

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

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS
DE ACERO PROVISTAS DE DISIPADORES DE
ENERGÍA TIPO “*SLOTTED BOLTED CONNECTION*”

Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Civil

PETER ALFREDO FALK QUINTANILLA

Profesor Guía:
Iván Darrigrande Echavarría.

Profesor Co-Guía:
María Ofelia Moroni Yadlin.

Miembros de la comisión:
Mauricio Sarrazin Arellano.

Santiago, Chile 2010

A toda mi Familia
por su apoyo incondicional,
en especial a Luis, Catalina, Yerko
María Elena y Ascensión.

Mis agradecimientos a María Ofelia Moroni
e Ivan Darrigrande por su gran apoyo
y guía en todo momento.

RESÚMEN

Chile es uno de los países con más alta tasa de actividad sísmica en el mundo, por esta razón, se necesitan estrategias para mejorar el comportamiento de las estructuras frente a un sismo.-

El presente trabajo, trata sobre el análisis del comportamiento de una estructura de acero de 10 pisos, provista de un tipo de disipador friccional de energía sísmica llamado *Sloted Bolted Connection* (SBC). Estos estudios se realizaron en base a un proyecto de norma para el análisis de estructuras provistas de disipadores pasivos de energía, que en estos momentos está siendo desarrollada.-

El objetivo principal de este trabajo es determinar las reducciones en aceleraciones, velocidades y desplazamientos de la estructura debido a la incorporación de los dispositivos SBC. Además, se realizó una comparación de éstos resultados, con aquellos obtenidos tras la incorporación a la estructura de otros tipos de disipadores (ADAS, viscoelásticos y de marcos con arriostramiento excéntrico).-

Todo el análisis del desempeño de los disipadores SBC, y el estudio de los sistemas estructural y disipador, fue realizado mediante un modelo computacional en el programa de análisis no lineal SAP2000.-

Al analizar los resultados obtenidos, se concluye que los dispositivos SBC reducen efectivamente los índices de aceleraciones, velocidades y desplazamientos en la estructura. Al realizar la comparación entre los resultados obtenidos mediante los distintos tipos de dispositivos, se puede notar que son bastante similares, pero si se toma en cuenta la facilidad de construcción, la disponibilidad de materiales componentes, su fácil montaje, simplicidad de diseño, durabilidad y facilidad de monitoreo, hacen que la aplicación de los SBC sea la mejor alternativa para la realidad nacional.-

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1.	Presentación	1
1.2.	Objetivo general	3
1.3.	Objetivos específicos	3
1.4.	Comportamiento de una estructura convencional ante un sismo de gran magnitud	4
1.5.	Amortiguación suplementaria	5
1.6.	Amortiguamiento y curvas de histéresis	6
1.7.	Tipos de dispositivos controladores	8
1.8.	Disipadores pasivos de energía	9
1.9.	Clasificación de los disipadores pasivos de energía	9
1.9.1.	Sistemas de aislamiento de base	9
1.9.2.	Sistemas inerciales acoplados <i>Tuned Mass Dumper</i> (TMD)	11
1.9.3.	Disipadores friccionales	11
1.9.4.	Disipadores viscoelásticos	12
1.9.5.	Disipadores tipo ADAS	13
1.10.	Disposiciones constructivas	14
1.10.1.	Implementación en los marcos estructurales	15
1.10.2.	Distribución vertical del sistema disipativo	16

CAPÍTULO 2: DISIPADORES FRICCIONALES DE ENERGÍA

2.1.	Mecanismo de acción	18
2.2.	Tipos de disipadores friccionales	21
2.3.	Conexiones apernadas con ranuras alargadas (SBC)	22
2.4.	Materiales utilizados generalmente en la fabricación del disipador	25

CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA A ANALIZAR

3.1.	Descripción general	27
3.2.	Normas utilizadas en el diseño de la estructura base	30
3.3.	Materiales considerados para el diseño	30
3.4.	Cubicación de las cargas de diseño	31
3.5.	Distribución de las cargas de diseño en las vigas de la estructura	32
3.6.	Propiedades de piso	33
3.7.	Combinaciones de carga según LRFD	34
3.8.	Consideraciones para el diseño sísmico de edificios según la norma NCh433 Of.96	35
	3.8.1. Espectro de respuesta	35
	3.8.2. Deformaciones sísmicas	38
	3.8.3. Limitaciones del corte basal	38
3.9.	Diseño básico	39
	3.9.1. Disposiciones y consideraciones previas al diseño básico de la estructura	39
	3.9.2. Desarrollo y resultado del diseño	40
3.10.	Resultados de la aplicación del espectro de la norma Nch433 Of. 96 en la estructura	44
	3.10.1. Participaciones modales según dirección de análisis	44
	3.10.2. Cortes basales y factores de corrección	44
	3.10.3. Desplazamientos relativos y absolutos	45
	3.10.4. Factores de utilización	46

CAPÍTULO 4: ELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SISMOS DE DISEÑO

4.1.	Criterios usados para la elección de los registros de diseño	50
4.2.	Elección y caracterización de los registros	52
	4.2.1. Registro de Viña del Mar	54
	4.2.2. Registro de Lolleo	55
	4.2.3. Registro Artificial	56

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA DE LA ESTRUCTURA

5.1.	Introducción	57
5.2.	Análisis del sistema estructural	57
5.3.	Método de análisis escogido	63
5.4.	Obtención de resultados	65
5.4.1.	Resultados para los registros de Viña del Mar	65
5.4.2.	Resultados para los registros de Lolleo	70
5.4.3.	Resultados para los registros Artificiales	75
5.5.	Gráficas comparativas entre resultados	80

CAPÍTULO 6: DISEÑO Y MODELACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS SBC

6.1.	Características de los dispositivos SBC	85
6.2.	Carga óptima de deslizamiento	88
6.3.	Obtención de la carga de deslizamiento inicial	89
6.4.	Dispositivos escogidos	90
6.5.	Ubicación de los dispositivos SBC en la estructura	100
6.5.1.	Disposición en los marcos estructurales	100
6.5.2.	Distribución en la estructura	100
6.6.	Modelación computacional de los disipadores SBC	103
6.7.	Modelación de marcos	106

CAPÍTULO 7: ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA DE LA ESTRUCTURA PROVISTA

DE LOS SBC

7.1.	Introducción	108
7.2.	Requerimientos de la estructura sismorresistente	108
7.3.	Método de análisis escogido	113
7.4.	Obtención de resultados	114
7.4.1.	Resultados para los registros de Viña del Mar	114
7.4.2.	Resultados para los registros de Lolleo	117

7.4.3.	Resultados para los registros Artificiales	120
---------------	--	-----

CAPÍTULO 8: ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

8.1.	Reducción de los índices debido a la incorporación de los SBC	124
8.2.	Análisis de resultados	126
8.3.	Comparación de resultados con los obtenidos con otros disipadores	128
8.4.	Análisis de los requerimientos del proyecto de norma	129
8.5.	Conclusiones y comentarios	131

ANEXO A:	<i>CICLOS DE HISTÉRESIS DE DISPOSITIVOS SBC MEDIDOS PARA LOS REGISTROS DE VIÑA DEL MAR</i>	134
-----------------	---	-----

ANEXO B:	<i>CICLOS DE HISTÉRESIS DE DISPOSITIVOS SBC MEDIDOS PARA LOS REGISTROS DE LLOLLEO</i>	138
-----------------	--	-----

ANEXO C:	<i>CICLOS DE HISTÉRESIS DE DISPOSITIVOS SBC MEDIDOS PARA LOS REGISTROS ARTIFICIALES</i>	142
-----------------	--	-----

ANEXO D:	<i>GRÁFICAS COMPARATIVAS ENTRE EL ANÁLISIS DEL CASO BASE Y EL ANÁLISIS DEL CASO SBC</i>	146
-----------------	--	-----

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Fig. 1.1A.: Curvas de histéresis de dispositivos viscoelásticos y de fluido viscoso.	7
Fig. 1.1B.: Curvas de histéresis de dispositivos de plastificación metálica y de fricción.	7
Fig. 1.2.: Sistemas de control estructural antisísmico.	8
Fig. 1.3A.: Aislador de base, elastomérico.	10
Fig. 1.3B.: Aislador de base de tipo péndulo friccional.	10
Fig. 1.4A.: TMD (concepción clásica).	11
Fig. 1.4B.: TMD basado en el empleo de agua.	11
Fig. 1.5A.: Disipador friccional (Pall y Marsh 1982).	12
Fig. 1.5B.: Respuesta histerética (disipador friccional).	12
Fig. 1.6A.: Disipador viscoelástico.	12
Fig. 1.6B.: Respuesta histerética (disipador viscoelástico).	12
Fig. 1.7A.: Disipador tipo ADAS.	13
Fig. 1.7B.: Respuesta histerética (disipador tipo ADAS).	13
Fig. 1.8.: Subsistemas estructurales de una estructura sismorresistente con disipadores de energía.	14
Fig. 1.9.: Sistemas de conexión entre disipadores y la estructura porticada.	15
Fig. 1.10.: Distribución vertical del sistema disipativo.	17

CAPÍTULO 2

Fig. 2.1.:	Disipador friccional SBC.	22
Fig. 2.2.:	Curvas de histéresis correspondientes a dispositivos SBC.	23
Fig. 2.3.:	Dispositivo utilizado por Tremblay y Stainer.	25

CAPÍTULO 3

Fig. 3.1.:	Modelo computacional de la estructura a analizar.	27
Fig. 3.2.:	Planta típica de la estructura.	28
Fig. 3.3.:	Elevación típica de un eje interno.	29
Fig. 3.4.:	Distribución de cargas N° 1.	32
Fig. 3.5.:	Distribución de cargas N° 2.	33
Fig. 3.6.:	Grados de libertad.	39
Fig. 3.7.:	Características geométricas de los perfiles.	41
Fig. 3.8.:	Espectros de diseño.	43
Fig. 3.9.:	Ubicación de los elementos más solicitados en la dirección X (eje D).	47
Fig. 3.10.:	Ubicación de los elementos más solicitados en la dirección Y (eje 2).	49

CAPÍTULO 4

Fig. 4.1.:	Comparación de espectros.	53
Fig. 4.2.:	Registro de Viña del Mar X.	54
Fig. 4.3.:	Registro de Viña del Mar Y.	54
Fig. 4.4.:	Registro de Llolleo X.	55

Fig. 4.5.:	Registro de Lolloleo Y.	55
Fig. 4.6.:	Registro Artificial X.	56
Fig. 4.7.:	Registro Artificial Y.	56

CAPÍTULO 5

Fig. 5.1.:	Menú principal de la propiedad <i>hinge</i> .	59
Fig. 5.2.:	Menú para tipo de material.	60
Fig. 5.3.:	Menú de tipo de <i>hinge</i> y de sus componentes.	60
Fig. 5.4.:	Propiedades para <i>hinge</i> de tipo momento M3.	61
Fig. 5.5.:	Submenú de asignación de momento y rotación de fluencia.	62
Fig. 5.6.:	Ubicación de las rótulas en las vigas.	62
Fig. 5.7.:	Menú principal para definir el análisis tiempo historia en SAP2000.	64
Fig. 5.8.:	Ubicación de la rótula con giro máximo en el eje E (Viña del Mar X).	68
Fig. 5.9.:	Ubicación de la rótula con giro máximo en el eje 5 (Viña del Mar Y).	68
Fig. 5.10.:	Comportamiento de la rótula con máximo giro en X (Viña del Mar X).	69
Fig. 5.11.:	Comportamiento de la rótula con máximo giro en Y (Viña del Mar Y).	69
Fig. 5.12.:	Ubicación de la rótula con giro máximo en el eje E (Lolloleo X).	73
Fig. 5.13.:	Ubicación de la rótula con giro máximo en el eje 1 (Lolloleo Y).	73

Fig. 5.14.:	Comportamiento de la rótula con máximo giro en X (Llolleo X).	74
Fig. 5.15.:	Comportamiento de la rótula con máximo giro en Y (Llolleo Y).	74
Fig. 5.16.:	Ubicación de la rótula con giro máximo en el eje E (Artificial X).	78
Fig. 5.17.:	Ubicación de la rótula con giro máximo en el eje 1 (Artificial Y).	78
Fig. 5.18.:	Comportamiento de la rótula con máximo giro en X (Artificial X).	79
Fig. 5.19.:	Comportamiento de la rótula con máximo giro en Y (Artificial Y).	79
Fig. 5.20.:	Gráfica comparativa de desplazamientos c/r a la base.	80
Fig. 5.21.:	Gráfica comparativa de desplazamientos de entrepiso.	81
Fig. 5.22.:	Gráfica comparativa de velocidades absolutas.	82
Fig. 5.23.:	Gráfica comparativa de aceleraciones absolutas.	83
Fig. 5.24.:	Gráfica comparativa de fuerzas de corte.	84

CAPÍTULO 6

Fig. 6.1.:	Esquema general del tipo de SBC escogido.	86
Fig. 6.2.:	Cortes del SBC escogido.	86
Fig. 6.3.:	Detalles de la unión de los elementos componentes del SBC.	87
Fig. 6.4.:	Gráfica de carga de deslizamiento versus respuesta de la estructura.	88
Fig. 6.5.:	Indicador de tensión directa (DTI).	93
Fig. 6.6.:	Aplastamiento de las protuberancias del DTI.	94
Fig. 6.7.:	Calibrador de lámina para los DTI.	95
Fig. 6.8.:	Detalles de los SBC escogidos.	99

Fig. 6.9.:	Esquema de la localización de los SBC.	100
Fig. 6.10.:	Distribución de los dispositivos en un eje central.	101
Fig. 6.11.:	Distribución de los dispositivos en un eje perimetral.	102
Fig. 6.12.:	Distribución de los dispositivos según ejes.	102
Fig. 6.13.:	Definición general del SBC con la propiedad <i>hinge</i> .	103
Fig. 6.14.:	Propiedades del <i>hinge</i> que caracterizan al SBC.	104
Fig. 6.15.:	Ubicación de los SBC en las diagonales del modelo.	105
Fig. 6.16.:	Distribución de marcos de momento para el caso SBC.	106
Fig. 6.17.:	Configuración de la opción <i>RELEASES</i> .	107

CAPÍTULO 7

Fig. 7.1.:	Factores de utilización de los elementos más solicitados en la dirección X (eje D).	110
Fig. 7.2.:	Factores de utilización de los elementos más solicitados en la dirección Y (eje 2).	111
Fig. 7.3.:	Factores de utilización de elementos del eje C.	112

ANEXO A

Fig. A.1.:	Ciclo de histéresis, disipador tipo 1, registro <i>Viña del Mar X</i> .	135
Fig. A.2.:	Ciclo de histéresis, disipador tipo 2, registro <i>Viña del Mar X</i> .	135
Fig. A.3.:	Ciclo de histéresis, disipador tipo 3, registro <i>Viña del Mar X</i> .	136
Fig. A.4.:	Ciclo de histéresis, disipador tipo 1, registro <i>Viña del Mar Y</i> .	136

Fig. A.5.: Ciclo de histéresis, disipador tipo 2, registro *Viña del Mar Y.* 137

Fig. A.6.: Ciclo de histéresis, disipador tipo 3, registro *Viña del Mar Y.* 137

ANEXO B

Fig. B.1.: Ciclo de histéresis, disipador tipo 1, registro *Llolleo X.* 139

Fig. B.2.: Ciclo de histéresis, disipador tipo 2, registro *Llolleo X.* 139

Fig. B.3.: Ciclo de histéresis, disipador tipo 3, registro *Llolleo X.* 140

Fig. B.4.: Ciclo de histéresis, disipador tipo 1, registro *Llolleo Y.* 140

Fig. B.5.: Ciclo de histéresis, disipador tipo 2, registro *Llolleo Y.* 141

Fig. B.6.: Ciclo de histéresis, disipador tipo 3, registro *Llolleo Y.* 141

ANEXO C

Fig. C.1.: Ciclo de histéresis, disipador tipo 1, registro *Artificial X.* 143

Fig. C.2.: Ciclo de histéresis, disipador tipo 2, registro *Artificial X.* 143

Fig. C.3.: Ciclo de histéresis, disipador tipo 3, registro *Artificial X.* 144

Fig. C.4.: Ciclo de histéresis, disipador tipo 1, registro *Artificial Y.* 144

Fig. C.5.: Ciclo de histéresis, disipador tipo 2, registro *Artificial Y.* 145

Fig. C.6.: Ciclo de histéresis, disipador tipo 3, registro *Artificial Y.* 145

ANEXO D

Fig. D.1.: Comparación entre desplazamientos para los registros
de *Viña del Mar.* 147

Fig. D.2.:	Comparación entre desplazamientos de entrepiso para los registros de Viña del Mar.	147
Fig. D.3.:	Comparación entre aceleraciones absolutas para los registros de Viña del Mar.	148
Fig. D.4.:	Comparación entre velocidades absolutas para los registros de Viña del Mar.	148
Fig. D.5.:	Comparación entre fuerzas de corte para los registros de Viña del Mar.	149
Fig. D.6.:	Comparación entre desplazamientos para los registros de Lolleo.	150
Fig. D.7.:	Comparación entre desplazamientos de entrepiso para los registros de Lolleo.	150
Fig. D.8.:	Comparación entre aceleraciones absolutas para los registros de Lolleo.	151
Fig. D.9.:	Comparación entre velocidades absolutas para los registros de Lolleo.	151
Fig. D.10.:	Comparación entre fuerzas de corte para los registros de Lolleo.	152
Fig. D.11.:	Comparación entre desplazamientos para los registros Artificiales.	153
Fig. D.12.:	Comparación entre desplazamientos de entrepiso para los registros Artificiales.	153
Fig. D.13.:	Comparación entre aceleraciones absolutas para los registros Artificiales.	154

- Fig. D.14.: Comparación entre velocidades absolutas para
los registros Artificiales. 154
- Fig. D.15.: Comparación entre fuerzas de corte para los registros Artificiales. 155

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1.:	Cubicaciones de carga por piso.	31
Tabla 3.2.:	Propiedades de piso.	33
Tabla 3.3.:	Valores usados en el espectro de diseño.	37
Tabla 3.4.:	Características de las columnas escogidas.	41
Tabla 3.5.:	Características de las vigas escogidas.	42
Tabla 3.6.:	Participaciones modales.	44
Tabla 3.7.:	Cortes basales.	44
Tabla 3.8.:	Factores de corrección.	45
Tabla 3.9.:	Desplazamientos relativos y absolutos.	45
Tabla 3.10.:	Factores de utilización elementos más solicitados (Dirección X).	46
Tabla 3.11.:	Factores de utilización elementos más solicitados (Dirección Y).	48

CAPÍTULO 5

Tabla 5.1.:	Desplazamientos según los registros de Viña del Mar.	65
Tabla 5.2.:	Velocidades según los registros de Viña del Mar.	66
Tabla 5.3.:	Aceleraciones según los registros de Viña del Mar.	66
Tabla 5.4.:	Esfuerzos por nivel según los registros de Viña del Mar.	67
Tabla 5.5.:	Giros plásticos máximos para los registros de Viña del Mar.	67
Tabla 5.6.:	Desplazamientos según los registros de Llolleo.	70

Tabla 5.7.:	Velocidades según los registros de Lolloe.	71
Tabla 5.8.:	Aceleraciones según los registros de Lolloe.	71
Tabla 5.9.:	Esfuerzos por nivel según los registros de Lolloe.	72
Tabla 5.10.:	Giros plásticos máximos para los registros de Lolloe.	72
Tabla 5.11.:	Desplazamientos según los registros Artificiales.	75
Tabla 5.12.:	Velocidades según los registros Artificiales.	76
Tabla 5.13.:	Aceleraciones según los registros Artificiales.	76
Tabla 5.14.:	Esfuerzos por nivel según los registros Artificiales.	77
Tabla 5.15.:	Giros plásticos máximos para los registros Artificiales.	77

CAPÍTULO 6

Tabla 6.1.:	Pretensión mínima para pernos de alta resistencia.	92
Tabla 6.2.:	Características de los SBC escogidos.	99

CAPÍTULO 7

Tabla 7.1.:	Cortes basales de la estructura inicial.	109
Tabla 7.2.:	Cortes basales de la estructura sismorresistente (caso SBC).	109
Tabla 7.3.:	Desplazamientos (caso SBC) según los registros de Viña del Mar.	114
Tabla 7.4.:	Velocidades (caso SBC) según los registros de Viña del Mar.	115
Tabla 7.5.:	Aceleraciones absolutas (caso SBC) según los registros de Viña del Mar.	115
Tabla 7.6.:	Esfuerzos de corte (caso SBC) según los registros de Viña del Mar.	116

Tabla 7.7.:	Desplazamientos máximos de dispositivos SBC con registros de Viña del Mar.	116
Tabla 7.8.:	Desplazamientos (caso SBC) según los registros de Llolleo.	117
Tabla 7.9.:	Velocidades (caso SBC) según los registros de Llolleo.	118
Tabla 7.10.:	Aceleraciones absolutas (caso SBC) según los registros de Llolleo.	118
Tabla 7.11.:	Esfuerzos de corte (caso SBC) según los registros de Llolleo.	119
Tabla 7.12.:	Desplazamientos máximos de dispositivos SBC con registros de Llolleo.	119
Tabla 7.13.:	Desplazamientos (caso SBC) según los registros Artificiales.	120
Tabla 7.14.:	Velocidades (caso SBC) según los registros Artificiales.	121
Tabla 7.15.:	Aceleraciones absolutas (caso SBC) según los registros Artificiales.	121
Tabla 7.16.:	Esfuerzos de corte (caso SBC) según los registros Artificiales.	122
Tabla 7.17.:	Desplazamientos máximos de dispositivos SBC con registros Artificiales.	122

CAPÍTULO 8

Tabla 8.1.:	Reducción porcentual de índices para los registros de Viña del Mar.	124
Tabla 8.2.:	Reducción porcentual de índices para los registros de Llolleo.	125
Tabla 8.3.:	Reducción porcentual de índices para los registros Artificiales.	125
Tabla 8.4.:	Rango porcentual de disminuciones para los registros.	126
Tabla 8.5.:	Comparación de porcentajes de reducción para los registros Artificiales.	125

SIMBOLOGÍA

ϕ	Factor de diseño de pernos de alta resistencia de tipo deslizamiento crítico.
α	Factor de amplificación de la aceleración efectiva máxima.
A	Área en planta de cada piso.
A_0	Aceleración efectiva máxima del suelo, dado por la Tabla 6.2. de la norma NCh433 (19).
C	Matriz de amortiguamiento.
<i>CASO BASE</i>	Análisis computacional no lineal con el método tiempo historia, para la estructura inicial sin los dispositivos.
<i>CASO SBC</i>	Análisis computacional no lineal con el método tiempo historia, para la estructura modificada con la incorporación de los dispositivos SBC.
Δ	Desplazamiento relativo entre dos pisos consecutivos.
D_u	Factor de sobre pretensión promedio.
DL	Cargas muertas.
E	Módulo de elasticidad.
E_A	Energía de amortiguamiento.
E_D	Energía por deformación inelástica o ductilidad.
E_K	Energía cinética.
E_L	Energía de ingreso por el terremoto.
E_S	Energía de deformación elástica.
EX	Carga sísmica en la dirección x.

EY	Carga sísmica en la dirección y.
EDR	<i>Energy Dissipating Restraint.</i>
F_N	Fuerza normal.
F_R	Fuerza de fricción.
F_u	Esfuerzo último mínimo del acero.
F_{ue}	Esfuerzo último efectivo del acero.
F_y	Esfuerzo de fluencia mínima del acero.
F_{ye}	Esfuerzo de fluencia efectivo del acero.
FC	Factor de corrección.
G	Módulo de cizalle.
h_{sc}	Factor de perforación.
I	Coeficiente relativo a la importancia, uso y riesgo de falla del edificio, dado por la Tabla 6.1. de la norma NCh433 (19).
I_p	Inercia polar de cada piso.
I_x	Inercia en el eje x-x del piso.
I_y	Inercia en el eje y-y del piso.
IMF	<i>Intermediate Moment Frames.</i>
K	Matriz de rigidez.
L	Altura de entresijos.
L_h	Distancia entre las rótulas plásticas definidas en los extremos de la viga.
LL	Cargas vivas.
LSB	<i>Limited Slip Bolted.</i>

μ	Coeficiente de fricción.
M	Matriz diagonal de masas.
M_m	Capacidad en flexión mínima.
M_p	Momento plástico.
N	Parámetro que depende del tipo de suelo; índice asociado al modo de vibración, dado por la Tabla 6.3. según la clasificación de la Tabla 4.2. de la norma NCh433 (19).
N_b	Número de pernos.
N_s	Número de planos de deslizamiento.
OMF	<i>Ordinary Moment Frames.</i>
P	Peso del edificio.
p	Parámetro que depende del tipo de suelo, dado por la Tabla 6.3. según la clasificación de la Tabla 4.2. de la norma NCh433 (19).
Q	Corte basal en la dirección de análisis.
Q_{MAX}	Corte máximo.
Q_{MIN}	Corte mínimo.
R	Factor de la modificación de la respuesta estructural, dado por el Capítulo 5.7. y la Tabla 5.1. de la norma NCh433 (19).
R^*	Factor de reducción de la aceleración espectral, calculado para el período del modo con mayor masa traslacional equivalente en la dirección de análisis.
R_0	Factor de modificación de la respuesta estructural, dado por el Capítulo 5.7. y la Tabla 5.1. de la norma NCh433 (19).
R_n	Resistencia al deslizamiento.

