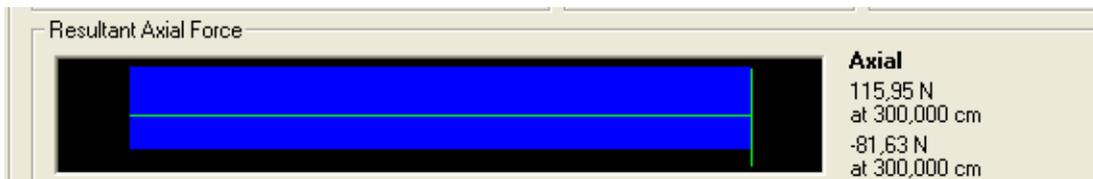


Figura I.80 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza axial elemento 2

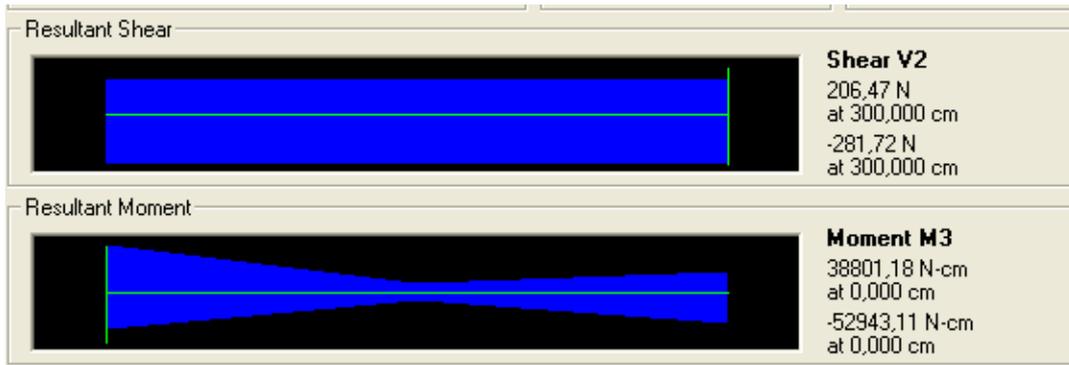


Figura I.81 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 2

I.4.3 Elemento 3



Figura I.82 Carga espectral CEC 2000 – Fuerza axial elemento 3



Figura I.83 Carga espectral CEC 2000 - Fuerza cortante y momento flector elemento 3



Figura I.84 Carga espectral UBC 94 – Fuerza axial elemento 3



Figura I.85 Carga espectral UBC 94 – Fuerza cortante y momento flector elemento 3

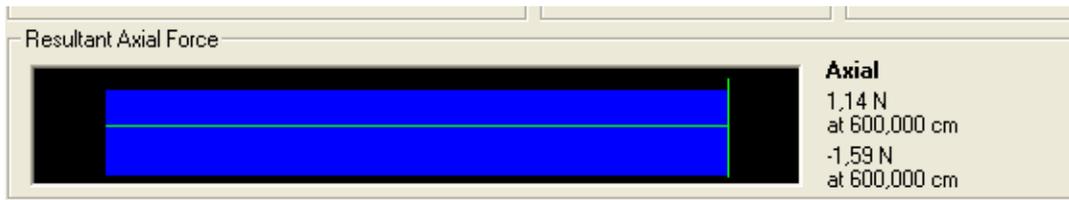


Figura I.86 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza axial elemento 3



Figura I.87 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 3

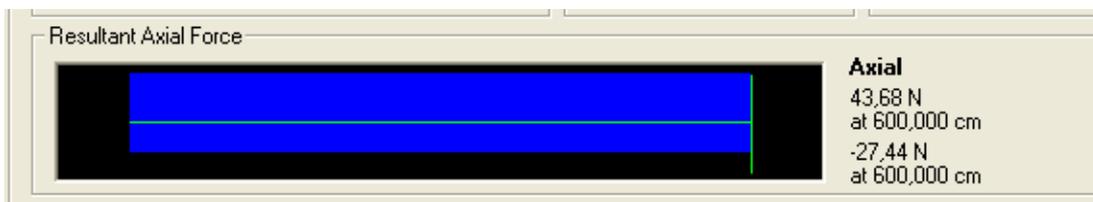


Figura I.88 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza axial elemento 3

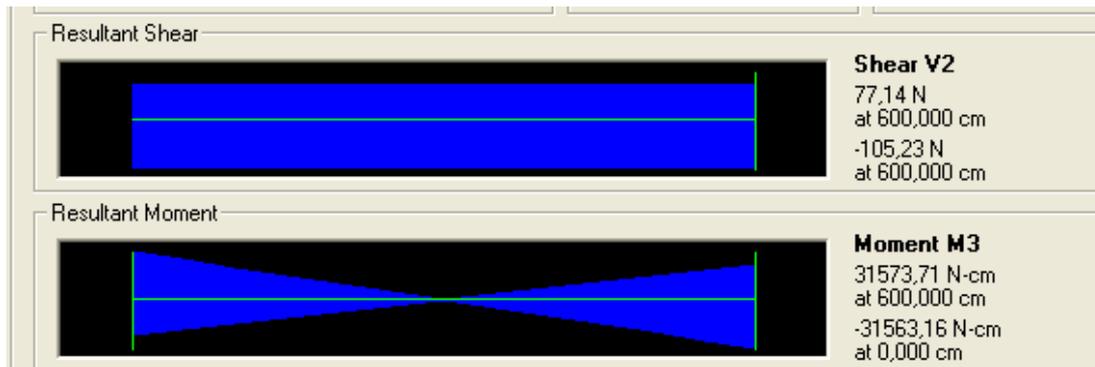


Figura I.89 Acelerograma sismo “El Centro” (Rango no - lineal) – Fuerza cortante y momento flector elemento 3