R_t	Razón entre el esfuerzo último efectivo y el esfuerzo último mínimo del acero, dado por la Tabla I-6-1 de la <i>Seismic provisions for structural steel buildings</i> (3).
R_y	Razón entre el esfuerzo de fluencia efectivo y el esfuerzo de fluencia mínima del acero, dado por la Tabla I-6-1 de la <i>Seismic provisions for structural steel buildings</i> (3).
r_t	Carga aplicada en el tiempo.
S	Parámetro que depende del tipo de suelo, dado por la Tabla 6.3. según la clasificación de la Tabla 4.2. de la norma NCh433 (19).
S_a	Aceleración espectral de diseño.
SBC	<i>Slotted Bolted Connection.</i>
SMF	<i>Special Moment Frames.</i>
τ_n	Tensión normal.
τ_t	Tensión tangencial.
T	Parámetro que depende del tipo de suelo, dado por la Tabla 6.3. según la clasificación de la Tabla 4.2. de la norma NCh433 (19).
T^*	Período del modo con mayor masa traslacional en la dirección de análisis.
T_0	Parámetro que depende del tipo de suelo, dado por la Tabla 6.3. según la clasificación de la Tabla 4.2. de la norma NCh433 (19).
T_b	Pretensión requerida para los pernos de alta resistencia.
T_n	Período de vibración del modo n.
TMD	<i>Tuned Mass Dumper.</i>
$u(t)$	Desplazamientos en el tiempo.
$\dot{u}(t)$	Velocidades en el tiempo.

$\ddot{u}(t)$	Aceleraciones en el tiempo.
V_p	Esfuerzo de corte.
V_u	Esfuerzo de corte ultimo.
X_G	Coordenada x del centro de gravedad de cada piso.
Y_G	Coordenada y del centro de gravedad de cada piso.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación.

Chile está dentro de los países con más alta tasa de actividad sísmica en el mundo (27). Por esta razón, se han desarrollado históricamente en nuestro país, diversas estrategias que permiten mejorar el comportamiento de las estructuras frente a un sismo; como son el diseño sísmico estructural y la incorporación de aisladores de base.-

Recientemente, se han desarrollado en el extranjero nuevas estrategias y dispositivos que permiten mejorar la respuesta de las estructuras frente a los sismos, entre estos se destacan los sistemas activos de protección y los disipadores pasivos de energía. Los disipadores pasivos de energía se clasifican en varios tipos de acuerdo a su mecanismo de acción. El disipador pasivo tipo friccional produce amortiguamiento mediante ciclos de histéresis producto de la fricción seca que se desarrolla entre dos cuerpos sólidos al deslizarse uno respecto del otro.-

En Chile, la construcción de edificios habitacionales ha estado tradicionalmente dominada por la construcción en hormigón. Sin embargo, en los últimos años se ha visto un aumento en la demanda de edificios estructurados en acero, lo cual nos obliga a conocer su comportamiento sísmico con el fin de aumentar su resistencia sísmica disminuyendo los desplazamientos, velocidades y aceleraciones. Además de la protección estructural, es necesario también, reducir los daños que se producen al interior de las construcciones. La gran magnitud y frecuencia de los sismos en Chile provoca efectos de entrepiso desastrosos, que se traducen en pérdidas mayores que el costo de la estructura misma.-

Con el fin de poder determinar la posible utilización de los disipadores friccionales en edificios de acero en Chile, se necesita estudiar previamente su eficacia ante sismos de gran intensidad como los que ocurren en nuestro país, siendo este uno de los objetivos de la presente memoria.-

Específicamente en esta memoria, se eligió estudiar el disipador friccional denominado “*Slotted Bolted Connection*” (SBC) por las siguientes razones:

- (i) Su montaje es fácil, ya que se trata de una conexión apernada modificada.
- (ii) Tiene una simple constitutiva y se puede fabricar con materiales de fácil adquisición.
- (iii) Existen análisis de su comportamiento mediante ensayos de laboratorio.

Su fácil montaje y simple constitutiva son características que llevan a pensar que los dispositivos SBC podrían implementarse en Chile.-

Por otra parte, debido al reciente desarrollo de estos nuevos dispositivos antisísmicos no existe aún en Chile una norma que regule los requisitos para el diseño sísmico de estructuras con sistemas de disipación de energía. Por esta razón, en estos momentos se está redactando una norma para tal efecto.-

Mediante la presente memoria se pretende evaluar el desempeño de este proyecto de norma que regularía el diseño de estructuras con disipadores pasivos de energía. Específicamente, se evaluará si al aplicar el método de análisis sugerido en el proyecto de norma al diseño de una estructura de marcos de acero de 10 pisos provista de disipadores friccionales tipo *Slotted Bolted Connection*, se producen resultados que indiquen una mejor respuesta de la estructura frente a sismos de gran intensidad. Además, se evaluará la aplicabilidad de este método, en cuanto a nivel de detalle de cálculo y tiempo requerido para tal efecto.-

1.2. Objetivo general.

- Analizar el comportamiento dinámico de un edificio de acero de 10 pisos equipado con disipadores friccionales de energía tipo *Slotted Bolted Connection* y diseñado según un proyecto de norma en preparación, al ser sometido a sismos de gran intensidad.-

1.3. Objetivos específicos.

- Determinar la reducción de: los desplazamientos, velocidades y aceleraciones globales y de entrepiso en un edificio de acero al incluir disipadores tipo "*Slotted Bolted Connection*".-
- Realizar una comparación entre los resultados obtenidos con este tipo de disipador, con aquellos encontrados tras la utilización de tres tipos distintos de disipadores pasivos de energía a la estructura de acero: disipadores ADAS, tipo TAYLOR y de marcos con arriostramiento excéntrico.-

1.4. Comportamiento de una estructura convencional ante un sismo de gran magnitud.

Considerando que los terremotos son una expresión de la tierra para liberar parte de su energía interna, cada construcción fundada en la tierra cercana a la fuente de un terremoto, recibirá parte de esta energía (E_L), como una “energía de entrada”, y tratará de disiparla de la mejor manera posible. En general, sabemos que la fuente más grande de disipación de energía en una construcción es la llamada “energía no-lineal” o energía disipada a través de la ductilidad de los materiales (E_D) que conforman el sistema que resiste la carga lateral. Así, la mayoría de los códigos sismorresistentes confían en la ductilidad o el comportamiento no lineal del marco para resistir las fuerzas del terremoto.-

Otras fuentes de disipación de energía son las “energías de tensión” (E_S), o energía de deformación elástica, la “energía cinética” (E_K), o energía disipada a través del movimiento de la estructura, y la “energía de amortiguación” (E_A), o energía disipada a través de la amortiguación interna de la construcción. Por lo tanto, la ecuación de la energía se convierte en:

$$E_L = E_k + E_S + E_A + E_D \quad (1.1)$$

Donde:

E_L = Energía de ingreso por el terremoto.

E_K = Energía cinética.

E_S = Energía de deformación elástica.

E_A = Energía de amortiguamiento.

E_D = Energía por deformación inelástica o ductilidad.

El amortiguamiento interno inherente de los edificios, oscila entre un 1% y 5% del amortiguamiento crítico. Se trata pues, de incrementar este amortiguamiento interno mediante la incorporación de amortiguadores suplementarios en la estructura colocados en lugares estratégicos (15).-

Lo anterior consiste en encontrar la manera de maximizar E_A y minimizar E_D (16, 31), en la ecuación 1.2, es decir, en lograr que:

$$E_A \gg E_S + E_K + E_D \quad (1.2)$$

Una forma de conseguir valores altos de E_A está en proveer el sistema estructural con algunos dispositivos suplementarios de disipación de energía los cuales incrementan el amortiguamiento interno a valores de hasta 20% o 25% de la amortiguación crítica¹.-

1.5. Amortiguación suplementaria.

El amortiguamiento suplementario o adicional en las estructuras se puede lograr mediante la implementación de dispositivos disipadores de energía o amortiguadores sísmicos en puntos y zonas estratégicas de la estructura original. Dependiendo de la configuración del edificio, su geometría intrínseca y en especial de su estructuración, se podrá implementar amortiguamiento suplementario a una construcción desde un 8% adicional al inherente de la estructura (es decir entre 9% y 13% de amortiguamiento interno) hasta un 20% o más de amortiguamiento, todo lo cual permitirá al edificio disipar una gran cantidad de energía sísmica por amortiguamiento (16).-

En el caso de edificios con disipadores pasivos de energía cada ciclo histerético representa energía que no se disipa por la estructura sino que por el elemento o dispositivo de acero en cuestión. Esa disipación de energía conlleva a un incremento del amortiguamiento interno (16).-

La reducción de la respuesta de las estructuras frente a las sollicitaciones dinámicas justifica la utilización de disipadores de energía. El objetivo de usar estos dispositivos de disipación de energía radica en la necesidad de agregar amortiguamiento a las estructuras y, por lo tanto, concentrar los daños estructurales en

¹ Razón o fracción de amortiguamiento crítico $\beta = c/2m\omega_n$ -una medida adimensional del amortiguamiento- es una propiedad del sistema que depende de la masa y la rigidez. La constante de amortiguamiento c es una medida de la energía disipada en un ciclo de vibración libre (Ref. 10).

las zonas especialmente diseñadas para esto con el propósito de absorber o consumir una porción importante de la energía sísmica. De esta forma, se reducen las demandas de disipación de energía por ductilidad en los miembros estructurales principales y se minimiza así su posible daño estructural y degradación de su resistencia.-

Sin embargo, dotar a una estructura de amortiguadores la encarece en cierto grado, aunque también la protege mejor contra los efectos sísmicos, en particular los vinculados con la resonancia; no obstante, resulta interesante pensar en la posibilidad de que los amortiguadores sean económicamente viables, y pueden serlo si se cumplen dos condiciones (12):

- (i) Que tales amortiguadores se diseñen para resistir varios sismos extraordinariamente fuertes, a fin de evitar su reposición frecuente.-
- (ii) Que el marco estructural (columnas y vigas) se proyecte desde un principio con miras a tener mayor flexibilidad, sin menoscabo de su capacidad para soportar cargas.-

1.6. Amortiguamiento y curvas de histéresis.

En materiales metálicos, la histéresis es el mecanismo de disipación de energía generado al imponer una deformación plástica al material durante ciclos de carga y descarga. Sabemos que los materiales, aleaciones y elementos estructurales no se comportan de una manera perfectamente elástica, ni siquiera frente a sollicitaciones pequeñas. La inelasticidad está siempre presente en los materiales bajo cualquier tipo e intensidad de cargas y lleva a la disipación de energía (14).-

Los gráficos de carga cíclica *versus* deformación de todos los mecanismos de disipación de energía forman curvas de histéresis, ya que la energía es almacenada en un sistema sollicitado por ciclos de carga, la curva de descarga pasa por debajo de la curva de carga. El área que queda definida por ambas curvas, área de curva de histéresis, es proporcional a la energía almacenada. Esta área representa la energía

disipada por amortiguamiento. La energía almacenada internamente por un sistema, generalmente, se disipa en forma de calor, sin embargo, algunas veces una pequeña parte de la energía puede ser almacenada mediante cambios estructurales que elevan el nivel de energía del sistema. En las Figuras 1.1.A y B, podemos apreciar ejemplos de diversas curvas de histéresis.-

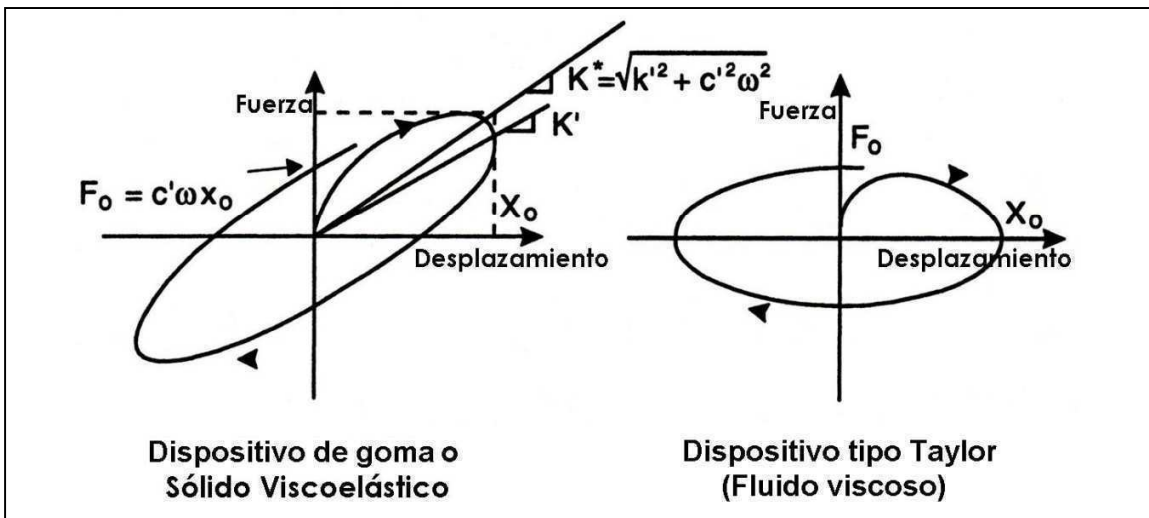


Figura 1.1A.
Curvas de histéresis de dispositivos viscoelásticos y de fluido viscoso.

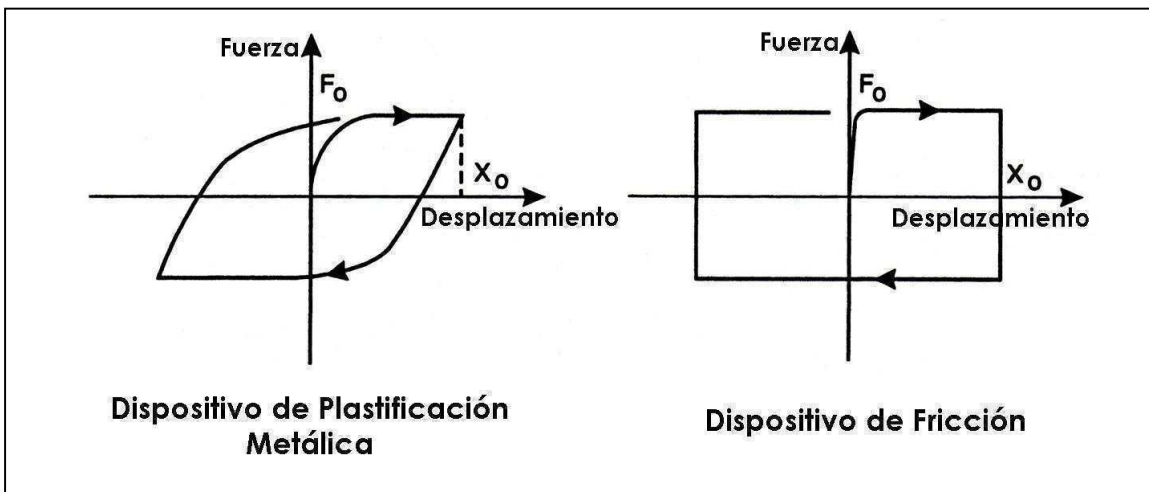


Figura 1.1B.
Curvas de histéresis de dispositivos de plastificación metálica y de fricción.

1.7. Tipos de dispositivos controladores.

Los sistemas sismorresistentes avanzados tienen por objetivo el control de los desplazamientos de la estructura haciendo uso de alguno (o varios) de los siguientes recursos:

- (i) Modificación de las propiedades dinámicas del edificio. Se lleva a cabo de manera que este reduzca su energía de entrada o evite actitudes resonantes.
- (ii) Disipación de energía introducida al sistema a partir de dispositivos mecánicos.
- (iii) Control con dispositivos que ejerzan fuerzas que contrarresten la acción sísmica.

Según esta lista de recursos, los dispositivos controladores pueden clasificarse en diferentes tipos. Una clasificación general, está representada en la Figura 1.2. En ella se puede ver que los sistemas de control antisísmico se dividen principalmente en cuatro grandes áreas: sistemas pasivos, semiactivos, híbridos y activos, cada una de las cuales posee diversos dispositivos que generan el debido control requerido.-

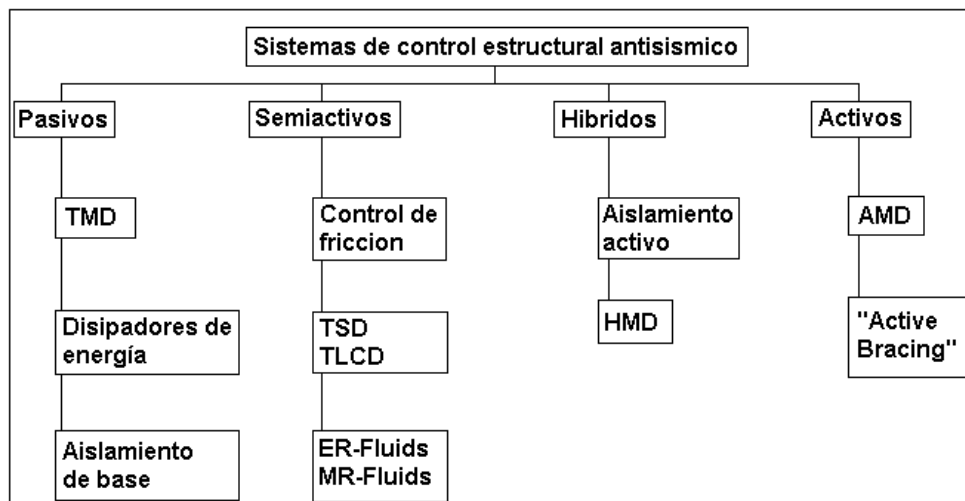


Figura 1.2.
Sistemas de control estructural antisísmico.

1.8. Disipadores pasivos de energía.

Los Disipadores Pasivos de energía son dispositivos que le permiten a la estructura en la cual están incorporados disipar energía en zonas específicas dispuestas especialmente para ello. Los sistemas de control pasivo se basan en elementos que responden de forma inercial a la acción sísmica, además no precisan de aporte energético para su funcionamiento.-

Estos dispositivos no alteran ni modifican el *input* energético, que depende básicamente del período fundamental y de la masa del edificio. Ellos manifiestan su eficiencia al maximizar la energía disipada y disminuir su respuesta estructural, es decir, modifican esta respuesta a medida que la energía del sismo entra a la estructura.-

Las propiedades más valiosas de los sistemas pasivos son su robustez (no dependen de fuentes de energía y son mecánicamente simples) y el costo competitivo de los edificios que los utilizan en comparación con los construidos de forma convencional (5).-

Otra propiedad importante de esta tecnología es que los disipadores pasivos funcionan como un elemento rígido o como un disipador de energía dependiendo del nivel o velocidad de deformación que experimenten. Ellos incrementan la resistencia sísmica de una estructura mediante el aumento de su capacidad de disipación de energía y la modificación de su rigidez.-

1.9. Clasificación de los disipadores pasivos de energía.

1.9.1. Sistemas de aislamiento de base.

Es una herramienta de diseño que se fundamenta en desacoplar la estructura del movimiento del suelo con el objetivo de protegerla de los efectos del sismo. Para tal efecto, se utilizan dispositivos flexibles al movimiento horizontal y rígidos al desplazamiento vertical. Los aisladores están localizados entre la base y la

superestructura para liberar la energía que está temporalmente almacenada en los aisladores. La presencia de estos dispositivos alarga el periodo fundamental del conjunto y limita su “input” energético. Dos de estos dispositivos se presentan en las Figuras 1.3A y B.-



Figura 1.3A.
Aislador de base, elastomérico.

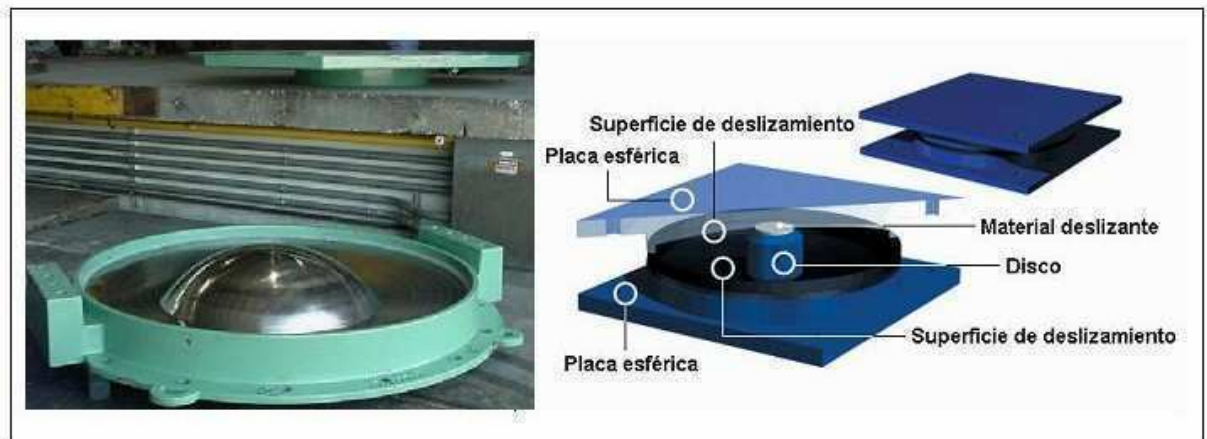


Figura 1.3B.
Aislador de base de tipo péndulo friccional.

1.9.2. Sistemas inerciales acoplados *Tuned Mass Dumper* (TMD).

Este sistema consta de los siguientes componentes: un oscilador de un grado de libertad, un mecanismo de resorte y un mecanismo de amortiguamiento. Los sistemas inerciales acoplados (TMD) introducen masas adicionales, normalmente situadas en la parte alta de los edificios, cuya excitación absorbe parte de la energía cinética introducida por el terremoto (Fig. 1.4A y 1.4B).-

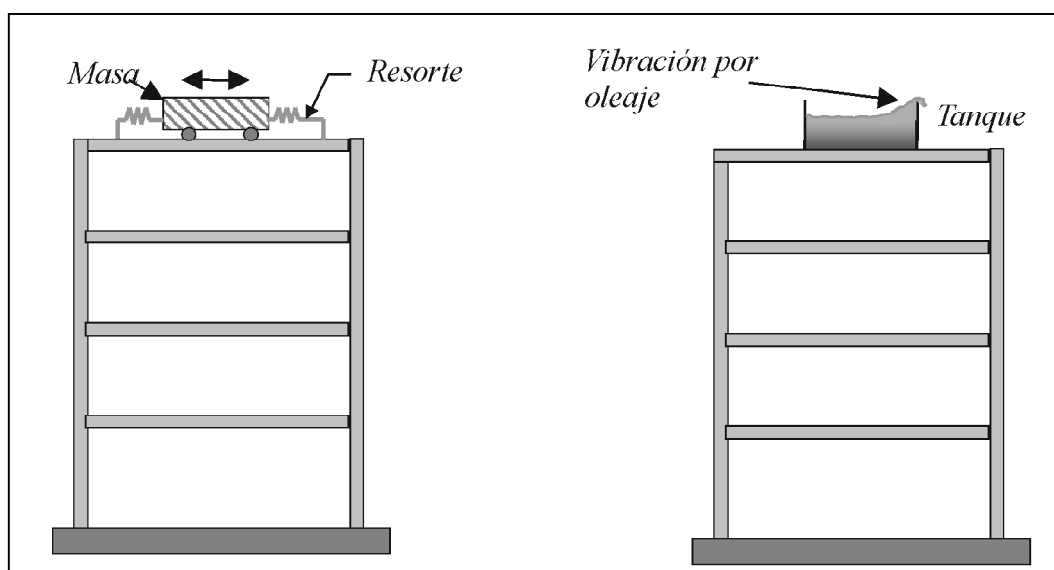


Figura 1.4A
TMD (concepción clásica)

Figura 1.4B
TMD basado en el empleo de agua

1.9.3. Disipadores friccionales.

Los sistemas de fricción disipan energía, basándose en el roce que ocurre entre dos superficies en contacto bajo presión y en su deslizamiento relativo. Los desplazamientos relativos que tienen lugar en una estructura durante un sismo desarrollan a su vez desplazamientos relativos en las placas del disipador, lo que se traduce en disipación de energía en forma de calor principalmente y generando curvas de histéresis rectangulares. La fuerza de fricción en cada conexión es igual al producto de la fuerza normal por el coeficiente de roce dinámico (Fig. 1.5A y 1.5B).-

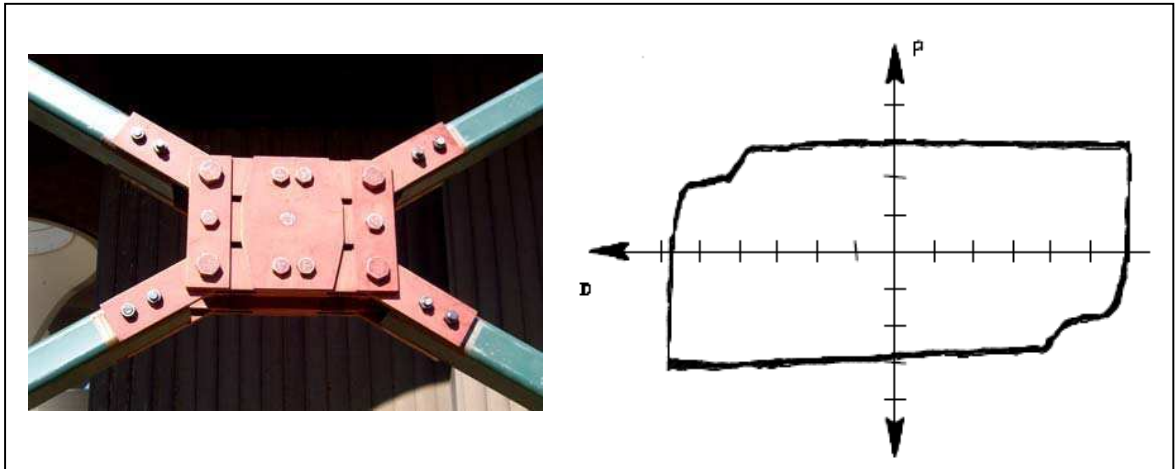


Figura 1.5A
Disipador Friccional (Pall y Marsh 1982)

Figura 1.5B
Respuesta histerética (disipador friccional)

1.9.4. Disipadores viscoelásticos.

Estos mecanismos disipan energía a través de deformación dinámica de materiales viscosos. Los disipadores viscoelásticos pueden separarse básicamente en tres grupos: i) sólidos viscoelásticos, ii) fluidos conducidos a través de orificios y iii) fluidos viscoelásticos. Su comportamiento depende de la velocidad con la que se genera la deformación durante los ciclos de carga. Las propiedades de rigidez y amortiguamiento de los dispositivos dependen fundamentalmente de la temperatura que se genere durante la disipación y la frecuencia de carga (Fig. 1.6A y 1.6B).-

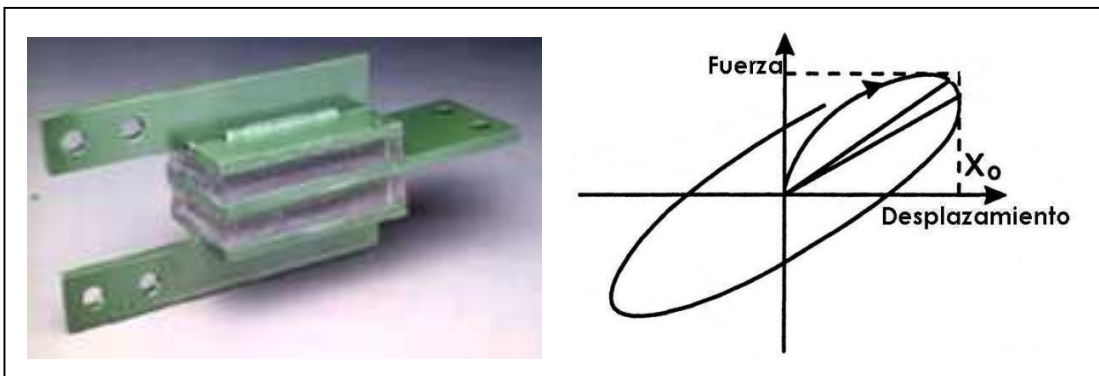


Figura 1.6A
Disipador viscoelástico

Figura 1.6B
Respuesta histerética (disipador viscoelástico)

1.9.5. Disipadores tipo ADAS.

Todo tipo de esfuerzos, sean de torsión, cizalle o axial puede dar como resultado la plastificación de metales. Por lo tanto, los desplazamientos relativos² que se generan en una estructura, producto de estos esfuerzos, inducen deformaciones plásticas en las placas metálicas, lo que se traduce en disipación de energía a través de procesos de histéresis. El comportamiento de estos dispositivos es estable, son confiables a largo plazo y en general ofrecen buena resistencia a factores ambientales.-

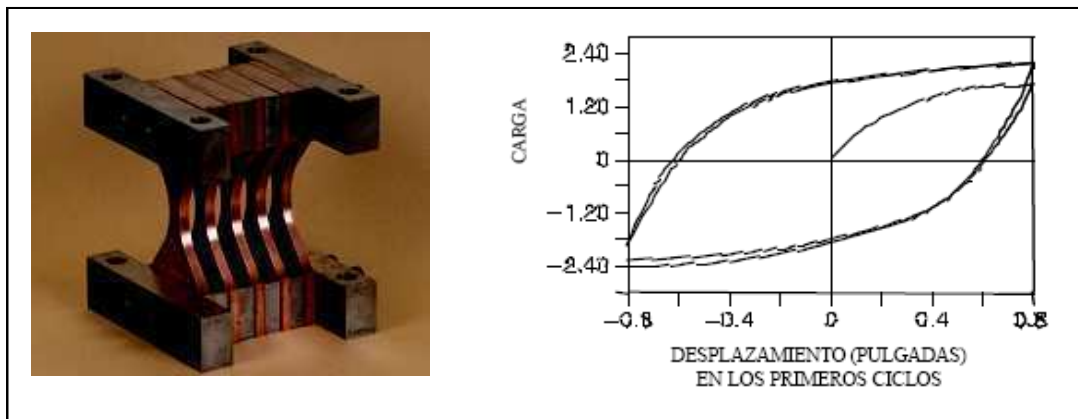


Figura 1.7A
Disipador tipo ADAS

Figura 1.7B
Respuesta histerética (disipador tipo ADAS)

² Desplazamientos entre pisos de un edificio, entre estructuras adyacentes conectadas o entre el tablero y los estribos de un puente.

1.10. Disposiciones constructivas

Normalmente, los disipadores se colocan cuando la estructura principal porticada ya soporta la mayor parte de la carga vertical, de forma que el sistema disipativo se limita a resistir las acciones horizontales. Tal como vemos en la Figura 1.8., el sistema dual no estándar (con disipadores), con el objeto de analizar su comportamiento y dimensionamiento, se divide en dos subsistemas:

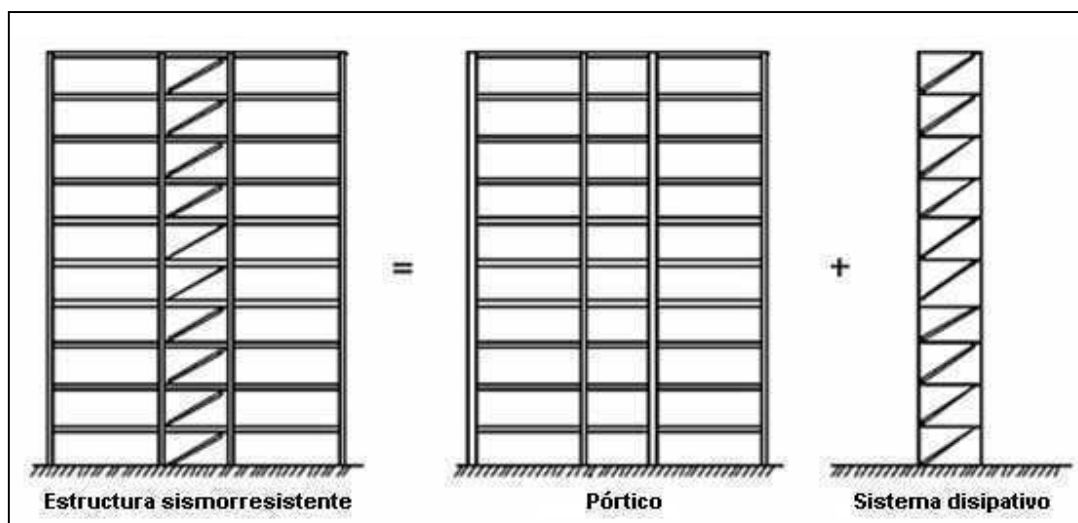


Figura 1.8.
Subsistemas estructurales de una estructura sismorresistente con disipadores de energía.

Uno, constituido por la estructura porticada convencional (subsistema flexible) y otro, consistente en el sistema disipativo (subsistema rígido). Establecer que los dispositivos no están condicionados por las acciones verticales es una hipótesis adoptada con frecuencia, y que se cumple, en mayor o menor grado, en función de la configuración adoptada por el conjunto del sistema disipativo.-

El uso de dispositivos histeréticos sólo tiene sentido en una estructura que tenga puntos cercanos que experimenten desplazamientos relativos durante sollicitaciones sísmicas o de otra especie, que obliguen al dispositivo a deformarse dentro de su rango plástico.-

Pueden ser instalados en cualquier lugar de la estructura, como ser: marcos de acero, marcos de hormigón armado, sistemas estructurales resistentes interiores o exteriores, en configuraciones de diagonales, etc.-

1.10.1. Implementación en los marcos estructurales.

El sistema A (pórtico A) (Fig. 1.9.) se ha utilizado, entre otros, con los siguientes disipadores: i) viscoelástico (1), ii) con lámina curvada a flexión (26) y iii) sistemas de fricción (26).-

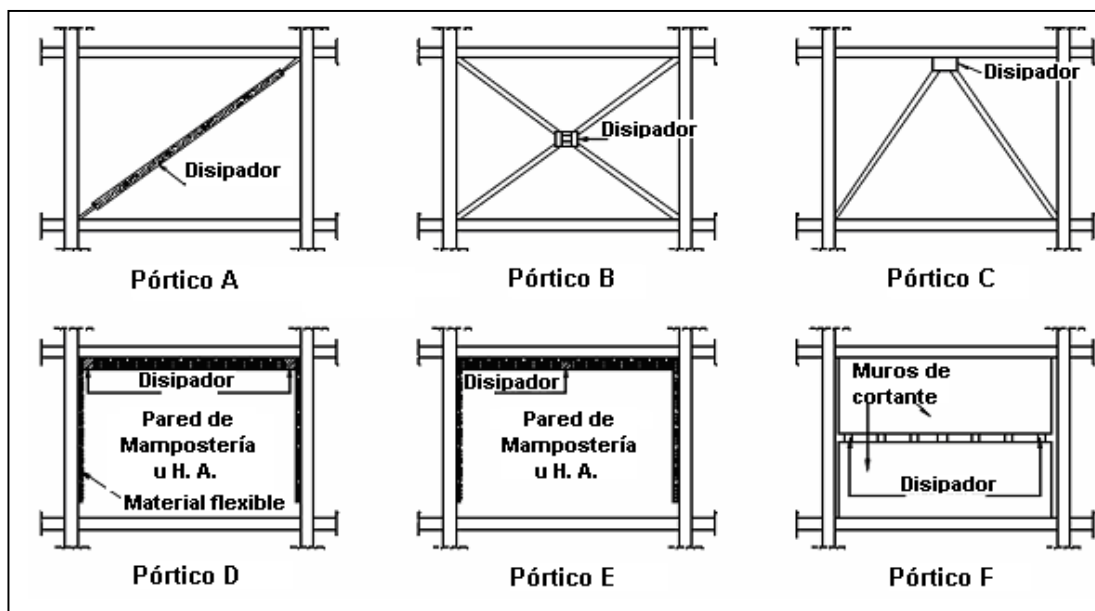


Figura 1.9.
Sistemas de conexión entre disipadores y la estructura porticada.

El sistema B (pórtico B; Fig. 1.9.) se emplea básicamente con el dispositivo de Pall y Marsh (23, 9). Ver Figura 1.5A. Ambos sistemas presentan como ventajas: i) independencia de las cargas verticales, ii) menor inclinación de las barras que en el arriostamiento en forma de A, lo cual supone menos cargas en las diagonales y menores componentes verticales en los disipadores.-

El sistema C (pórtico C; Fig. 1.9.) se ha empleado para la sujeción de una amplia gama de dispositivos: i) ADAS, TADAS y ii) varios tipos de disipadores por plastificación por corte. Este sistema presenta algunos inconvenientes: i) las diagonales y los disipadores pueden verse afectados por cargas verticales debidas a flechas diferidas en el hormigón o debidas a cargas posteriores a la fijación del sistema, o por acciones verticales de origen sísmico y ii) la mayor inclinación de las diagonales produce mayores componentes verticales en los disipadores.-

Los sistemas D y E (pórticos D y E; Fig. 1.9.) se proponen generalmente para la rehabilitación de edificios de pórticos con particiones de albañilería.-

El sistema E impone una carga vertical considerable a los propios dispositivos, por lo que éstos deben tener una determinada resistencia respecto a este componente.-

En los casos C, E y F resulta conveniente efectuar el montaje del sistema disipativo con la mayor parte de la carga vertical presente, pues ésta puede afectar negativamente el comportamiento de las diagonales y de los propios disipadores.-

1.10.2. Distribución vertical del sistema disipativo.

Otro aspecto a considerar dentro de las disposiciones constructivas, es la distribución vertical del sistema disipativo. Si bien es cierto que los arriostramientos resultan eficientes para reducir los desplazamientos laterales, en comportamiento elástico aumentan notablemente el corte basal. La introducción de mecanismos disipativos en el sistema de respuesta horizontal permite controlar de forma efectiva los desplazamientos de entre pisos con valores aceptables de corte basal (11).-

Otro aspecto a considerar en la distribución vertical, es la conveniencia de instalar disipadores en todas las plantas o sólo en algunas de ellas (Fig. 1.10.).-

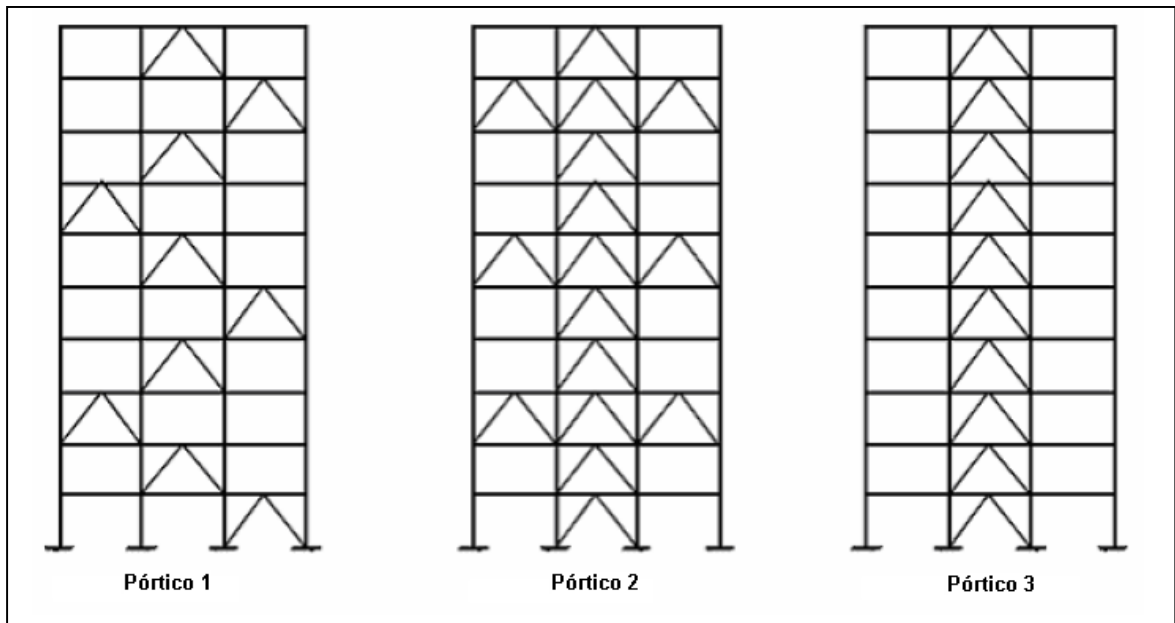


Figura 1.10.
Distribución vertical del sistema disipativo.

En los últimos años se ha masificado, en países como Estados Unidos, Japón y México, el uso de disipadores de energía gracias al buen comportamiento que estos presentaron en los terremotos de Northridge (1994) y Kobe (1995). Sin embargo, en Chile ésta tecnología es reciente y aún no se ha aplicado. Por esta razón, interesa conocer las ventajas y desventajas que puede tener la incorporación de la tecnología de disipadores de energía no solo en el comportamiento ante un sismo, sino que también desde el punto de vista económico en comparación con la realidad de la construcción actual en el país y frente a técnicas similares de protección sísmica.-

CAPÍTULO 2

DISIPADORES FRICCIONALES DE ENERGÍA

2.1. Mecanismo de acción.

La disipación a través de mecanismos de fricción es una de las maneras más clásicas de retirar energía de un sistema. Ello a través de la transformación de energía cinética en calor por roce. Los disipadores friccionales absorben la energía de vibración con ciclos de histéresis producto de la fricción seca que se desarrolla entre dos cuerpos sólidos al deslizarse uno respecto al otro. El trabajo es realizado por la fuerza tangencial requerida para el deslizamiento de un cuerpo sobre la superficie de otro.-

FUERZA DE FRICCIÓN: TEORÍA DE COULOMB

La teoría básica de la fricción seca se fundamenta en las siguientes hipótesis provenientes de trabajos de daVinci, Amstons y Coulomb:

- La fuerza de fricción total que puede ser desarrollada, es independiente del área de la superficie aparente de contacto.
- La fuerza de fricción total que puede ser desarrollada es proporcional a la fuerza normal total que actúa sobre la superficie.
- Para el caso de deslizamientos con velocidades relativamente bajas, la fuerza total de fricción es independiente de esa velocidad.

Como resultado de estas hipótesis se puede decir que en el instante inicial del deslizamiento la fuerza de fricción (F_R) es igual a la fuerza normal (F_N) por el coeficiente de fricción (μ):

$$F_R = \mu F_N \quad (2.1)$$

Puesto que se ha observado que cuando el deslizamiento es inminente el coeficiente de fricción es un poco más alto que cuando el deslizamiento está en

proceso, se toma en consideración un coeficiente de fricción estático (μ_s), y un coeficiente de fricción cinético (μ_k). En ambos casos la fuerza friccional F actúa tangencialmente en el plano de la interfaz, en la dirección opuesta al movimiento.-

Con el objeto de extender esta teoría a condiciones más generales, tales como distribuciones no uniformes o superficies no planas estas presunciones se pueden aplicar al límite infinitesimal. Entonces, generalizando la ecuación (2.1), podemos escribir:

$$\tau_t = \mu \tau_n \quad (2.2)$$

Aquí τ_t corresponde a la tensión tangencial y τ_n a la tensión normal. Esta ecuación es muy útil para determinar el esfuerzo nominal de contacto, que se requiere para el diseño.-

El concepto de fricción de Coulomb, provee las bases teóricas de la mayoría de los trabajos concernientes a disipadores friccionales. Sin embargo, en la práctica la teoría de Coulomb es sólo aproximadamente cierta. Además, aunque siempre se asume que el coeficiente de fricción μ , que aparece en las ecuaciones (2.1) y (2.2), es constante para un par dado de materiales en contacto, esto no siempre es cierto. Por ejemplo, el valor de μ en cualquier momento depende no sólo de los materiales de deslizamiento, sino también de las condiciones actuales de la interfaz de deslizamiento. Puesto que a menudo las superficies son sitio de numerosos procesos físicos y químicos, el coeficiente de fricción asociado a la interfaz podría variar considerablemente en el tiempo. Muchas interfaces bimetálicas son particularmente susceptibles a este tipo de comportamiento.-

TEORÍA MODERNA DE LA FRICCIÓN

La teoría moderna de la fricción seca de sólidos, se enfoca a la identificación de la real área de contacto, los mecanismos involucrados en la vinculación interfacial, y la deformación inelástica localizada que ocurre en la región de contacto.-

Las superficies naturales como las tratadas no son lisas a nivel microscópico sino que poseen ondulaciones y rugosidades. El contacto verdaderamente ocurre a través de la interacción entre las asperezas de la superficie. Investigadores han encontrado que una variedad de modelos topográficos con asperezas cónicas, piramidales y de otros tipos, bajo deformaciones elásticas o plásticas, producen áreas reales de contacto proporcionales a la fuerza normal. Esto en general está de acuerdo con la teoría de Coulomb.-

Cuando el contacto real ocurre directamente entre metales, bandas adhesivas dispuestas en la interfaz producen coeficientes de fricción $\mu > 1$. Además, la adherencia proporciona una contribución significativa para el contacto, sobre todo de metales limpios con alta rugosidad. Para aplicaciones típicas de ingeniería, es bueno tener películas superficiales que aumenten la superficie de contacto, en particular el óxido que se produce bajo ciertas condiciones atmosféricas. Sin embargo, la presencia de óxido, complica el estudio de los procesos de fricción. El aspecto final de la teoría moderna abarca los procesos de deformación local que ocurren en la vecindad de la interfase. Estos procesos involucran las respuestas elásticas, elastoplásticas y posiblemente viscoplásticas de las asperezas, películas superficiales, material superficial particulado y substratos. Esto puede ser concebido como un problema mecánico continuo.-

2.2. Tipos de disipadores friccionales.

Existen diferentes tipos de disipadores friccionales que difieren en su complejidad mecánica y en los materiales utilizados en la superficie de deslizamiento:

- **Limited Slip Bolted (LSB)**: Se utiliza para el control sísmico de estructuras de paneles grandes. Incorpora elementos que lo proveen de una respuesta fuerza-desplazamiento consistente.-
- **Sumitomo**: Es un dispositivo uniaxial que ha sido utilizado en Japón, en el cual la fuerza normal requerida se provee a través de la acción de un resorte contra un eje interno y externo.-
- **Energy Dissipating Restraint (EDR)**: En este diseño la disipación ocurre sobre la interfaz entre dos ejes de fricción de bronce y la pared de acero cilíndrica.-
- **Slotted Bolted Connection (SBC) (Conexiones Apernadas Ranuradas)**: Fue diseñado para aplicarlo en estructuras de marcos rígidos. La versión de FitzGerald et al (1989), emplea todos sus componentes de acero, mientras que Grigorian et al (1993), incorpora componentes fabricados con una aleación de Zinc y Cobre (*brass*). En ambos casos, golillas *Beleville* se usan para mantener las tensiones iniciales de los pernos.-

2.3. Conexiones apernadas con ranuras alargadas (SBC).

Un dispositivo SBC es básicamente la modificación de una conexión apernada típica. Consiste de una placa principal apernada entre dos placas exteriores (Fig. 2.1.). Para crear un disipador SBC se practican ranuras paralelas a la línea de carga en la placa principal, de modo que ésta se pueda deslizar entre las placas exteriores (13).-

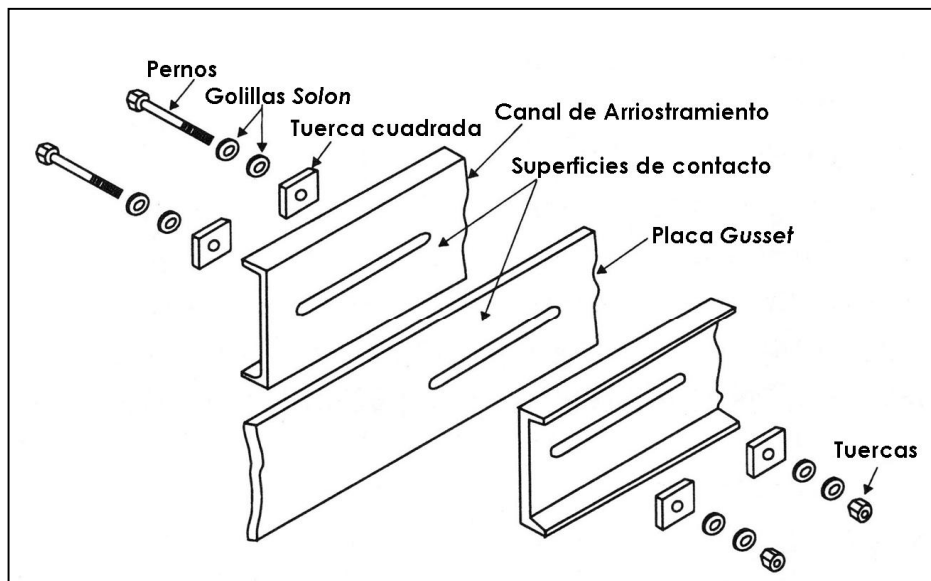


Figura 2.1.
Disipador friccional SBC.

Todas las placas son de acero industrial estándar y las superficies deslizantes están recubiertas con láminas o placas de bronce asbesto o algún tipo de aleación, dependiendo de las características que se deseen en el disipador SBC (29). Así, al evitar el roce entre superficies de la misma naturaleza, se logra un comportamiento histerético estable, eliminando problemas de roce excesivo, abrasión y soldadura entre placas por aumentos violentos de temperatura. Los dispositivos SBC se diseñan como parte de una estructura secundaria inserta dentro de la estructura primaria original. Ellos se ubican en la estructura secundaria de manera tal que los desplazamientos relativos que experimenta la estructura primaria generen el nivel de carga necesario para activarlos. Así, cuando la tracción o compresión aplicadas a la conexión, exceden

las fuerzas friccionales desarrolladas entre las superficies deslizantes, la placa principal se desplaza. De este modo se disipa energía mediante fricción durante ciclos de carga rectilíneos de tracción y compresión. Este proceso se repite con un deslizamiento en la otra dirección al cambiar el sentido de la fuerza aplicada.-

El parámetro principal que determina el comportamiento del dispositivo SBC se denomina *Carga de Deslizamiento Inicial*, que es la carga mínima para lograr el deslizamiento entre placas. La aplicación de ciclos de carga de gran magnitud por sobre la *Carga de Deslizamiento Inicial* genera curvas de histéresis aproximadamente rectangulares (Fig. 2.2.).-

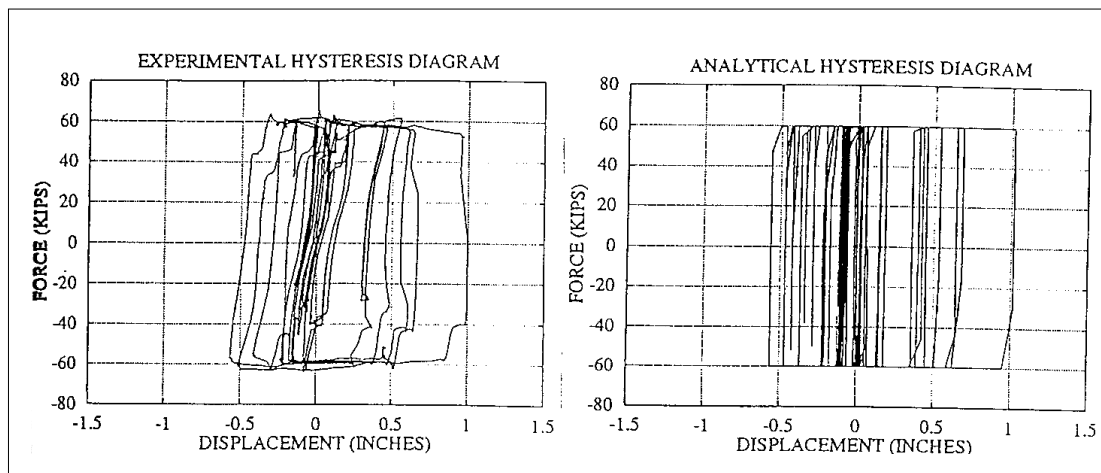


Figura 2.2.
Curvas de histéresis correspondientes a dispositivos SBC.