ANEXO J

TABLAS DE DATOS DE CORTANTES BASALES

REACCIONES DE BASE

Pórtico sin amortiguador

Tipo de Análisis	Respuesta	FX Global	FZ Global	MY Global	X Centroide FX	X Centroide FZ
		N	N	N-cm	cm	cm
Carga Muerta		-2,842E-14	1763,92	1,783E-10	3,636E+18	-6,6E-14
Modal	Modo 1	-10839,43	2,274E-12	-3257866,6	-8,592E-14	5,37E+17
	Modo 2	-3,68E-07	-2191672,23	0,05933	305,412	2,709E-08
	Modo 3	4074,74	-0,0001979	-657101703	-6,748E-08	-3,322E+12
	Modo 4	4,857E-07	-0,0001068	-0,07832	4,749E+12	-733,884
Espectral CEC 2000	Máx	3308,46	1,231E-11	994383,14	0,001581	1,639E+17
Espectral UBC94	Máx	873,65	2,064E-12	262580,64	0,0002645	4,328E+16
Por historia del tiempo lineal	Máx	659,94	6,118E-14	164270,19	1,149E-10	3,903E+21
	Mín	-602,3	-6,323E-14	-141109,24	-4,558E-12	-3,828E+20
Por historia del tiempo no lineal	Máx	659,94	6,118E-14	164270,19	1,149E-10	3,903E+21
	Mín	-602,3	-6,323E-14	-141109,24	-4,558E-12	-3,828E+20

Pórtico con amortiguador (datos preliminares)

Tipo de Análisis	Respuesta	FX Global	FZ Global	MY Global	X Centroide FX	X Centroide FZ
		N	N	N-cm	cm	cm
Carga Muerta		-2,842E-	1763,92	1,783E-10	3,636E+18	-6,6E-14

		14				
Modal	Modo 1	-10810,81	0,11	3249266,74	0,005557	11448402,3
	Modo 2	2691,02	1630415,36	433955355	0,677	266,324
	Modo 3	50,25	5691,67	1151334,76	45786,419	-200,514
	Modo 4	-3045,58	1456004,37	491120727	-2,283	-337,512
Espectral CEC 2000	Máx	573,92	0,1	172494,68	0,0004097	607763,301
Espectral UBC94	Máx	842,48	0,09556	253212,26	0,0005073	892162,481
Por historia del tiempo lineal	Máx	668,03	0,002625	169057,42	820,139	6912982911
	Mín	-604,97	-0,002831	-141280,29	-3328,013	-1,121E+10
Por historia del tiempo no lineal	Máx	663,67	0,03599	167001,33	1427,851	3,214E+10
	Mín	-601,73	-0,04517	-140940,27	-606,199	2638796612

Pórtico con amortiguador (datos laboratorio)

Tipo de Análisis	Respuesta	FX Global	FZ Global	MY Global	X Centroide FX	X Centroide FZ
		N	N	N-cm	cm	cm
Carga Muerta		-2,842E-14	1763,92	1,783E-10	3,636E+18	-6,6E-14
Modal	Modo 1	10835,41	-0,01498	3256659,77	0,0007807	81484860,7
	Modo 2	-1713,7	-1986846,2	276352727	0,202	139,176
	Modo 3	3695,18	-923208,44	-595895995	0,408	-645,854
	Modo 4	-10,74	304,54	429494,85	-214612,711	-1416,129
Espectral CEC 2000	Máx	298,11	0,09988	89598,08	0,000228	2241826,71
Espectral UBC94	Máx	437,21	0,0928	131406,78	0,0002133	3287927,3
Por historia del tiempo lineal	Máx	512,92	0,00188	124254,99	602,965	2,123E+11
	Mín	-531,61	-0,001841	-119494,88	-11,872	-1,313E+11
Por historia del tiempo no lineal	Máx	524,96	0,15	125015,83	7439,973	4961432114
	Mín	-561,61	-0,13	-126291,52	-34758,459	-2037426982

Pórtico con amortiguador (modificación con silicona)

Tipo de Análisis	Respuesta	FX Global	FZ Global	MY Global	X Centroide FX	X Centroide FZ
		N	N	N-cm	cm	cm
Carga Muerta		-2,842E-14	1763,92	1,783E-10	3,636E+18	-6,6E-14
Modal	Modo 1	-10809,42	0,11	3248847,49	0,005827	10916960,4
	Modo 2	-2698,56	1626055,43	435170677	0,689	267,786
	Modo 3	-53,59	-5493,02	1061778,83	42926,134	-191,357
	Modo 4	-3038,2	1460455,17	489932513	-2,167	-335,669
Espectral CEC 2000	Máx	348,87	0,11	104857	0,0003244	352345,039

Espectral UBC94	Máx	512,15	0,1	153931,65	0,0003695	517249,124
Por historia del tiempo lineal	Máx	677,7	0,002382	173351,37	120,204	7,992E+10
	Mín	-555,5	-0,001489	-123750,53	-87,67	-4,878E+10
Por historia del tiempo no lineal	Máx	624,77	0,2	157927,14	6268,371	229359503
	Mín	-562,6	-0,21	-126586,28	65468,846	6822296396