Entendiendo que la energía disipada por un dispositivo friccional es igual al producto de la carga de deslizamiento por el deslizamiento que provoca, para *Cargas de Deslizamiento Inicial* muy bajas la energía disipada es cero ya que no hay desplazamiento relativo entre las placas. Por otro lado, si la carga de deslizamiento es muy alta habrá un nivel de deslizamiento relativo, pero la energía disipada será despreciable. Entre estos dos extremos hay un valor de carga que entrega el máximo de energía disipada llamada *Carga Optima de Deslizamiento* (22), la cual minimiza la diferencia entre la cantidad de energía entregada al dispositivo y la cantidad de energía

disipada. Dicha carga depende de la estructura y del nivel de control que se desee lograr en ella.-

Dada la naturaleza del mecanismo de disipación por fricción, para que los dispositivos efectivamente disipen energía, la estructura a la cual se incorporen debe experimentar desplazamientos relativos que generen esfuerzos axiales que superen a la carga de deslizamiento inicial, o bien, a la carga óptima de deslizamiento. Si bien la carga de deslizamiento es decidida en el diseño del disipador, la carga óptima es una característica de la estructura. Que la estructura sea capaz de activar sus dispositivos de fricción depende del nivel de los desplazamientos relativos que experimente o de la fuerza que genere sobre ellos (23).-

Los dispositivos generalmente se diseñan para no deslizar durante cargas de viento, de tormentas o con sismos moderados (Filiatrault y Cherry, 1987). Sin embargo, frente a sismos severos, los dispositivos deslizan al alcanzarse la carga óptima predeterminada y disipan la mayor parte de la energía que entrega el sismo antes de que ocurra daño en elementos estructurales del sistema primario. Esto permite al edificio permanecer elástico o al menos demorar la fluencia de sus miembros principales.-

Estudios dinámicos paramétricos (23) han mostrado que la carga óptima de deslizamiento es independiente del sismo y es una propiedad de la estructura, y que una variación de alrededor de 20% en la carga de deslizamiento no afecta significativamente la respuesta del edificio.-

2.4.- Materiales utilizados generalmente en la fabricación del disipador.

Generalmente en la fabricación de los disipadores friccionales de energía, los materiales más utilizados son el acero y el bronce, ya que los SBC son conexiones modificadas.-

En los ensayos del Departamento de Ingeniería Civil de California, Bekerley, Grigorian y Popov (13) utilizaron en sus ensayos disipadores friccionales preparados en acero A36 estructural. En uno de sus modelos se incluyó placas de bronce común (UNS-260), colocadas entre la placa principal y las placas exteriores. Se hicieron agujeros y ranuras en las placas de acero y se unieron con pernos A325, de 1/2" de diámetro y de 3 1/2" de largo y golillas de compresión Belleville 8-EH-112.-

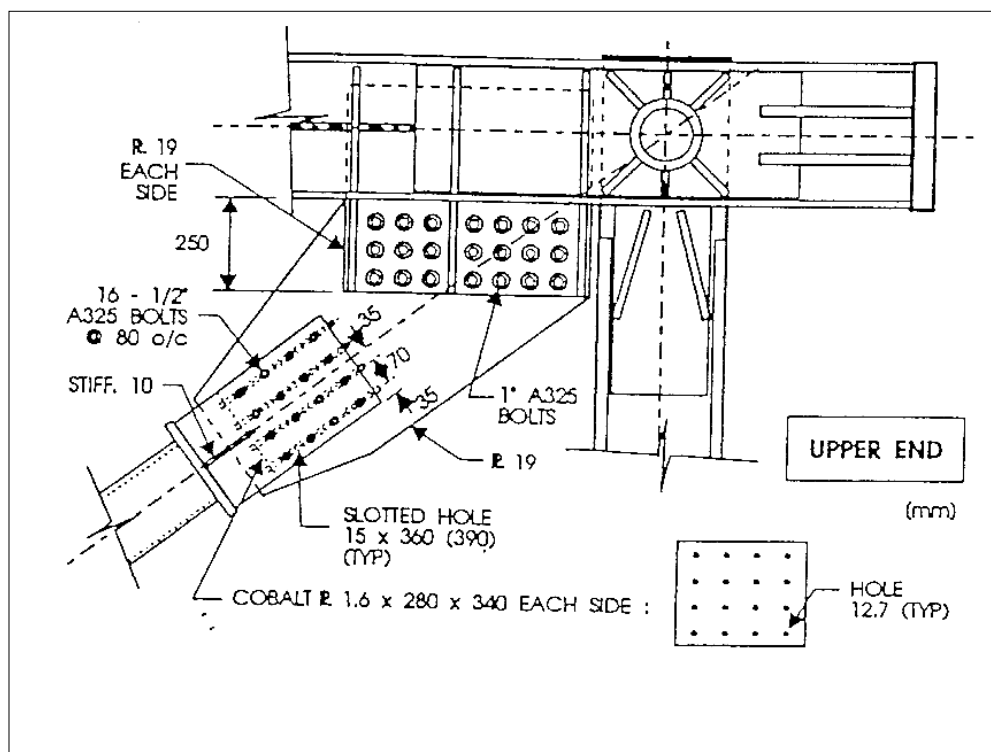


Figura 2.3.
Dispositivo utilizado por Tremblay y Steiner.

En los dispositivos confeccionados por Tremblay y Steiner (Fig. 2.3.) (29) se usaron pernos de alta resistencia y pernos A325 junto a una pila de golillas de disco pretensadas. Las placas de conexión fueron hechas de acero estructural ordinario bajo la condición de superficie limpia (*Clean Mill Scale*). Todas las piezas de acero se confeccionaron en fábricas locales sin que se hiciera ninguna prueba especial sobre sus dimensiones.-

En los dispositivos fabricados por Filiatrault y Cherry (10) se utilizaron láminas de asbesto de trabajo pesado inserto en superficies deslizantes de acero para evitar el roce entre superficies de igual naturaleza.-

CAPÍTULO 3

CARACTERIZACIÓN Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA A ANALIZAR

3.1. Descripción general.

La estructura que se estudia en la presente memoria corresponde a un edificio de 10 pisos, estructurado de acero y marco rígido (Fig. 3.1.). Este modelo, fue uno de los utilizados por Daniel Almasio (2004), para estudiar el comportamiento de los disipadores tipo ADAS. El comportamiento dinámico de esta estructura se modela utilizando el programa de computación de elementos finitos SAP 2000 en su versión no lineal, programa de análisis en tres dimensiones ampliamente usado por profesionales e investigadores. Las versiones anteriores del programa se han usado con éxito durante más de 25 años. La versión actual del programa incluye herramientas para modelar diferentes dispositivos, incluyendo disipadores de energía y aisladores de base.-

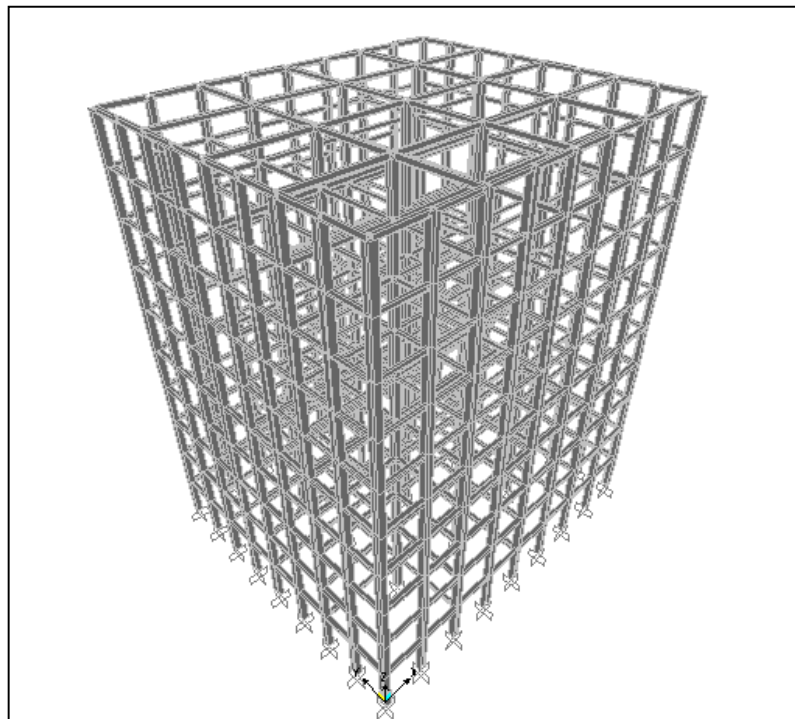


Figura 3.1.
Modelo computacional de la estructura a analizar.

En la Figura 3.2. se puede apreciar que existe una disposición de columnas perimetrales que es distinta a la interna. La distancia entre las columnas externas de la estructura es de 3,5 [m] en la dirección X, abarcando una distancia total de 28 [m], y de 3 [m] en la dirección Y, abarcando un total de 24 [m]. Las columnas del interior de la estructura están separadas por una distancia de 7[m] en la dirección X, y de 6[m] en la dirección Y.-

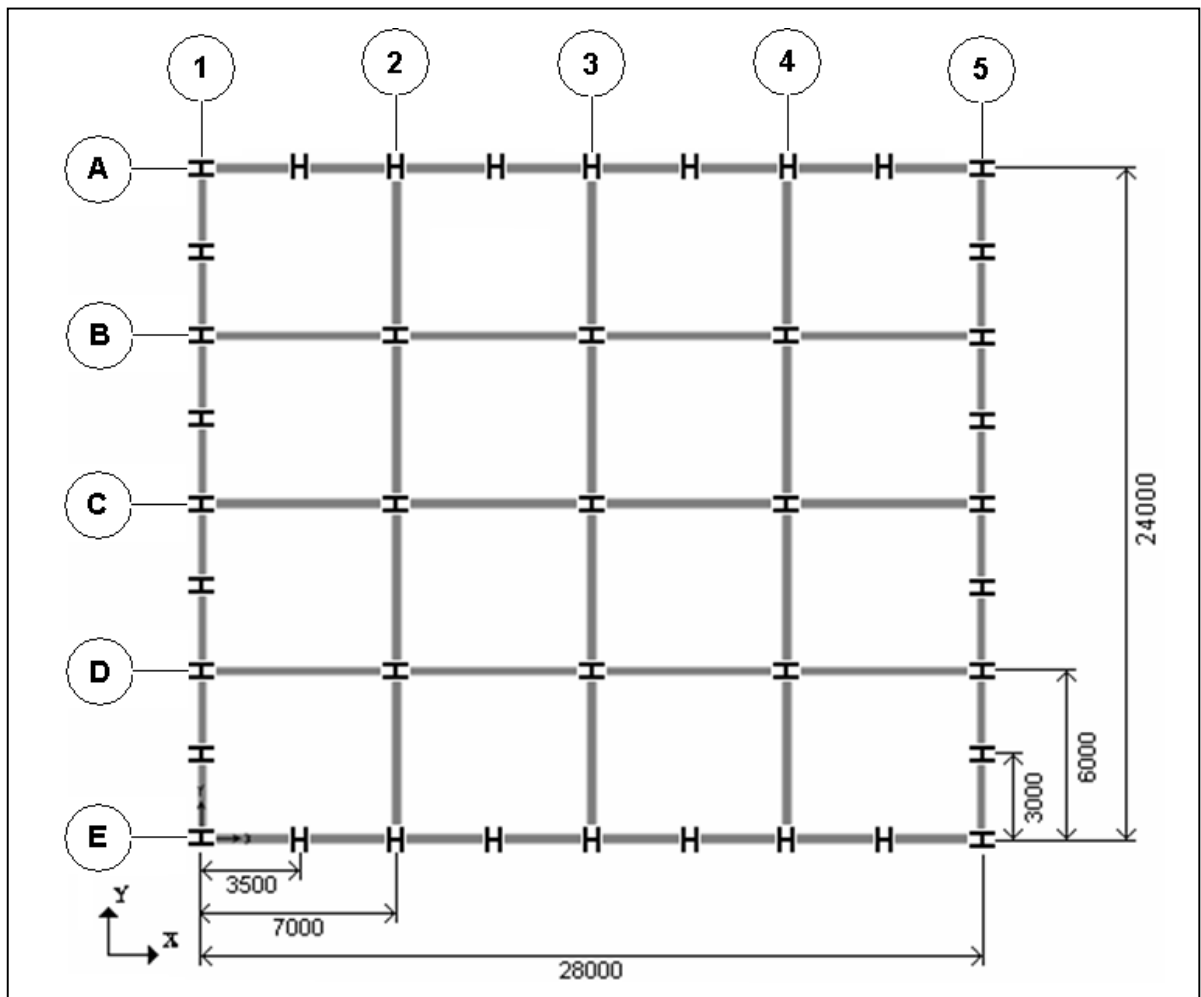


Figura 3.2.
Planta típica de la estructura.

Una elevación interna de la estructura (Fig. 3.3.) muestra que la altura de piso constante en la edificación es de 3,5 [m], abarcando una altura total de 35 [m] de altura en total.-

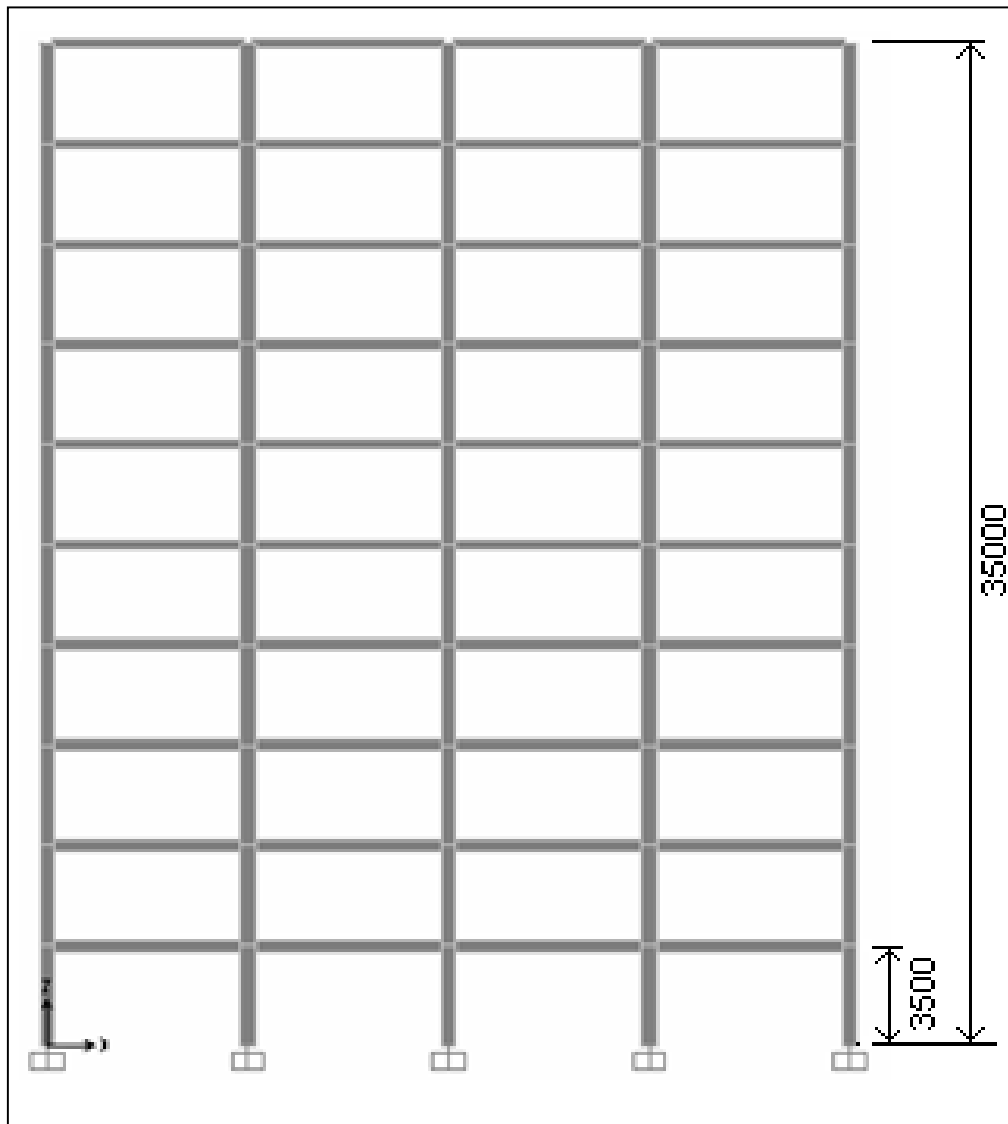


Figura 3.3.
Elevación típica de un eje interno.

3.2. Normas utilizadas en el diseño de la estructura base.

Las normas en las que se basa este estudio son básicamente las normas para diseño antisísmico desarrolladas en Chile por el Instituto Nacional de Normalización, a saber la NCh. 433 Of.96 “Diseño sísmico de edificios” (19) y la NCh. 2369 Of.2002 “Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales” (18). Para el diseño y verificación estructural de los edificios se recurrió a las disposiciones de la norma del AISC (*American Institute of Steel Construction Inc.*), a saber, la LRFD “*Load and Resistance Factor Design Specification*” (2). Para la estimación de las cargas permanentes y sobrecargas de uso se recurrió a la norma NCh 1537 Of.86 “Cargas permanentes y sobrecargas de uso” (20).-

3.3. Materiales considerados para el diseño.

Los materiales con los que está estructurado el edificio son acero tipo A36 con las siguientes características:

$$E = 21 \cdot 10^6 \text{ Ton} / m^2$$

$$G = 8,4 \cdot 10^6 \text{ Ton} / m^2$$

$$F_y = 2,531 \text{ Ton} / cm^2$$

$$F_u = 4,078 \text{ Ton} / cm^2$$

$$F_{ye} = R_y \cdot F_y = 1,3 \cdot 2,531 = 3,290 \text{ Ton} / cm^2$$

$$F_{ue} = R_t \cdot F_u = 1,2 \cdot 4,078 = 4,894 \text{ Ton} / cm^2$$

Donde:

- E = Módulo de elasticidad del acero.
- G = Módulo de cizalle.
- F_y = Tensión de fluencia mínima del acero.
- F_u = Esfuerzo último mínimo.
- F_{ye} = Tensión de fluencia efectiva.
- F_{ue} = Esfuerzo último efectivo.

Los coeficientes R_y y R_t son los que se determinan en la Tabla I-6-1 de la *Seismic provisions for structural steel buildings* (3).-

3.4. Cubicación de las cargas de diseño.

Elementos	Carga	Producto	Peso total por piso (Ton)
Losa	200Kg./m ²	0,2x24x28	134,4
Sobre Losa	100Kg./m ²	0,1x24x28	67,2
Cielo falso	25Kg./m ²	0,025x24x28	16,8
Fachada	500Kg./ml	0,5x104	52
Tabiques	75Kg./m ²	0,075x24x28	50,4
Sobrecarga sísmica	65Kg./m ²	0,065x24x28	43,7
	Total peso		364,5

Tabla 3.1.
Cubicaciones de carga por piso.

El valor de la sobrecarga sísmica proviene de la indicación de la norma NCh. 433 Of.96 (19), la cual nos dice que para el cálculo de las masas se deben considerar las cargas permanentes (Losas, Sobre losas, Cielos falsos, Fachadas, Tabiquería, Estructuras de acero, etc), más un porcentaje de la sobrecarga de uso, digamos 25%, es decir, Sobrecarga sísmica = 0,25 * SC (Sobrecarga de uso).-

Sobrecarga sísmica = 0,25 * 250 ≈ 65 Kg./m², donde 250 Kg./m² es la sobrecarga mínima para pisos de habitación.-

3.5. Distribución de las cargas de diseño en las vigas de la estructura.

Estos valores fueron calculados y repartidos utilizando las tablas de CZERNY para descargas en losas, considerando los distintos tipos de apoyos existentes en el edificio. Estas tablas reparten las cargas que le llegan a la losa dependiendo de las longitudes de éstas y el tipo de apoyo en que se encuentren. Los valores entregados a continuación corresponden a valores en toneladas aproximados para cada uno de los estados de carga.-

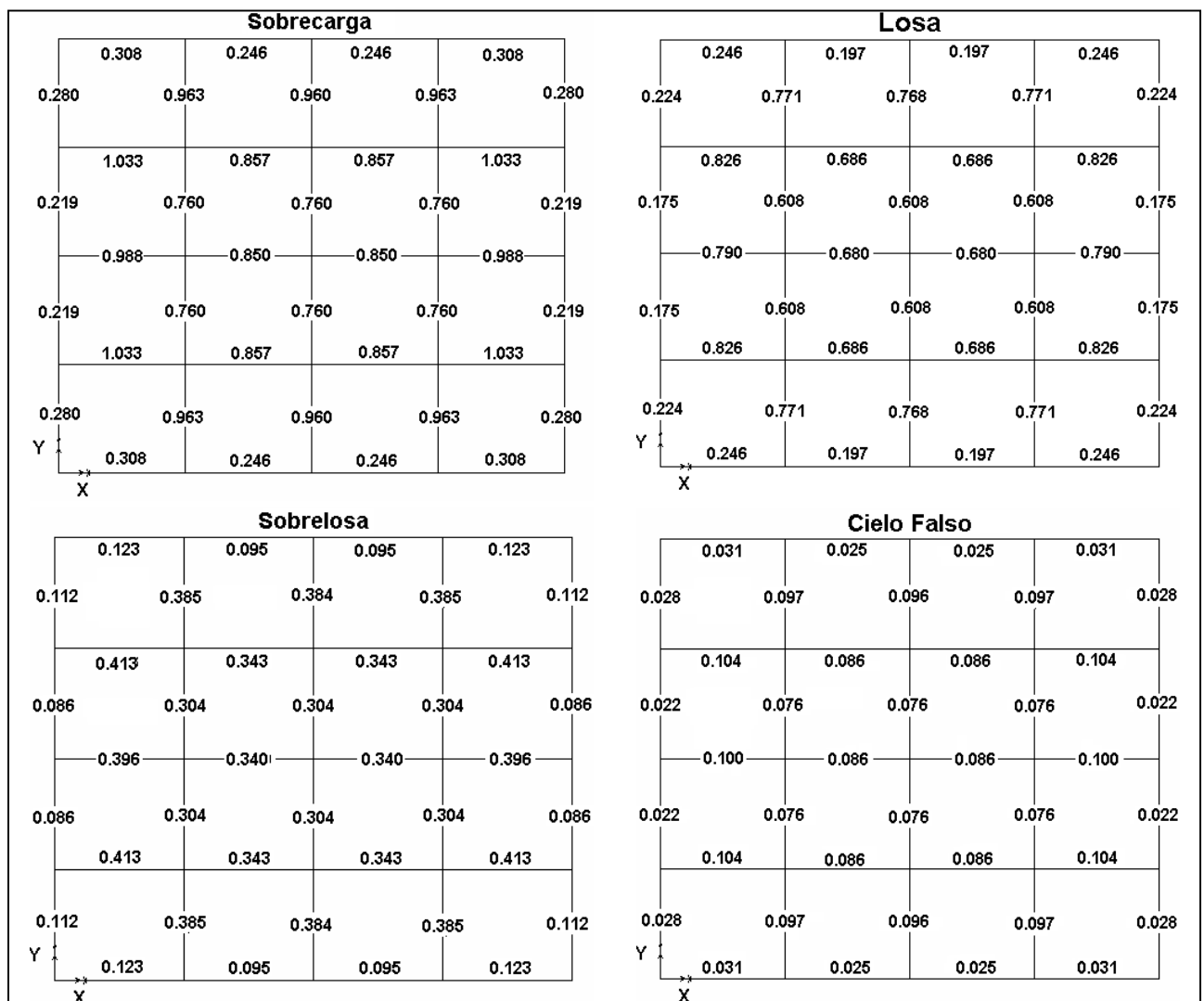


Figura 3.4.
Distribución de cargas N° 1.

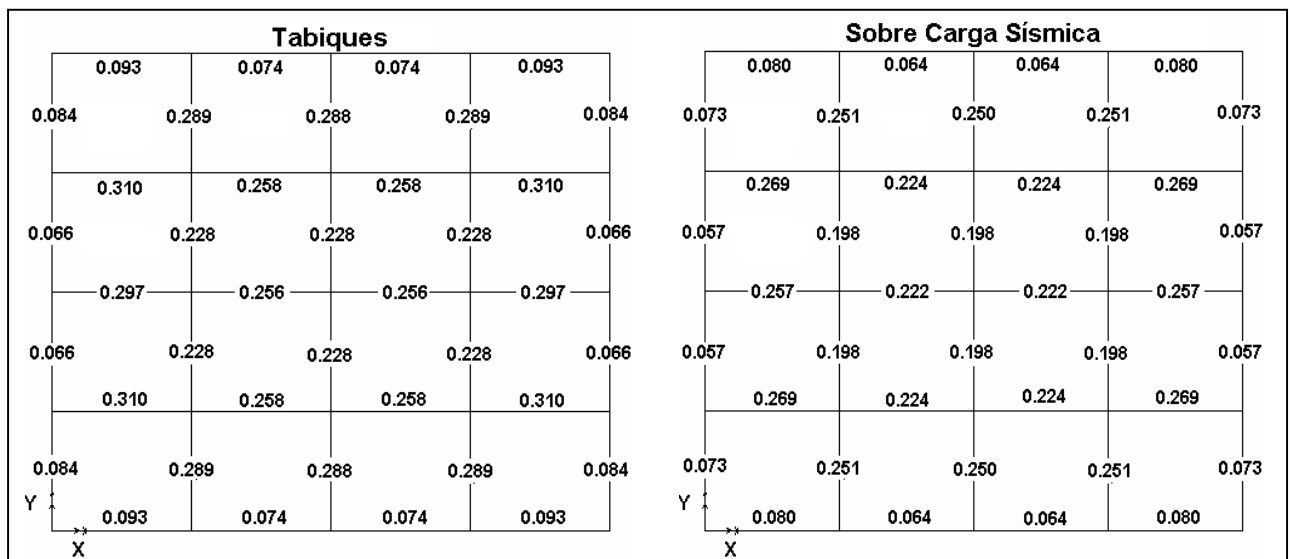


Figura 3.5.
Distribución de cargas N° 2.

3.6. Propiedades de piso.

Propiedades	Piso 1 → N
$A \text{ (m}^2\text{)}$	672
$X_G \text{ (m)}$	14.0
$Y_G \text{ (m)}$	12.0
$I_x \text{ (m}^4\text{)}$	32256
$I_y \text{ (m}^4\text{)}$	43904

Tabla 3.2.
Propiedades de piso.

De lo anterior se obtiene lo siguiente:

$$M = \frac{\text{Peso}}{g} = \frac{364,5}{9,8} = 37,19(\text{Ton} / g) \quad (3.1)$$

$$I_p = (I_x + I_y) \frac{M}{A} = 4793(\text{Tm}^2 / g) \quad (3.2)$$

Donde: M = Masa de cada piso (sin estructura metálica).

I_p = Inercia polar de cada piso.

A = Área en planta de cada piso.

X_G = Coordenada X del centro de gravedad de cada piso.

Y_G = Coordenada Y del centro de gravedad de cada piso.

I_x = Inercia en el eje x-x del piso.

I_y = Inercia en el eje y-y del piso.

Para el cálculo de las masas sísmicas se consideró las cargas permanentes más un porcentaje de la sobrecarga de uso, este porcentaje fue de un 25%, puesto que se trata de construcciones destinadas a la habitación privada (19). Las propiedades anteriores se asignaron en los centros de gravedad de cada piso.-

3.7. Combinaciones de carga según LRFD.

Las combinaciones de carga que se utilizaron para el análisis son las que vemos a continuación según la LRFD (2).-

1. 1,4 DL
2. 1,2 DL + 1,6 LL
3. 1,2 DL + LL ± EX
4. 1,2 DL + LL ± EY
5. 0,9 DL ± EX
6. 0,9 DL ± EY

Donde: DL = *Dead Loads* (Cargas muertas).
LL = *Live Loads* (Cargas vivas).
EX , EY = *Earthquake* (Terremotos en las direcciones X e Y de análisis).

Las estructuras fueron analizadas para acciones sísmicas independientes según cada una de las dos direcciones horizontales perpendiculares de análisis, a saber X e Y.-

3.8. Consideraciones para el diseño sísmico de edificios según la norma NCh.433 Of. 96.

3.8.1. Espectro de respuesta.

De acuerdo al análisis modal espectral detallado en el punto 6.3 de la NCh 433 Of. 96 (19) se generó el espectro de respuesta.-

El espectro de diseño que da la resistencia sísmica mínima de la estructura está definido por:

$$S_a = \frac{I \cdot A_0 \cdot \alpha}{R^*} \quad (3.3)$$

S_a = aceleración espectral de diseño.

I = coeficiente relativo a la importancia, uso y riesgo de falla del edificio.

A_0 = aceleración efectiva máxima del suelo.

α = factor de amplificación de la aceleración efectiva máxima.

R^* = factor de reducción de la aceleración espectral, calculado para el período del modo con mayor masa traslacional equivalente en la dirección de análisis.

Donde el factor de amplificación α se determina para cada modo de vibrar n , de acuerdo a la expresión:

$$\alpha = \frac{1 + 4,5 \left(\frac{T_n}{T_0} \right)^p}{1 + \left(\frac{T_n}{T_0} \right)^3} \quad (3.4)$$

T_n = período de vibración del modo n .

T_0 =parámetro que depende del tipo de suelo.

p = parámetro que depende del tipo de suelo.

El factor de reducción R^* se determina de:

$$R^* = 1 + \frac{T^*}{0,10 T_0 + \frac{T^*}{R_0}} \quad (3.5)$$

T^* = período del modo con mayor masa traslacional en la dirección de análisis.

R_0 = factor de modificación de la respuesta estructural (análisis modal espectral).

Los valores de todos los parámetros anteriores se obtienen de las Tablas 4.1., 4.2., 5.1., 6.1., 6.2., 6.3., 6.4. de la norma NCH 433 Of. 96 (19).-

Los valores que se utilizaron para la confección del espectro de diseño se presentan en la siguiente tabla:

Tipo de suelo	III
Zona sísmica	3
Categoría de edificio	C
S	1,2
T_0 (seg)	0,75
T (seg)	0,85
N	1,8
P	1,0
R	7
R_0	11
A_0	0,40 g

Tabla 3.3.
Valores usados en el espectro de diseño.

- S: parámetro que depende del tipo de suelo
- N: parámetro que depende del tipo de suelo; índice asociado al modo de vibración.
- R: factor de la modificación de la respuesta estructural (análisis estático).
- T : parámetro que depende del tipo de suelo.

3.8.2. Deformaciones sísmicas.

Los desplazamientos relativos entre pisos consecutivos se comparan con el desplazamiento máximo entre dos pisos consecutivos, medido en el centro de masas en cada una de las direcciones de análisis, el cual no debe ser mayor que la altura de entrepiso multiplicada por 0,002 (19), es decir:

$$\frac{\Delta}{L} \leq \frac{1}{500} \quad (3.6)$$

Donde Δ = desplazamiento relativo entre dos pisos consecutivos.

L = altura de entrepisos.

3.8.3. Limitaciones del corte basal.

La norma NCh 433 Of.96 (19) establece que si la componente del esfuerzo de corte basal en la dirección de la acción sísmica resulta menor que $IA_0P/6$, los desplazamientos y rotaciones de los diafragmas horizontales y las sollicitaciones de los elementos estructurales deben multiplicarse por un factor de manera que dicho esfuerzo de corte alcance el valor señalado, como mínimo.-

$$Q_{MIN} = IA_0P/6 \quad (3.7)$$

$$Q_{MAX} = IC_{MAX}P \quad (3.8)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Si } Q < Q_{MIN} & \text{FC} = Q_{MIN} / Q \\ \text{Si } Q_{MIN} < Q < Q_{MAX} & \text{FC} = 1 \\ \text{Si } Q_{MAX} < Q & \text{FC} = Q_{MAX} / Q \end{array}$$

Donde: Q = corte basal en la dirección de análisis, según el método CQC..

Q_{MAX} = corte máximo

Q_{MIN} = corte mínimo.

FC = factor de corrección.

P = peso del edificio.

Por lo anteriormente expuesto se deberá evaluar el rango en el que se ubica el corte basal de la estructura (edificio), lo cual afecta los resultados que se expondrán a continuación en este capítulo.-

3.9. Diseño básico.

3.9.1. Disposiciones y consideraciones previas al diseño básico de la estructura.

Se consideran 6 grados de libertad en el programa de SAP 2000, tres de traslación y tres de rotación (Fig. 3.6.).-

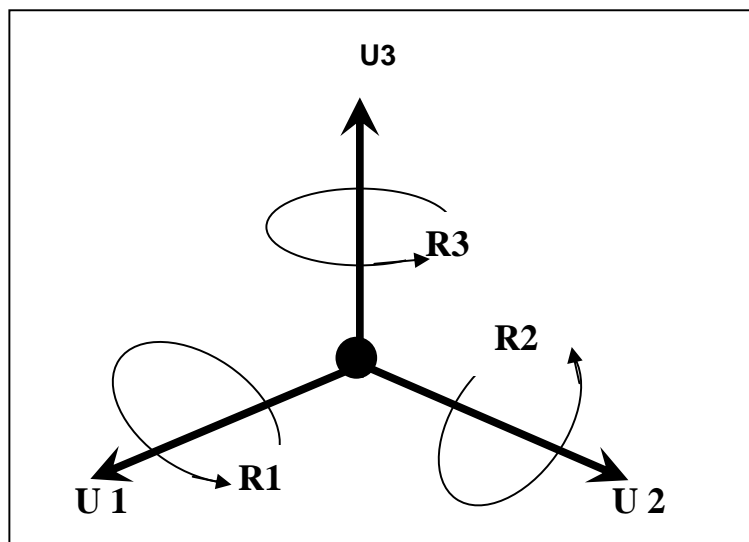


Figura 3.6.
Grados de libertad.

Se implementó el uso de diafragmas rígidos en cada una de las plantas de pisos de las estructuras, de modo que se cumpla con compatibilidad de deformaciones horizontales. Las fundaciones del edificio, para efectos de análisis, se consideraron como empotramientos perfectos, es decir, se quitaron o eliminaron los grados de libertad de traslación y de giro a las columnas. Los segmentos rígidos que se utilizaron fueron de dos tipos, de tipo columna y de tipo viga. Los del primer tipo se consideraron

en la parte superior de todas las columnas del edificio, con una longitud de 0,30 metros. A su vez, los segmentos rígidos de la segunda clase se ubicaron en ambos extremos de todas las vigas, con una longitud de 0,15 metros en sus extremos.-

La estructuración se realizó de modo de maximizar el uso de los materiales y de éste modo lograr un diseño que resista bien los movimientos sísmicos. Esto se logra con la correcta disposición de los perfiles IN y HN de las columnas y vigas con el objetivo de enfrentar los costados con mayores inercias a las mayores solicitaciones.-

3.9.2. Desarrollo y resultado del diseño.

En primer lugar se procedió a calcular el espectro elástico según la norma Nch433 Of.96 ($R^* = 1$), luego se obtuvieron los valores de las aceleraciones espectrales calculadas para el modo con mayor masa traslacional equivalente en la dirección de análisis, para cada dirección de análisis. Con lo anterior se calculó el espectro de diseño definitivo (al dividir el espectro anterior por el correspondiente R^*) obteniéndose finalmente la respuesta real de las estructuras. Luego, aplicando las disposiciones y verificaciones de diseño de la norma Nch 433 Of.96 y de la norma LRFD para diseño de estructuras de acero, se obtuvo la configuración final de diseño de la estructura. El diseño según las normas anteriormente nombradas, arrojó la siguiente configuración para la estructura:

- Las vigas de los niveles 1 – 5 están estructuradas en perfiles IN 40x111
- Las vigas de los niveles 6 – 10 están estructuradas en perfiles IN 35x46,9
- Las columnas de los niveles 1 – 5 están estructuradas con perfiles HN 50x380
- Las columnas de los niveles 6 – 10 están estructuradas con perfiles HN 50x336

A continuación se presentan las características de los perfiles utilizados (tanto vigas como columnas) en la estructura, esto es, área, inercias, radios de giro y módulos plásticos. En la Figura 3.7. se destacan las propiedades geométricas de estos perfiles.-

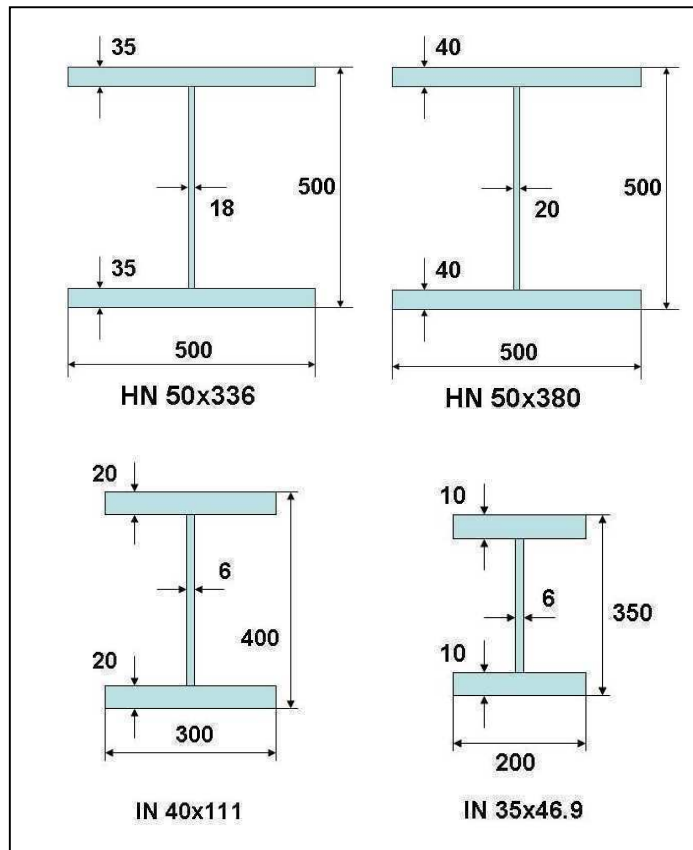


Figura 3.7.
Características geométricas de los perfiles.

Propiedad / Perfil	HN 50x380 (Pisos 1 – 5)	HN 50x336 (Pisos 6 – 10)
A [cm²]	484	427
I_y [cm⁴]	83361,3	72973,6
I_x [cm⁴]	224481	201480,2
r_x [cm]	21,5	21,7
S_x [cm³]	8979,3	8059,2
r_y [cm]	13,1	13,1
S_y [cm³]	3334,5	2917,5
Z_x [cm³]	10082	8969,6
Z_y [cm³]	5042	4409,8

Tabla 3.4.
Características de las columnas escogidas.

Propiedad / Perfil	IN 40x111 (Pisos 1 – 5)	IN 35x46,9 (Pisos 6 – 10)
A [cm²]	141,6	59,8
I_y [cm⁴]	9000	1333,9
I_x [cm⁴]	45692,8	13360,2
r_x [cm]	17,96	14,9
S_x [cm³]	2284,64	763,4
r_y [cm]	7,97	4,7
S_y [cm³]	600	133,4
Z_x [cm³]	2474,4	843,4
Z_y [cm³]	903,2	202,9

Tabla 3.5.
Características de las vigas escogidas.

El peso de la estructura de acero por piso para los pisos 1 – 5 es de 83,41 [Ton] y para los pisos 6 – 10 el peso de la estructura de acero es de 60,34 [Ton]. La masa sísmica por piso se define como el peso total del piso dividido por la aceleración de gravedad. El peso total por piso consiste en el peso de la estructura metálica (83,41 [Ton] o 60,34 [Ton] según corresponda) más el peso por piso sin considerar la estructura metálica (364,5 [Ton], ver Tabla 3.1.). Lo anterior se traduce de la siguiente manera:

$$M_{1-5} = 83,41 + 364,5 = \frac{447,91}{g} = 45,66 [Ton] \Rightarrow I_{P(1-5)} = 5174,65 [Ton \cdot m^2/g]$$

$$M_{6-10} = 60,34 + 364,5 = \frac{424,84}{g} = 43,31 [Ton] \Rightarrow I_{P(6-10)} = 4908,15 [Ton \cdot m^2/g]$$

$$P_{edificio} = 364,5 \cdot 10 + 5 \cdot (83,41 + 60,34) = 4363,75 [Ton]$$

Los períodos con mayor masa traslacional en las direcciones X e Y respectivamente resultaron:

$$T_X^* = 1,398 [seg] \rightarrow R_X^* = 7,918$$

$$T_Y^* = 1,316 [seg] \rightarrow R_Y^* = 7,761$$

Con estos valores reales se recalcularon los espectros de diseño de la norma NCh 433 Of.96 (19), y luego de aplicarlos a la estructura, se verificaron las consideraciones básicas de deformaciones sísmicas y límites del corte basal, expuestas anteriormente. Además de esto, se procedió a verificar los factores de utilización para los elementos estructurales componentes de la edificación.-

En las Figura 3.8. se presentan los espectros que se utilizaron para la verificación del diseño del edificio de 10 pisos.-

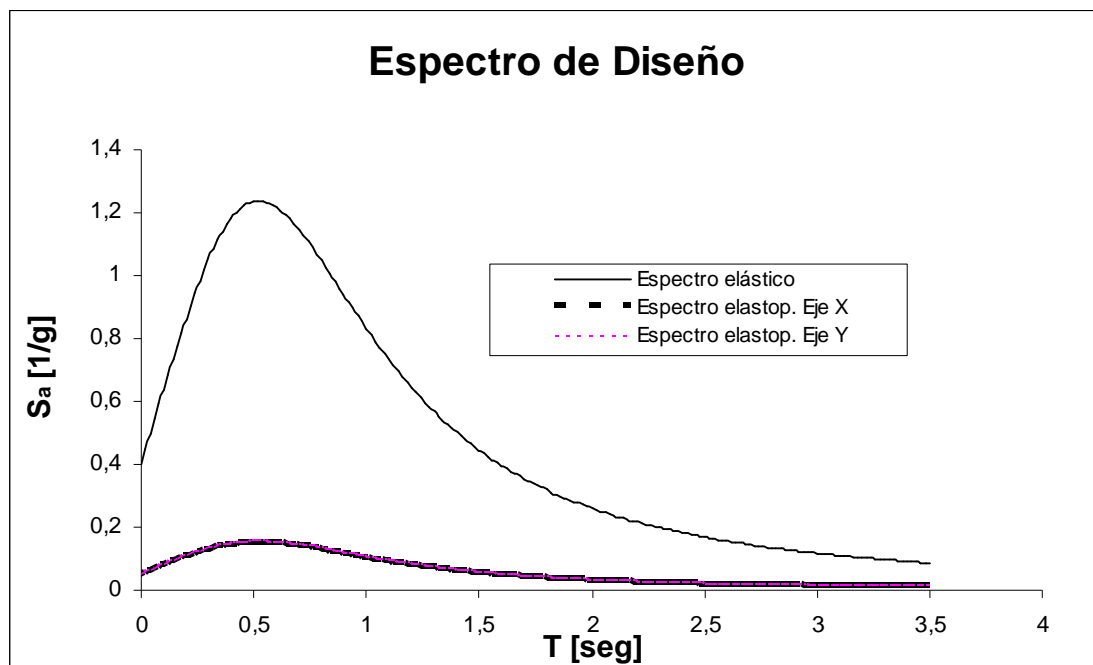


Figura 3.8.
Espectros de diseño.

3.10. Resultados de la aplicación del espectro de la norma NCh 433 Of.96 en la estructura.

3.10.1. Participaciones modales según dirección de análisis.

Modo	Período	% masas modales UX	% masas modales UY	Acumulado UX	Acumulado UY
1	1,397466	0,727	0,000	0,727	0,000
2	1,316358	0,000	0,728	0,727	0,728
3	0,900252	0,000	0,000	0,727	0,728
4	0,510592	0,155	0,000	0,882	0,728
5	0,472575	0,000	0,153	0,882	0,881
6	0,328205	0,000	0,000	0,882	0,881
7	0,262084	0,044	0,000	0,926	0,881
8	0,240115	0,000	0,045	0,926	0,926
9	0,169617	0,000	0,000	0,926	0,926
10	0,16703	0,031	0,000	0,957	0,926
11	0,151602	0,000	0,031	0,957	0,957
12	0,113295	0,016	0,000	0,973	0,957

Tabla 3.6.
Participaciones modales.

3.10.2. Cortes basales y factores de corrección.

Se detallan los cortes basales resultantes de la aplicación de la norma NCh433, según el método CQC, además del corte mínimo y los factores de corrección.-

Corte	Cantidad [Ton]
Qx	229,891
Qy	252,744
Qmin	290,918

Tabla 3.7.
Cortes basales.

Factor	Valor
FC1	1,266
FC2	1,151

Tabla 3.8.
Factores de corrección.

Según lo anterior, los desplazamientos y las solicitaciones de los elementos estructurales se amplificaron por el factor de corrección FC1 y FC2 según las dos direcciones de análisis.-

3.10.3. Desplazamientos relativos y absolutos.

Nivel	Dirección X		Dirección Y	
	Desplazamientos absolutos [cm]	Desplazamientos relativos [mm]	Desplazamientos absolutos [cm]	Desplazamientos relativos [mm]
10	5,513	4,190	5,001	3,836
9	5,094	5,515	4,617	4,948
8	4,542	6,665	4,123	5,953
7	3,876	7,133	3,527	6,412
6	3,162	6,330	2,886	5,840
5	2,529	5,373	2,302	5,077
4	1,992	5,554	1,794	5,160
3	1,437	5,789	1,278	5,259
2	0,858	5,445	0,752	4,816
1	0,313	2,474	0,271	2,474

Tabla 3.9.
Desplazamientos relativos y absolutos.

Los desplazamientos absolutos y relativos anteriores están amplificados por los factores de corrección FC1 y FC2. La altura de entrepisos en el edificio es de 3,5 metros. Utilizando la fórmula (3.6), se tiene un desplazamiento máximo permitido entre pisos de 7 [mm]. Observando la Tabla 3.9. se observa que se está cumpliendo con el requerimiento de deformaciones sísmicas en ambas direcciones de análisis salvo en el caso del nivel 7, pero como el máximo es superado por un valor tan pequeño en este nivel, se considera que el diseño cumple con el requerimiento.-

3.10.4. Factores de utilización.

En las Tablas 3.10. y 3.11. se entregan los factores de utilización de los elementos más solicitados tanto en la dirección X como en la Y.-

TABLE: Steel Design 1 - Summary Data						
Frame	DesignSect	DesignType	Ratio	RatioType	Combo	Location
289	IN35X46.9	Beam	0,928	PMM	UDSTL3	0,15
290	IN35X46.9	Beam	0,756	PMM	UDSTL3	6,85
291	IN35X46.9	Beam	0,756	PMM	UDSTL3	0,15
292	IN35X46.9	Beam	0,928	PMM	UDSTL3	6,85
345	IN35X46.9	Beam	0,944	PMM	UDSTL3	0,15
346	IN35X46.9	Beam	0,764	PMM	UDSTL3	6,85
347	IN35X46.9	Beam	0,764	PMM	UDSTL3	0,15
348	IN35X46.9	Beam	0,944	PMM	UDSTL3	6,85
401	IN35X46.9	Beam	0,930	PMM	UDSTL3	0,15
402	IN35X46.9	Beam	0,747	PMM	UDSTL3	6,85
403	IN35X46.9	Beam	0,747	PMM	UDSTL3	0,15
404	IN35X46.9	Beam	0,930	PMM	UDSTL3	6,85
457	IN35X46.9	Beam	0,909	PMM	UDSTL2	0,15
458	IN35X46.9	Beam	0,716	PMM	UDSTL3	6,85
459	IN35X46.9	Beam	0,716	PMM	UDSTL3	0,15
460	IN35X46.9	Beam	0,909	PMM	UDSTL2	6,85
513	IN35X46.9	Beam	0,862	PMM	UDSTL2	0,15
514	IN35X46.9	Beam	0,676	PMM	UDSTL2	6,85
515	IN35X46.9	Beam	0,676	PMM	UDSTL2	0,15
516	IN35X46.9	Beam	0,862	PMM	UDSTL2	6,85

Tabla 3.10.
Factores de utilización elementos más solicitados (Dirección X).

En la Figura 3.9. se esquematiza la ubicación de los elementos más solicitados en el eje X, indicando en la parte superior de las vigas su factor de utilización y en la parte inferior el número de identificación del elemento en cuestión.-

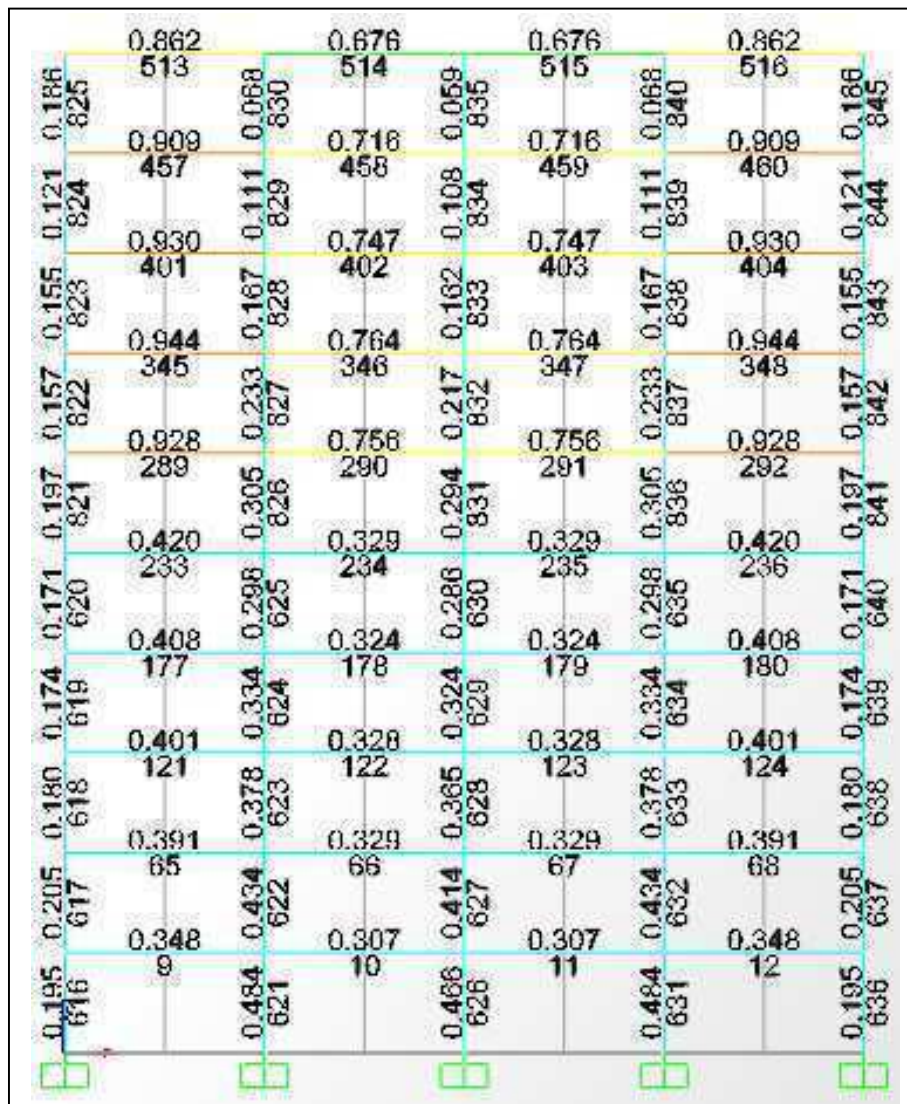


Figura 3.9.

Ubicación de los elementos más solicitados en la dirección X (eje D).

TABLE: Steel Design 1 - Summary Data						
Frame	DesignSect	DesignType	Ratio	RatioType	Combo	Location
317	IN35X46.9	Beam	0,761	PMM	UDSTL4	0,15
318	IN35X46.9	Beam	0,582	PMM	UDSTL4	5,85
319	IN35X46.9	Beam	0,582	PMM	UDSTL4	0,15
320	IN35X46.9	Beam	0,761	PMM	UDSTL4	5,85
373	IN35X46.9	Beam	0,777	PMM	UDSTL4	0,15
374	IN35X46.9	Beam	0,591	PMM	UDSTL4	5,85
375	IN35X46.9	Beam	0,591	PMM	UDSTL4	0,15
376	IN35X46.9	Beam	0,777	PMM	UDSTL4	5,85
429	IN35X46.9	Beam	0,763	PMM	UDSTL4	0,15
430	IN35X46.9	Beam	0,571	PMM	UDSTL4	5,85
431	IN35X46.9	Beam	0,571	PMM	UDSTL4	0,15
432	IN35X46.9	Beam	0,763	PMM	UDSTL4	5,85
485	IN35X46.9	Beam	0,740	PMM	UDSTL4	0,15
486	IN35X46.9	Beam	0,535	PMM	UDSTL4	5,85
487	IN35X46.9	Beam	0,535	PMM	UDSTL4	0,15
488	IN35X46.9	Beam	0,740	PMM	UDSTL4	5,85
541	IN35X46.9	Beam	0,673	PMM	UDSTL4	0,15
542	IN35X46.9	Beam	0,500	PMM	UDSTL4	5,85
543	IN35X46.9	Beam	0,500	PMM	UDSTL4	0,15
544	IN35X46.9	Beam	0,673	PMM	UDSTL4	5,85

Tabla 3.11.
Factores de utilización elementos más solicitados (Dirección Y).

En la Figura 3.10. se esquematiza la ubicación de los elementos más solicitados en el eje Y, indicando en la parte superior de las vigas su factor de utilización y en la parte inferior el número de identificación del elemento en cuestión.-

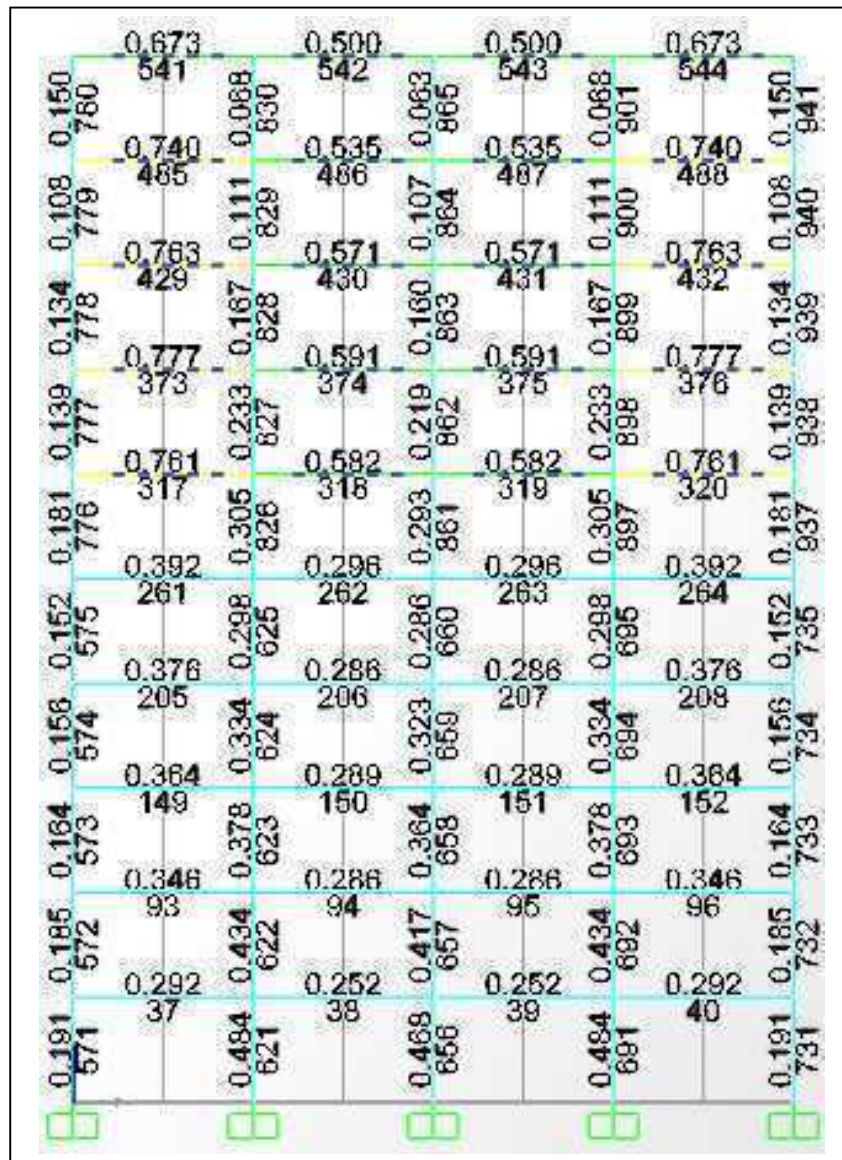


Figura 3.10.

Ubicación de los elementos más solicitados en la dirección Y (eje 2).

CAPÍTULO 4

ELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SISMOS DE DISEÑO

4.1. Criterios usados para la elección de los registros de diseño.

Para el análisis dinámico de la estructura mediante el procedimiento no lineal de respuesta en el tiempo, es necesario realizar una adecuada elección de las excitaciones sísmicas a considerar. Estas excitaciones deben ser características de la zona donde se va a emplazar la estructura, para poder realizar así un análisis y diseño que corresponda a las condiciones locales. Como generalmente no es posible obtener múltiples registros de un mismo lugar, en este estudio se consideró apropiada la realización del análisis y diseño con excitaciones que aunque no pertenezcan al mismo terreno, tengan características que nos permitan considerarlas como de una misma zona. Las características que se tomaron en cuenta para la elección de los registros de diseño se indican a continuación:

- ***Número de registros sísmicos:***

El proyecto de norma en estudio ofrece dos alternativas a la hora de considerar la cantidad de registros a tomar en cuenta para el procedimiento no lineal de respuesta en el tiempo. Si se consideran al menos 7 registros sísmicos para el análisis, los valores de diseño correspondientes a las fuerzas, desplazamientos y velocidades podrán considerarse iguales al promedio de los valores correspondientes a cada registro sísmico. Si se consideran menos de 7 registros sísmicos, los valores de diseño correspondientes a las fuerzas, desplazamientos y velocidades deberán ser iguales al máximo valor obtenido en los análisis y como mínimo deberán considerarse tres registros sísmicos.-

- ***Sismogénesis:***

Además de tener presente la consideración anterior, es muy necesario efectuar una adecuada elección de registros sísmicos en relación al proceso de origen de ellos. Existen diversos mecanismos tectónicos que dan origen a los sismos, y estos mecanismos están bien delimitados de acuerdo a las regiones en las cuales se

producen. Debido a esto es necesario que los registros escogidos sean característicos de los procesos tectónicos que se presentan en la zona en que se desee edificar la estructura, ya que considerar registros que correspondan a una sismogénesis distinta a la característica de la zona, puede provocar un análisis y diseño que no sean apropiados para resistir los sismos que se generen en el sector de emplazamiento de la estructura.-

- ***Cercanía de la falla:***

Otro punto de gran importancia a la hora de elegir los registros, es la cercanía de la falla. Las ondas del sismo disminuyen en intensidad mientras viajan por la tierra, por eso el temblor es menos intenso mientras más lejos se esté de la falla. Debido esto último, es necesario que los registros seleccionados tengan como característica una misma distancia a la falla, para que no exista entre ellos diferencias que tengan que ver con disminuciones de amplitud por recorrido de ondas y sean característicos de una misma zona.-

- ***Características físicas del terreno:***

Las condiciones locales del terreno también es otro factor a considerar para realizar una buena selección de registros. Ciertos tipos de terreno amplifican grandemente el movimiento durante el sismo. Pasando de roca a tierra, las ondas sísmicas reducen su velocidad pero se hacen más grandes. Así que, una tierra suelta y suave puede tener movimientos más severos que la roca dura, estando a la misma distancia del mismo terremoto. Un ejemplo de este tipo de amplificación fue en el distrito de la Marina de San Francisco durante el terremoto de Loma Prieta en 1989. Ese sismo ocurrió a 100 kilómetros de San Francisco, y casi toda el área de la Bahía escapó de daños serios. Sin embargo, algunos sitios en el área de la Bahía, en vertederos de basura o suelos blandos, experimentaron un movimiento significativo. El movimiento del suelo en estos sitios fue más de 10 veces mayor que en sitios cercanos que están sobre roca. Debido a esto, es significativo que los registros tengan como factor común que hayan sido tomados en lugares que tengan las mismas características geológicas, geográficas y topográficas del lugar de erección de la estructura.-

4.2. Elección y caracterización de los registros.

Teniendo presente las consideraciones anteriormente expuestas, se eligieron los registros para poder realizar el análisis no lineal de respuesta en el tiempo.-

Debido a que nuestro país se encuentra en una zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, se escogieron registros tomados del sismo ocurrido en Chile el 3 de marzo de 1985, ya que este sismo corresponde por sismogénesis, a la mayoría de los movimientos telúricos que ocurren dentro de nuestro país. Este terremoto fue registrado por una red de acelerógrafos dispuestos en la zona central de Chile. De estos registros se escogieron los de Lolleo y Viña del Mar por cumplir de mejor manera las condiciones expuestas en el capítulo anterior. Además de estos dos registros, se incluyó un registro artificial confeccionado a partir del registro de Viña del Mar.-

La elección particular de estos registros del terremoto del 3 de marzo en Chile, se realizó debido a que cumplen de mejor forma los requerimientos que están estipulados en el punto 4.1. de este capítulo. Además, ellos fueron tomados anteriormente como terna para realizar análisis no lineales para evaluar otros dispositivos antisísmicos (4), donde se mostró que la elección fue adecuada. La aplicación de una misma terna de registros tiene la ventaja de que permitirá comparar la eficacia de distintos tipos de estrategias antisísmicas a utilizar en Chile.-

Los registros de diseño elegidos son los siguientes:

1. Registro de Viña del Mar : fue escogido por su baja frecuencia (6 y 25), además del tipo de suelo y la cercanía con la falla (Fig. 4.2. y 4.3.)-.
2. Registro de Llolleo : fue elegido por su potencial destructivo y magnitud de aceleraciones (6 y 25) (Fig. 4.4. y 4.5.)-.
3. Registro Artificial (sismo sintético en base al registro de Viña del Mar): este registro fue generado para fines de investigación por el profesor Juan Carlos de la LLera, de la Universidad Católica de Chile (Fig. 4.6. y 4.7.)-.

En la Figura 4.1. se pueden observar los distintos espectros de respuesta generados por los sismos, además del establecido por la norma Nch433 para las condiciones establecidas. Se nota claramente que el espectro de respuesta generado por el registro artificial es el más cercano al de la norma.-

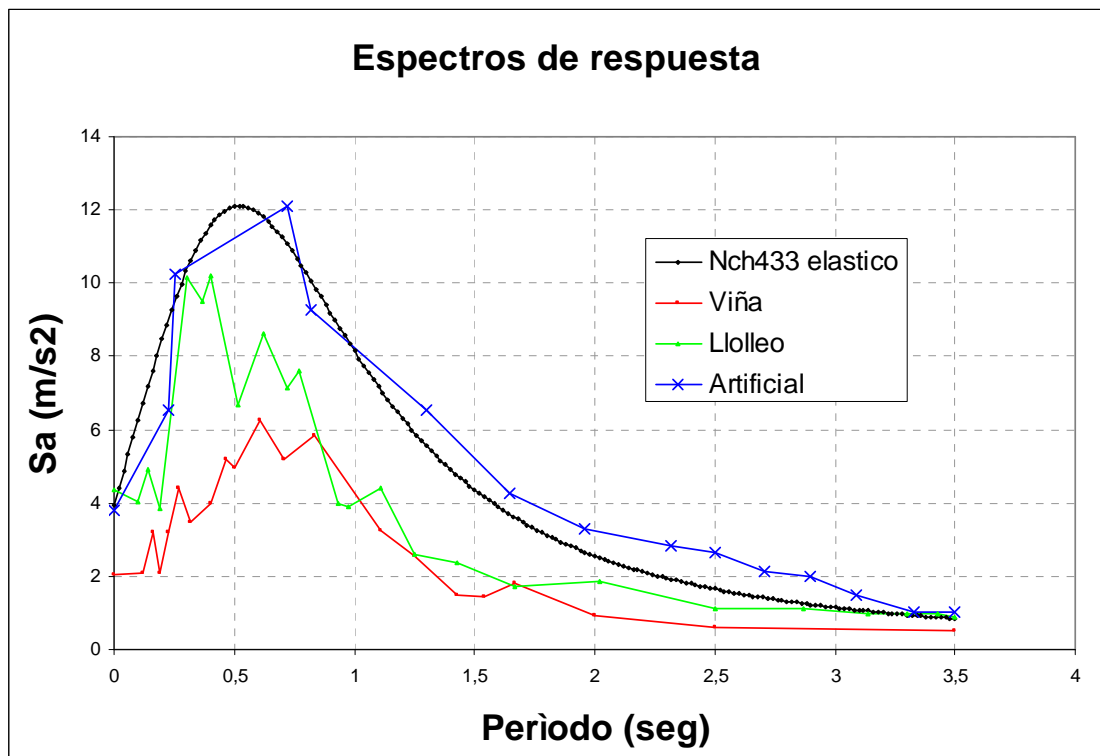


Figura 4.1.
Comparación de espectros.

4.2.1. Registro de Viña del Mar.

Eje X: *Viña del Mar X*

VINA DEL MAR, 200 DEGREES

BUTTERWORTH AT ,167 HZ, ORDER 4

YEAR=1985 JULIAN DAY= 62 HOUR=22 MINUTE=47 SECOND= 7

SAMPLES/SEC=200 FILTER TYPE=BUTTERWORTH CORNER= 0,17

ORDER=4 DATA TYPE=AC

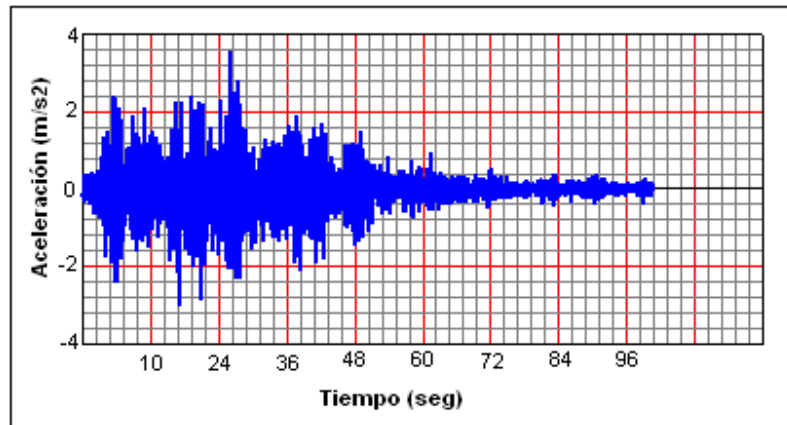


Figura 4.2.

Registro de Viña del Mar X.

Eje Y: *Viña del Mar Y*

VINA DEL MAR, 290 DEGREES

BUTTERWORTH AT ,167 HZ, ORDER 4

YEAR=1985 JULIAN DAY= 62 HOUR=22 MINUTE=47 SECOND= 7

SAMPLES/SEC=200 FILTER TYPE=BUTTERWORTH CORNER= 0,17

ORDER=4 DATA TYPE=AC

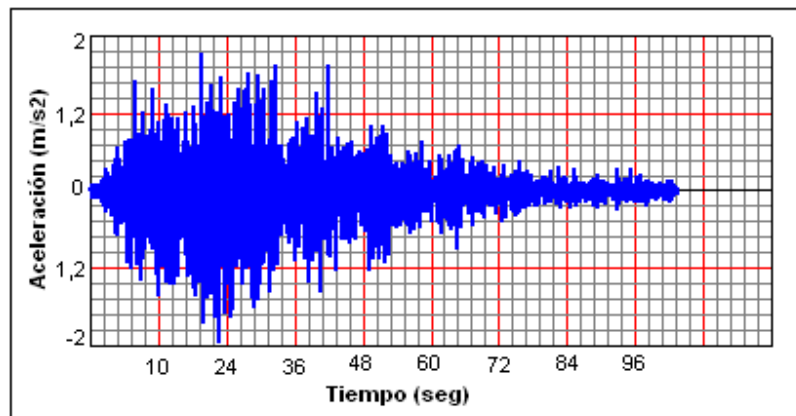


Figura 4.3.

Registro de Viña del Mar Y.

4.2.2. Registro de Lolloe.

Eje X: **Lolloe X**

LLOLLEO, 010 DEGREES

BUTTERWORTH AT ,167 HZ, ORDER 4

YEAR=1985 JULIAN DAY= 62 HOUR=22 MINUTE=47 SECOND= 7

SAMPLES/SEC=200 FILTER TYPE=BUTTERWORTH CORNER= 0,17

ORDER=4 DATA TYPE=AC

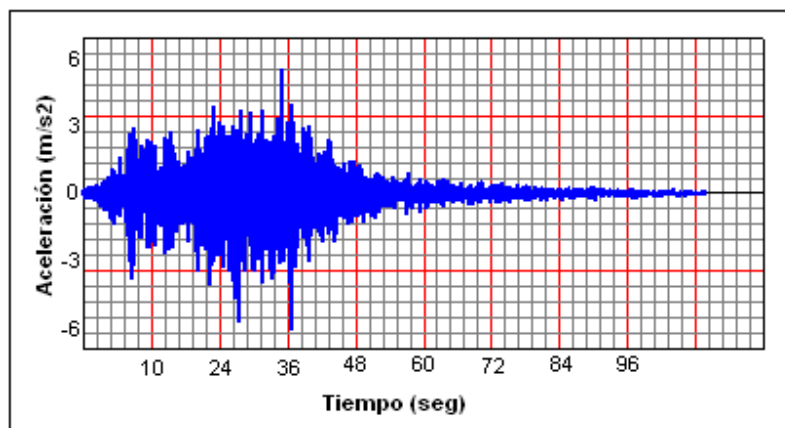


Figura 4.4.
Registro de Lolloe X.

Eje Y: **Lolloe Y**

LLOLLEO, 100 DEGREES

BUTTERWORTH AT ,167 HZ, ORDER 4

YEAR=1985 JULIAN DAY= 62 HOUR=22 MINUTE=47 SECOND= 7

SAMPLES/SEC=200 FILTER TYPE=BUTTERWORTH CORNER= 0,17

ORDER=4 DATA TYPE=AC

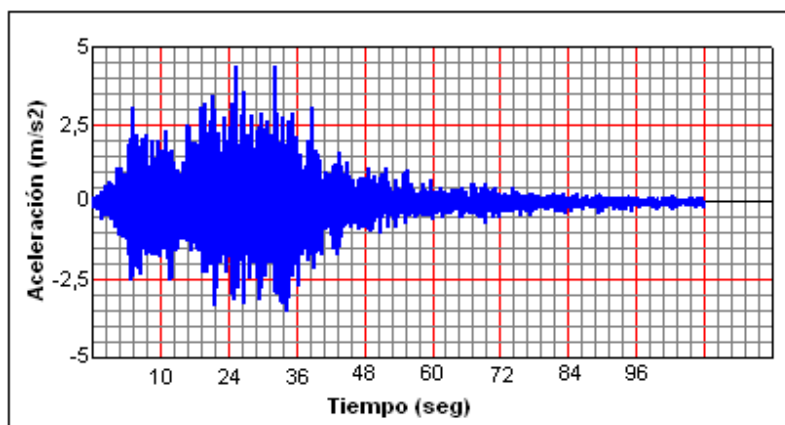


Figura 4.5.
Registro de Lolloe Y.

4.2.3. Registro Artificial.

Registro en dirección X: *Artificial X*

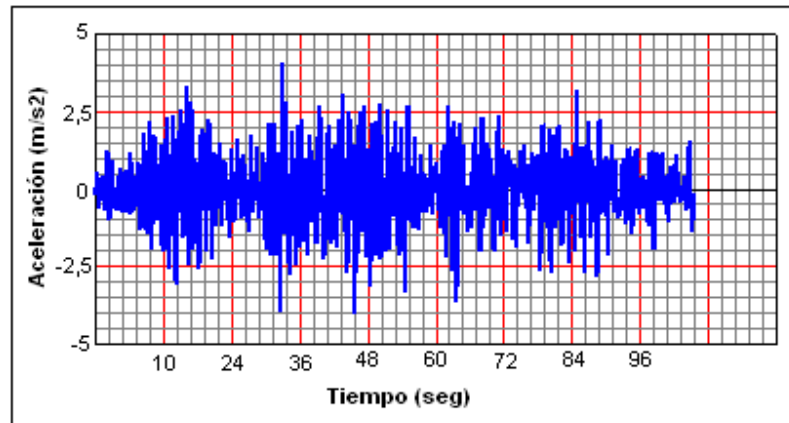


Figura 4.6.
Registro Artificial X.

Registro en dirección Y: *Artificial Y*

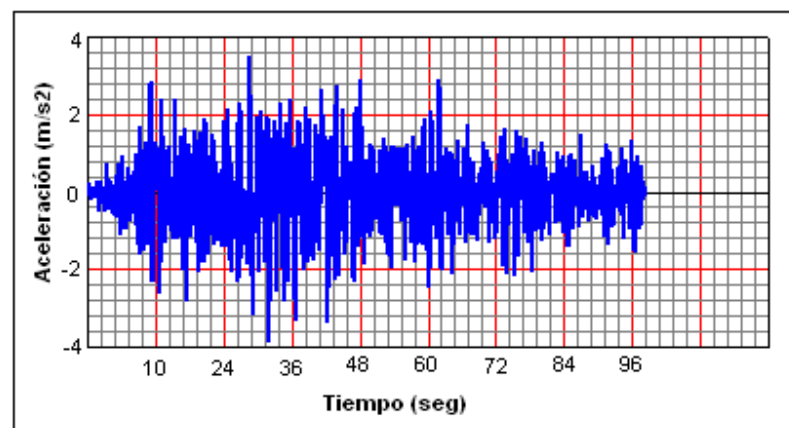


Figura 4.7.
Registro Artificial Y.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA DE LA ESTRUCTURA.

5.1. Introducción.

En el presente capítulo se realiza un análisis computacional del modelo con los registros elegidos anteriormente. Cada una de las componentes ortogonales de los registros (Viña del Mar, Lolleo, Artificial), fueron aplicados correspondientemente en las dos direcciones ortogonales planas (X e Y) establecidas en el modelo.-

Previo al análisis computacional, se definen rótulas plásticas en todas las vigas de la estructura, esto con el fin de analizar el comportamiento plástico del edificio y evaluar cuales de los tipos de marcos definidos en la “*Seismic provisions for structural steel buildings*” (3) se requieren para ésta estructura, dados los registros de diseño escogidos.-

5.2. Análisis del sistema estructural.

La “*Seismic provisions for structural steel buildings*” (SPSSB) (3) define varios tipos de sistemas estructurales, entre los cuales se encuentran los sistemas de marcos: *Ordinary Moment Frames* (OMF), *Intermediate Moment Frames* (IMF) y los *Special Moment Frames* (SMF).-

- **Ordinary Moment Frames (OMF):**

Este sistema debe soportar deformaciones inelásticas mínimas en sus elementos y conexiones con el sismo de diseño. Además, se debe verificar que las conexiones (parcialmente restringidas o totalmente restringidas) tengan una capacidad en flexión mínima igual a:

$$M_m = 1,1 \cdot R_y \cdot M_p \quad (5.1)$$

Donde M_p corresponde al momento plástico y R_y es un factor de amplificación dado en la Tabla I-6-1 de la SPSSB (3).-

- **Intermediate Moment Frames (IMF):**

Los sistemas sismo-resistentes a base de marcos intermedios (IMF), deben soportar deformaciones inelásticas limitadas en sus elementos y conexiones con el sismo de diseño. Todas las uniones viga-columna y conexiones deben satisfacer los siguientes requisitos:

- i. Soportar desplazamientos relativos entre niveles, tal que como mínimo se tenga un giro plástico de 0,02 radianes para el sismo de diseño.
- ii. La fuerza cortante para el diseño de elementos en flexión y de las conexiones viga-columna no debe ser menor que V_u , producto del análisis de la estructura.-

- **Special Moment Frames (SMF):**

Deben soportar importantes deformaciones inelásticas en sus elementos y conexiones con el sismo de diseño. Todas las uniones viga-columna y conexiones deben satisfacer los siguientes requisitos:

- i. Soportar desplazamientos relativos entre niveles, tal que como mínimo se tenga un giro plástico de 0,04 radianes para el sismo de diseño.
- ii. La capacidad a flexión de la conexión, determinada en la cara de la columna, debe ser al menos $0,8 \cdot M_p$ de la viga conectada.
- iii. La fuerza de cortante debido al efecto de las cargas sísmicas para el diseño de elementos en flexión y de las conexiones viga-columna, se debe calcular como:

$$V_p = 2 \cdot [1,1 \cdot R_y \cdot M_p] / L_h \quad (5.2)$$

Donde L_h corresponde a la distancia entre las rótulas plásticas.-

Para poder determinar que tipo de conexión es la adecuada para la estructura, se definen rótulas plásticas en los extremos de cada una de las vigas estructurales, y se mide el giro plástico correspondiente al análisis tiempo-historia con cada uno de los registros de diseño elegidos.-

Para modelar una rótula plástica en el programa computacional SAP2000, se asigna la propiedad llamada "hinge". Éstas son características no lineales que pueden ser asignadas a elementos tipo "Frame", donde el usuario debe definir un sistema de ejes locales de referencia 1-2-3 para asignación las propiedades locales no lineales y así interpretar los resultados. Los tres desplazamientos y las tres rotaciones son posibles de definir en los puntos extremos del elemento o en puntos intermedios, y pueden ser expresados en el sistema de referencias global X-Y-Z o en el local 1-2-3.-

Lo primero que se debe hacer para modelar la rótula plástica con la propiedad "hinge", es adicionar una nueva propiedad en el menú específico que contempla el programa SAP2000 (Fig. 5.1).-

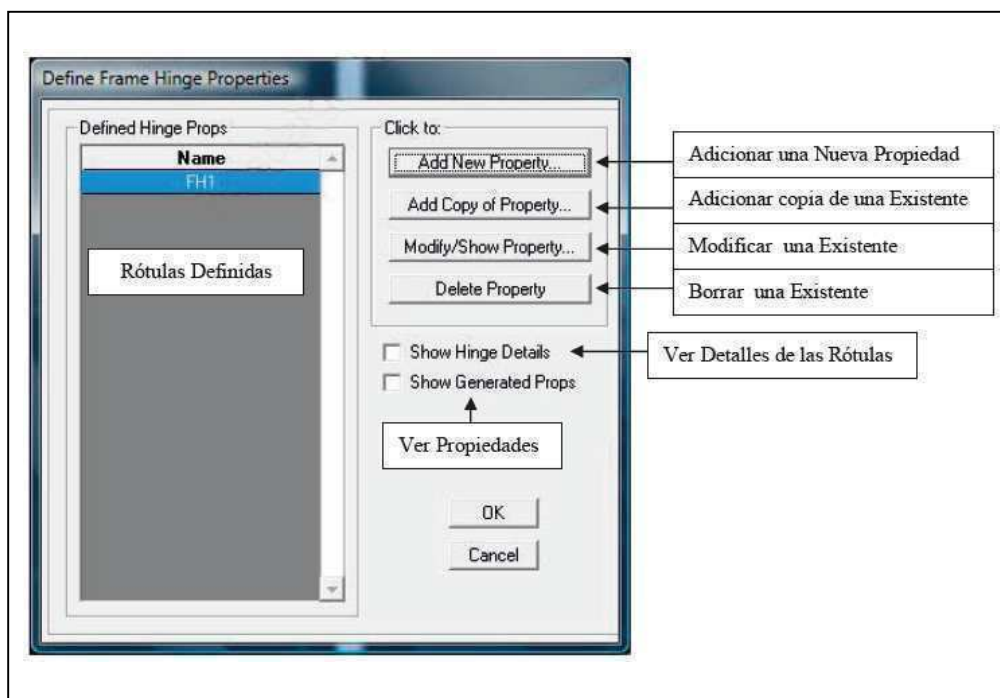


Figura 5.1.
Menú principal de la propiedad *hinge*.

Una vez seleccionada la opción de adicionar una nueva propiedad, se presenta una ventana donde se elige el tipo de material (Fig. 5.2).-

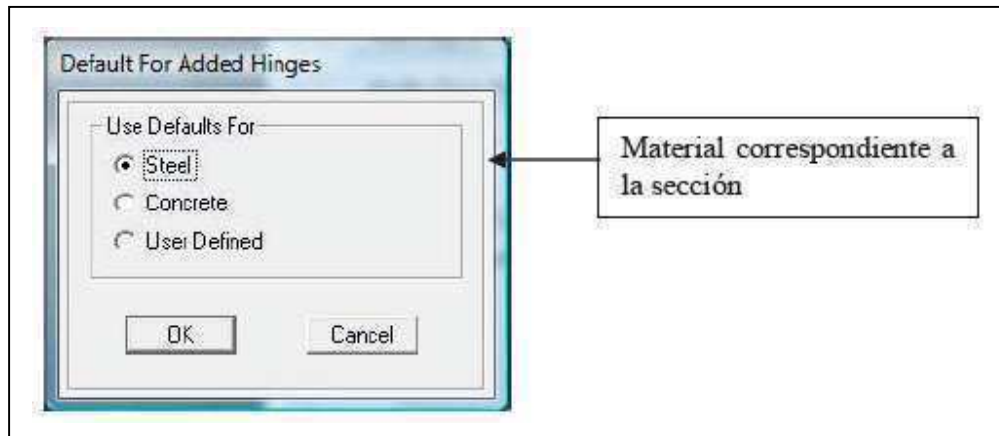


Figura 5.2.
Menú para tipo de material.

Posteriormente, se especifica cuál va a ser el tipo de *hinge* y las componentes a considerar. En este caso, el *hinge* es del tipo de deformación controlada por falla dúctil, y su único componente es el momento M3 (Fig. 5.3).-

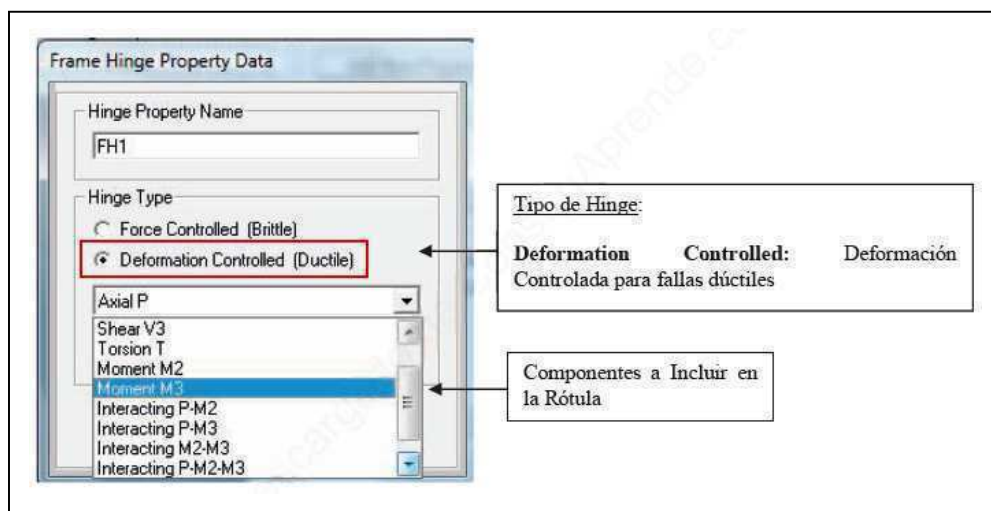


Figura 5.3.
Menú de tipo de *hinge* y de sus componentes.

Luego se definen las propiedades de *hinge* del tipo momento M3. Se definen parámetros de control de desplazamiento, tipo de curva representativa de comportamiento (en este caso Momento – rotación), y factores de escala para momentos y rotaciones. El programa SAP2000 calcula las propiedades fuerza deformación basándose en el refuerzo asignado a los extremos del elemento. Las propiedades de las rótulas por defecto son computadas de las propiedades de la sección del elemento al cual son asignadas. Estas son típicamente basadas en los criterios del FEMA – 356 y/o ATC – 40 (Fig. 5.4).-

Parámetros para el Control de Desplazamiento en términos de Momentos y Rotaciones, para una rótula de Momento M3 en una Viga

Tipo: Momento-Rotación
Momento-Curvatura

Frame Hinge Property Data for HV-STEEL - Moment M3

Gráfica

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E	-0.2	-8
D	-0.2	-5
C	-1.25	-6
B	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1.25	6
D	0.2	6
E	0.2	8

Displacement Control Parameters

Type: Moment - Rotation
 Moment - Curvature
Hinge Length
 Relative Length

Si se utiliza Momento-Curvatura se debe especificar la Longitud de la rótula

Load Carrying Capacity Beyond Point E:
 Drops To Zero
 Is Extrapolated

Factor de Escala para Momentos, Rotaciones y/o Curvaturas Cedentes.

Scaling for Moment and Rotation

Use Yield Moment Moment SF Positive Negative
 Use Yield Rotation (Steel Objects Only) Rotation SF Positive Negative

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

Immediate Occupancy Positive Negative
 Life Safety Positive Negative
 Collapse Prevention Positive Negative

Show Acceptance Criteria on Plot

OK Cancel

Crterios Aceptables establecidos para la rotación y/o curvatura plástica.

Figura 5.4.
Propiedades para *hinge* de tipo momento M3.

En la figura 5.5. se especifica que los valores de momento de fluencia y la rotación de fluencia, los determina el programa en base a la sección establecida de acero.-

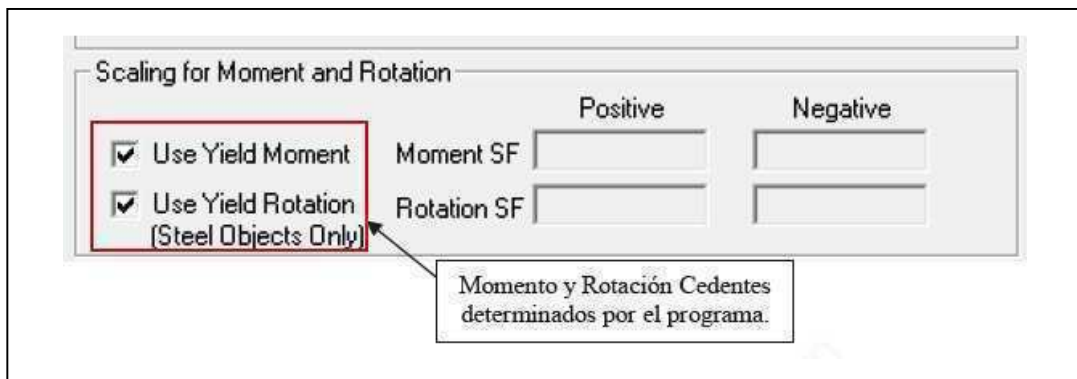


Figura 5.5.
Submenú de asignación de momento y rotación de fluencia.

En este caso el valor de Escala SF que utiliza el programa son los momentos y rotaciones de fluencia que determina internamente.-

Una vez que se tienen definidas las rótulas plásticas con la propiedad "hinge", se procede a asignarlas a las vigas estructurales. Las rótulas se asignan a una distancia de 5% del largo total de la viga en cada extremo, tal como lo muestra la figura 5.6.-

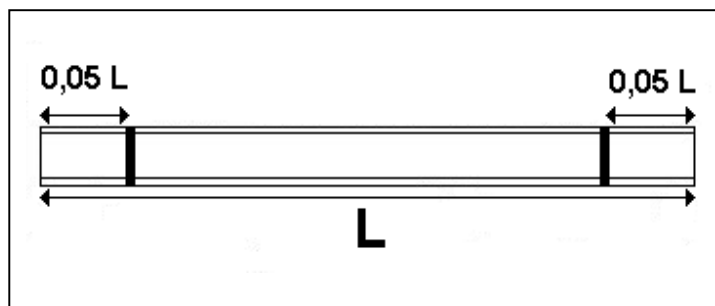


Figura 5.6.
Ubicación de las rótulas en las vigas.

Una vez definidas y asignadas las rótulas plásticas, se procede a realizar los análisis dinámicos con los registros escogidos. Al obtener los resultados y medir los giros plásticos de cada una de las rótulas, se puede determinar que tipo de conexión se requiere en los marcos de la estructura.-

5.3. Método de análisis escogido.

El análisis escogido para el caso base (estructura sin dispositivos) es el tipo de análisis tiempo historia no lineal, transiente¹ y con integración directa.-

El análisis de tiempo historia es un análisis paso a paso de la respuesta dinámica de una estructura a una carga especificada que puede variar con el tiempo. Gracias a este tipo de análisis se puede obtener una radiografía muy completa del comportamiento del edificio durante la ocurrencia de un sismo.-

Las ecuaciones de equilibrio dinámicas a ser resueltas son las siguientes:

$$K \cdot u(t) + C \cdot \dot{u}(t) + M \cdot \ddot{u}(t) = r(t) \quad (5.3)$$

Donde K es la matriz de rigidez, C es la matriz de amortiguamiento y M es la matriz diagonal de masas; $u(t)$, $\dot{u}(t)$ y $\ddot{u}(t)$ son los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de la estructura respectivamente y $r(t)$ es la carga aplicada. Si la carga incluye la aceleración del suelo, los desplazamientos, velocidades y aceleraciones son relativos a este movimiento del suelo.-

En el programa computacional SAP2000 hay distintas formas de realizar este análisis. La forma escogida es la que expone por defecto el programa, ésta es el análisis tiempo historia, no lineal, transiente, con integración directa mediante el método *Hilber-Hughes-Taylor Alpha*. El menú principal para definir este tipo de análisis se muestra en la figura 5.7.-

¹ Transiente: el análisis transiente considera la carga aplicada como un evento de “un tiempo”, con un principio y un final.

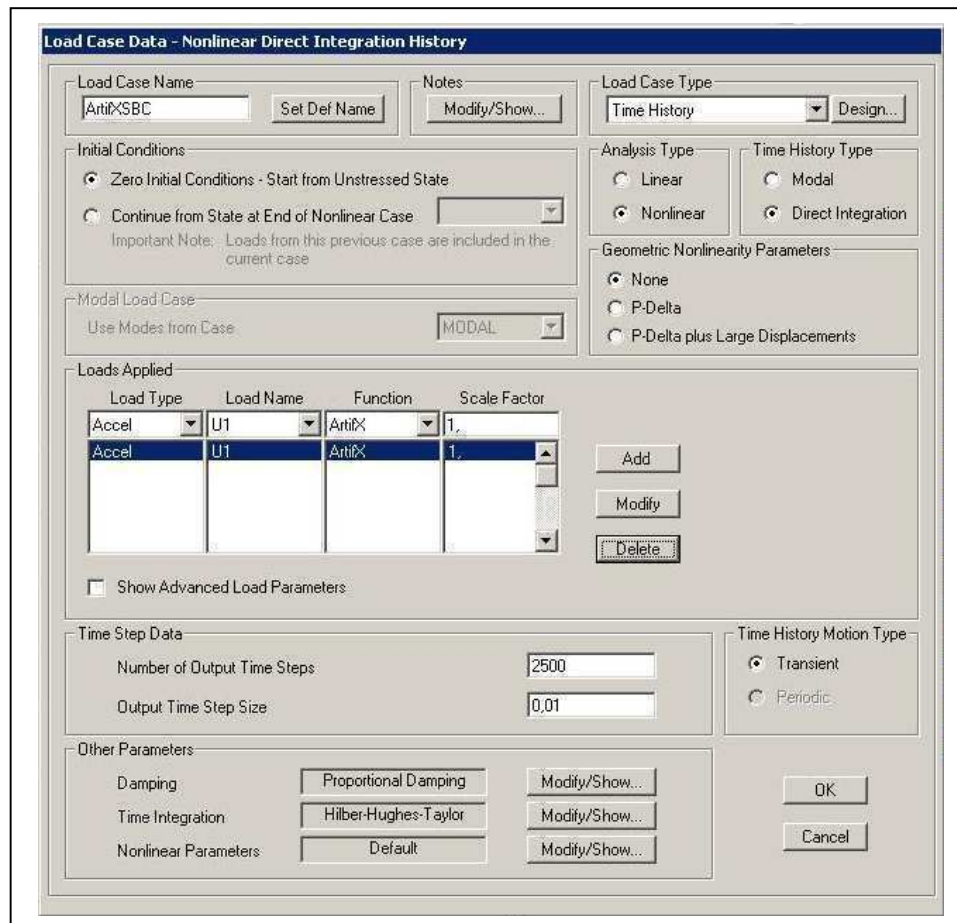


Figura 5.7.
Menú principal para definir el análisis tiempo historia en SAP2000.

Una vez definido el método de análisis, se obtienen a partir del cálculo computacional, los desplazamientos, velocidades, aceleraciones y esfuerzos de todos los elementos que conforman la estructura, además del giro plástico de las rótulas.-

5.4. Obtención de resultados.

5.4.1. Resultados para los registros de Viña del Mar.

A continuación se detallan los desplazamientos, velocidades, aceleraciones, fuerzas por nivel, y giros plásticos encontrados en el análisis de respuesta en el tiempo con los registros de Viña del Mar.-

Nivel	Dirección X		Dirección Y	
	Desplazamientos c/r base [cm.]	Desplazamientos entrepisos [cm.]	Desplazamientos c/r base [cm.]	Desplazamientos entrepisos [cm.]
10	30,057	3,350	17,1863	1,776
9	27,000	4,402	15,6385	2,351
8	22,930	5,170	13,8516	2,795
7	17,942	5,179	11,8276	2,786
6	14,146	4,003	9,7228	2,318
5	11,670	2,595	8,0664	1,834
4	9,290	2,382	6,5614	1,749
3	6,709	2,472	4,8499	1,931
2	4,005	2,294	2,9194	1,855
1	1,465	1,465	1,0635	1,064

Tabla 5.1.
Desplazamientos según los registros de Viña del Mar.

Nivel	Velocidades absolutas [m/seg.]	
	Dirección X	Dirección Y
10	1,458	0,9814
9	1,258	0,8058
8	0,989	0,7061
7	0,780	0,6338
6	0,741	0,6036
5	0,752	0,5361
4	0,658	0,4762
3	0,507	0,3845
2	0,397	0,3343
1	0,306	0,2851

Tabla 5.2.
Velocidades según los registros de Viña del Mar.

Nivel	Aceleración absoluta [m/seg ² .]	
	Dirección X	Dirección Y
10	8,101	7,16102
9	6,326	5,17278
8	6,090	5,23058
7	5,232	4,52864
6	6,813	5,24319
5	7,171	5,18642
4	6,260	5,02845
3	5,643	4,56742
2	5,270	4,44033
1	3,586	2,6843

Tabla 5.3.
Aceleraciones según los registros de Viña del Mar.

Nivel	Dirección X	Dirección Y
	Corte [Ton.]	Corte [Ton.]
10	351,480	310,1121
9	593,786	488,4373
8	770,185	619,3251
7	887,712	684,8526
6	911,582	747,1742
5	987,570	789,556
4	1157,538	909,9904
3	1254,965	1018,6489
2	1323,827	1124,6633
1	1370,019	1167,0534

Tabla 5.4.
Esfuerzos por nivel según los registros de Viña del Mar.

Los giros máximos para la estructura alcanzados con los registros de Viña del Mar a través del análisis tiempo historia no lineal, se resumen en la Tabla 5.5. y en las Figuras 5.7. y 5.8.-

EJE	VIGA	ROTACION PLASTICA [Rad]	MAXIMO MOMENTO M3 [Ton-m]
E	339	0,0098164	29,9146
5	389	0,002851	28,8036

Tabla 5.5.
Giros plásticos máximos para los registros de Viña del Mar.

De la tabla anterior podemos concluir de que el sistema estructural requerido en este caso es el *Ordinary Moment Frames*.-

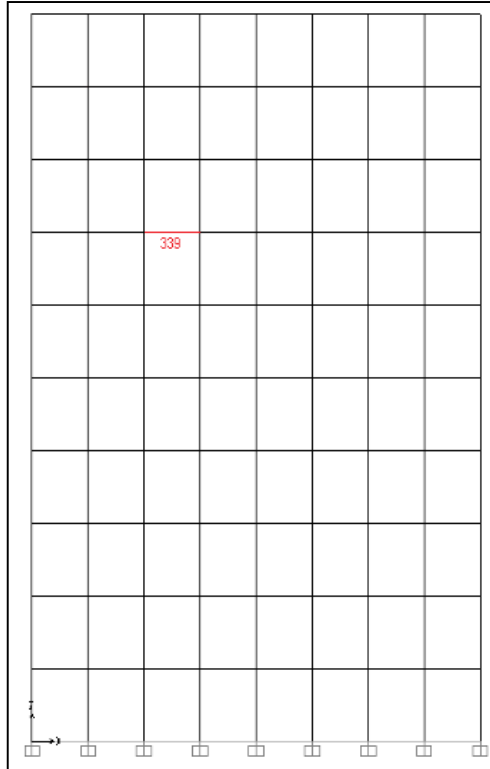


Figura 5.8.
Ubicación de la rótula con giro máximo en el eje E (Viña del Mar X).

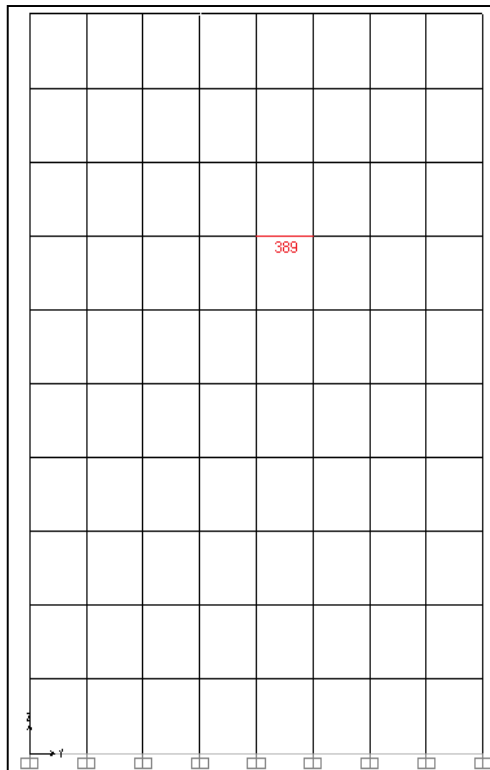


Figura 5.9.
Ubicación de la rótula con giro máximo en el eje 5 (Viña del Mar Y).

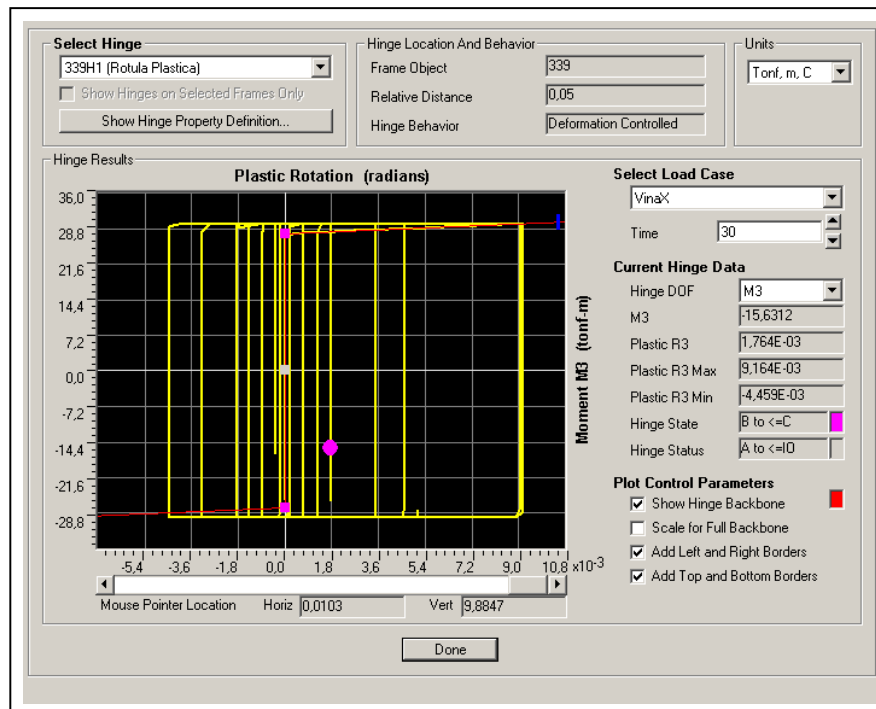


Figura 5.10.
 Comportamiento de la rótula con máximo giro en X (Viña del Mar X).

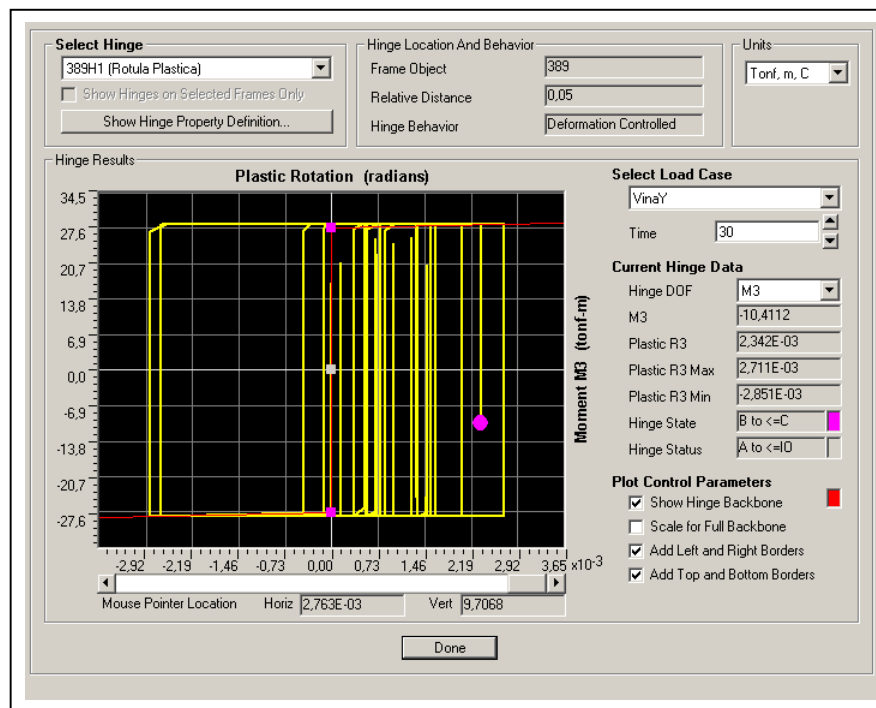


Figura 5.11.
 Comportamiento de la rótula con máximo giro en Y (Viña del Mar Y).

5.4.2. Resultados para los registros de Lolloe.

A continuación se detallan los desplazamientos, velocidades, aceleraciones, fuerzas por nivel y giros plásticos mayores, encontrados en el análisis de respuesta en el tiempo con los registros de Lolloe.-

Nivel	Dirección X		Dirección Y	
	Desplazamientos c/r base [cm.]	Desplazamientos entrepisos [cm.]	Desplazamientos c/r base [cm.]	Desplazamientos entrepisos [cm.]
10	31,830	3,543	26,4683	2,330
9	28,868	3,919	24,0159	3,016
8	25,309	4,752	21,2346	3,522
7	21,797	5,296	18,3826	3,790
6	17,759	4,214	15,0885	3,248
5	14,247	3,063	11,9631	2,437
4	11,830	2,943	9,3076	2,427
3	8,957	2,723	6,6263	2,399
2	5,515	2,536	3,893	2,268
1	2,041	2,041	1,395	1,395

Tabla 5.6.
Desplazamientos según los registros de Lolloe.

Nivel	Velocidades absolutas [m/seg.]	
	Dirección X	Dirección Y
10	1,560	1,319
9	1,292	1,188
8	1,126	0,9802
7	0,956	0,8539
6	0,872	0,6733
5	0,975	0,6237
4	1,011	0,5587
3	0,973	0,48
2	0,765	0,3985
1	0,523	0,294

Tabla 5.7.
Velocidades según los registros de Lolloe.

Nivel	Aceleración absoluta [m/seg ² .]	
	Dirección X	Dirección Y
10	15,764	9,34774
9	11,336	7,55312
8	10,484	7,03807
7	10,419	7,20822
6	10,700	7,32109
5	11,930	8,40346
4	11,732	7,6217
3	12,827	6,85274
2	11,471	6,27813
1	6,933	4,58649

Tabla 5.8.
Aceleraciones según los registros de Lolloe.

Nivel	Dirección X	Dirección Y
	Corte [Ton.]	Corte [Ton.]
10	681,445	404,5719
9	886,565	624,8915
8	969,730	825,8236
7	1052,809	903,1307
6	1057,045	957,2733
5	1313,040	1136,6164
4	1414,199	1280,065
3	1515,242	1384,0445
2	1749,762	1477,5633
1	1915,529	1551,4696

Tabla 5.9.
Esfuerzos por nivel según los registros de Lolloe.

Los giros máximos para la estructura alcanzados con los registros de Lolloe a través del análisis tiempo historia no lineal, se resumen en la Tabla 5.10. y se caracterizan y en las Figuras 5.9. y 5.10.-

EJE	VIGA	ROTACION PLASTICA [Rad]	MAXIMO MOMENTO M3 [Ton-m]
E	450	0,0116	30,855
1	367	0,0078	29,8779

Tabla 5.10.
Giros plásticos máximos para los registros de Lolloe.

En este caso, al igual que para el caso de los registros de Viña del mar, solamente se requiere un sistema estructural del tipo *Ordinary Moment Frames*.-

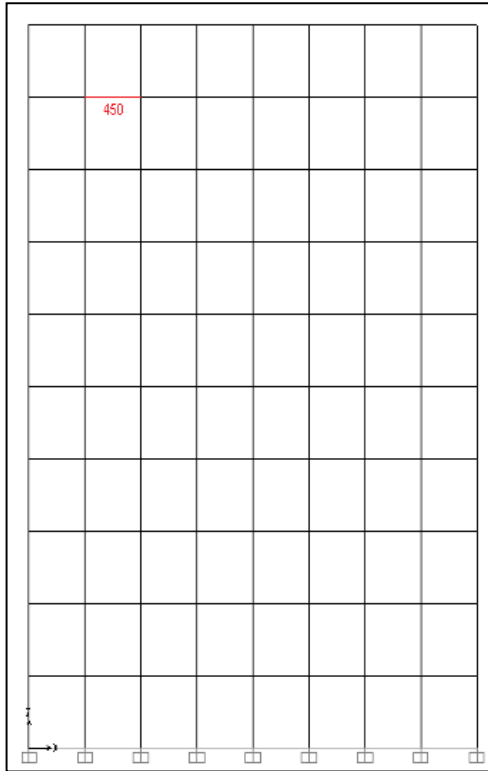


Figura 5.12.
Ubicación de la rótula con giro máximo en el eje E (Lollo X).

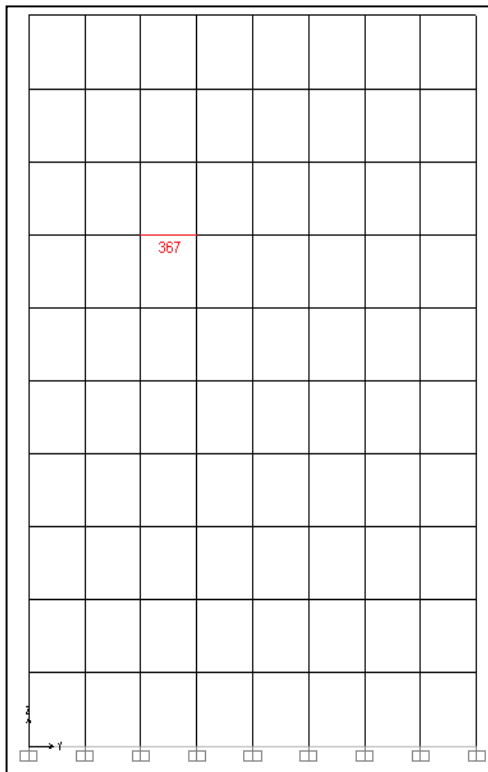


Figura 5.13.
Ubicación de la rótula con giro máximo en el eje 1 (Lollo Y).

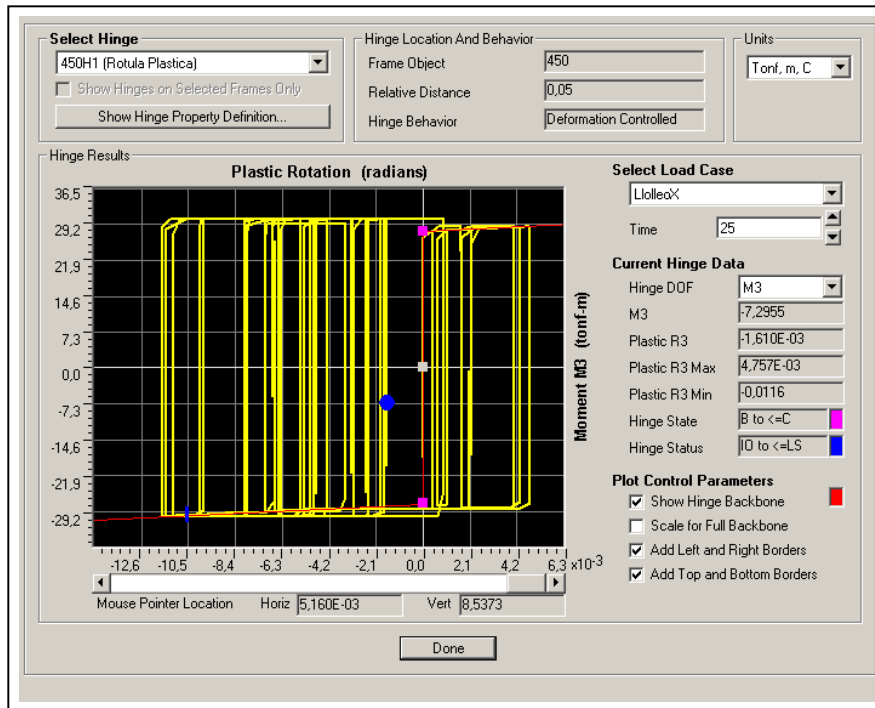


Figura 5.14.
 Comportamiento de la rótula con máximo giro en X (Llolleo X).

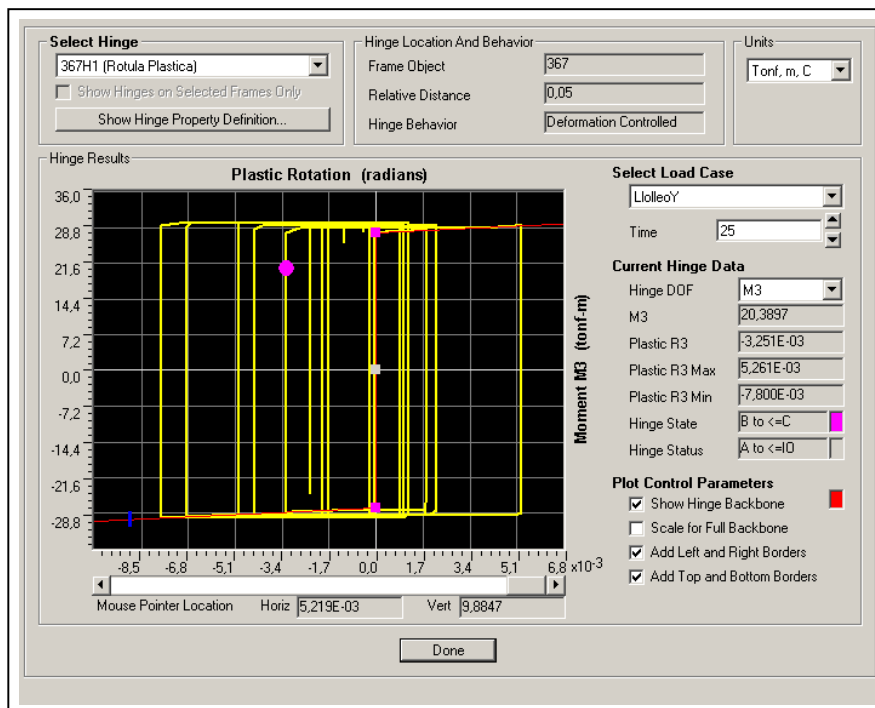


Figura 5.15.
 Comportamiento de la rótula con máximo giro en Y (Llolleo Y).

5.4.3. Resultados para los registros Artificiales.

A continuación se detallan los desplazamientos, velocidades, aceleraciones y fuerzas por nivel, encontradas en el análisis de respuesta en el tiempo con los registros Artificiales.-

Nivel	Dirección X		Dirección Y	
	Desplazamientos c/r base [cm.]	Desplazamientos entrepisos [cm.]	Desplazamientos c/r base [cm.]	Desplazamientos entrepisos [cm.]
10	34,311	4,891	50,0131	7,207
9	31,247	5,722	43,7805	8,012
8	27,574	6,07	36,7499	8,417
7	23,886	5,75	28,779	8,297
6	19,898	4,522	20,8671	6,758
5	15,949	3,661	15,1069	4,643
4	12,398	3,738	11,3555	3,621
3	9,165	3,715	8,0017	3,340
2	5,422	3,28	4,6227	2,892
1	1,913	1,913	1,6311	1,631

Tabla 5.11.
Desplazamientos según los registros Artificiales.

Nivel	Velocidades absolutas [m/seg.]	
	Dirección X	Dirección Y
10	1,675	2,0054
9	1,428	1,899
8	1,205	1,7493
7	1,021	1,5476
6	1,005	1,289
5	1,014	1,1303
4	0,995	1,0313
3	0,889	0,9149
2	0,680	0,8079
1	0,519	0,734

Tabla 5.12.
Velocidades según los registros Artificiales.

Nivel	Aceleración absoluta [m/seg ² .]	
	Dirección X	Dirección Y
10	11,460	12,23699
9	8,033	7,84293
8	7,214	7,83229
7	7,664	7,49597
6	10,512	8,88432
5	10,063	8,71018
4	10,635	8,30011
3	10,023	6,85059
2	7,838	5,20254
1	4,208	4,4878

Tabla 5.13.
Aceleraciones según los registros Artificiales.

Nivel	Dirección X	Dirección Y
	Corte [Ton.]	Corte [Ton.]
10	496,300	529,0897
9	737,958	747,9534
8	858,933	924,8524
7	895,926	1156,5924
6	1044,899	1255,2373
5	1246,968	1305,4386
4	1419,969	1405,3228
3	1602,975	1574,9184
2	1719,508	1648,435
1	1740,886	1713,0083

Tabla 5.14.
Esfuerzos por nivel según los registros Artificiales.

Los giros máximos para la estructura alcanzados con los registros Artificiales a través del análisis tiempo historia no lineal, se resumen en la Tabla 5.15. y se caracterizan y en las Figuras 5.11. y 5.12.-

EJE	VIGA	ROTACION PLASTICA [Rad]	MAXIMO MOMENTO M3 [Ton-m]
E	338	0,0115	30,3498
1	367	0,0196	33,7721

Tabla 5.15.
Giros plásticos máximos para los registros Artificiales.

Por último, en el caso de los registros Artificiales, al igual que en los otros registros lo único que se necesita como sistema estructural es de los *Ordinary Moment Frames*.-

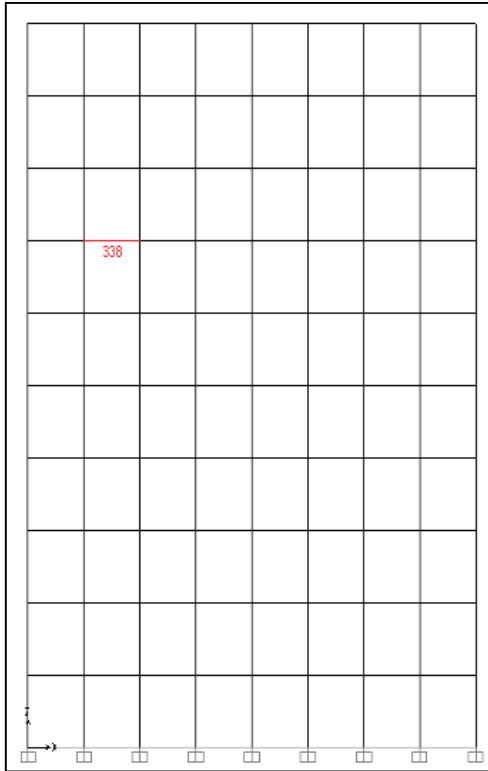


Figura 5.16.
Ubicación de la rótula con giro máximo en el eje E (Artificial X).

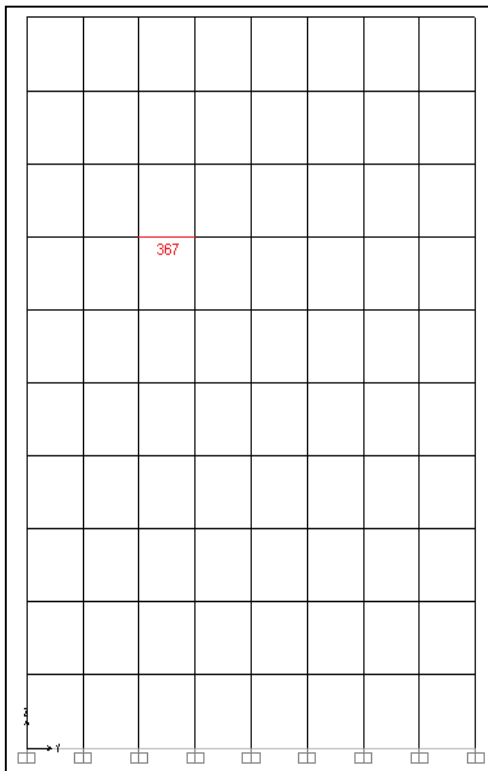


Figura 5.17.
Ubicación de la rótula con giro máximo en el eje 1 (Artificial Y).

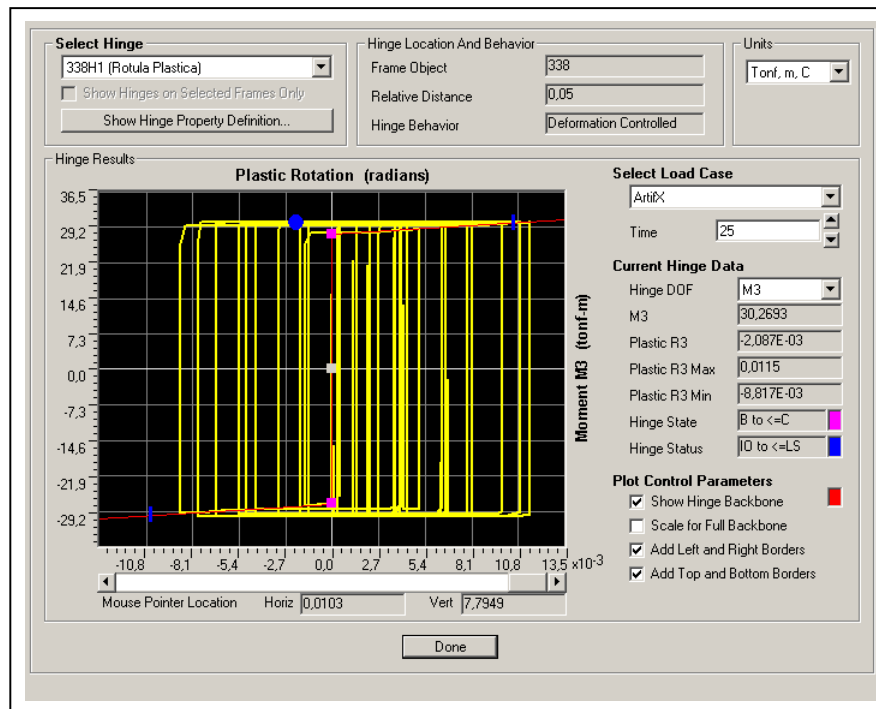


Figura 5.18.
 Comportamiento de la rótula con máximo giro en X (Artificial X).

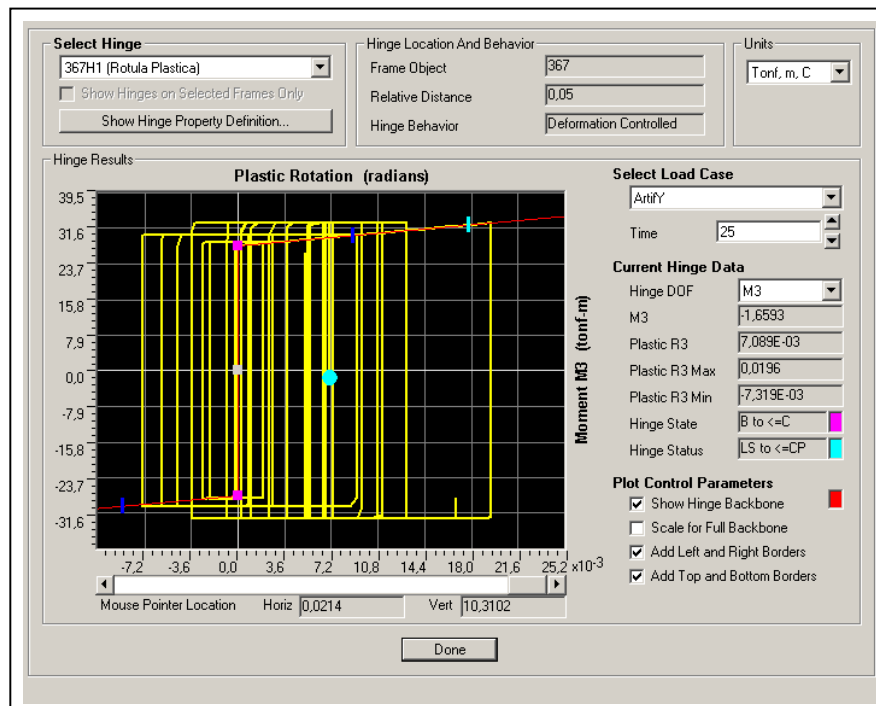


Figura 5.19.
 Comportamiento de la rótula con máximo giro en Y (Artificial Y).

5.5. Gráficas comparativas entre resultados.

A continuación se presentan gráficas comparativas entre los resultados para los distintos registros, y según las dos direcciones de análisis. En ellos se podrá ver con más claridad para qué excitación se encontraron los valores máximos de desplazamientos, velocidades y aceleraciones, para los distintos ejes de análisis.-

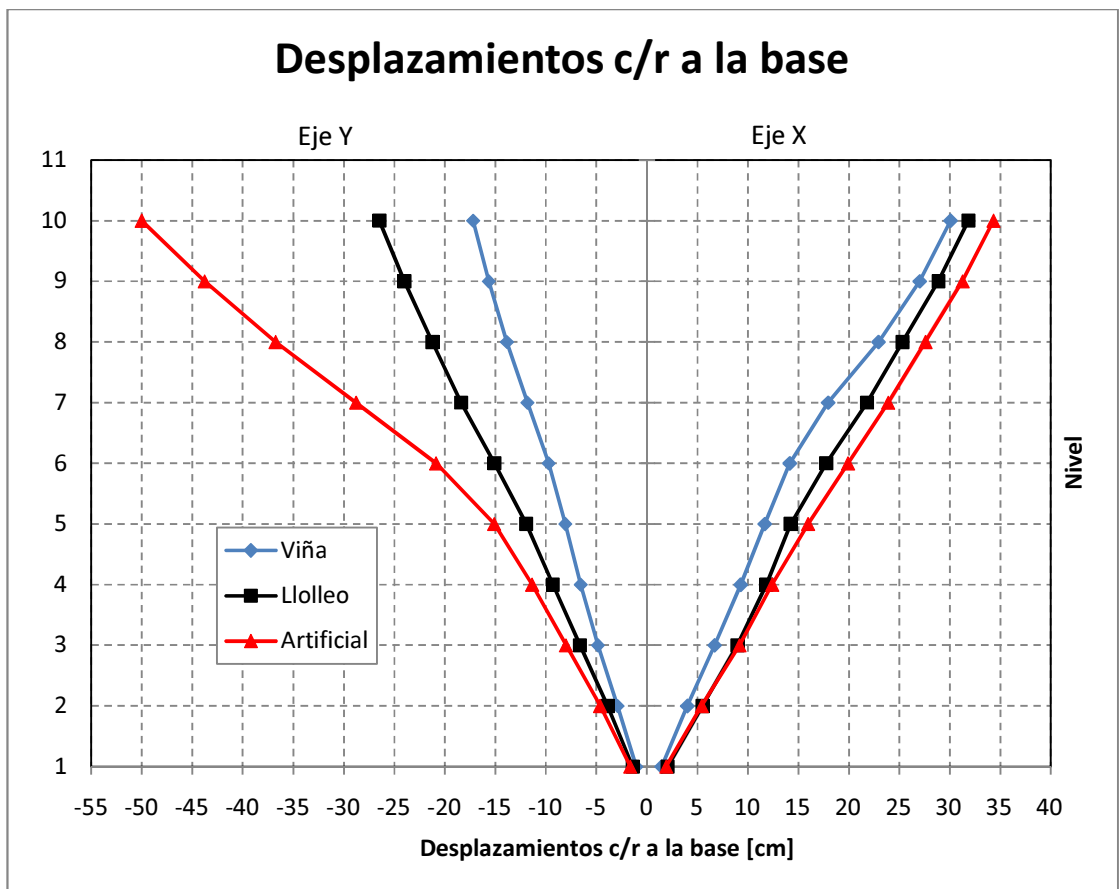


Figura 5.20.
Gráfica comparativa de desplazamientos c/r a la base.

En general, el comportamiento de la estructura según el desplazamiento de los pisos con respecto a la base (Fig. 5.14.) es el esperado, es decir, se producen mayores desplazamientos con los registros *Artificiales*, seguido por los producidos con los registros de *Lolloo* y por último los derivados de los registros de *Viña del Mar*. El excesivo movimiento producido con el registro *Artificial* en el eje Y, se debe a que se

escogió analizar esa dirección con el registro *Artificial Y*, el cual posee *peaks* de aceleraciones mayores a todos los otros registros , además, la dirección Y es la dirección más desfavorable del edificio, ya que la estructura tiene menos extensión en ese sentido que en el de X.-

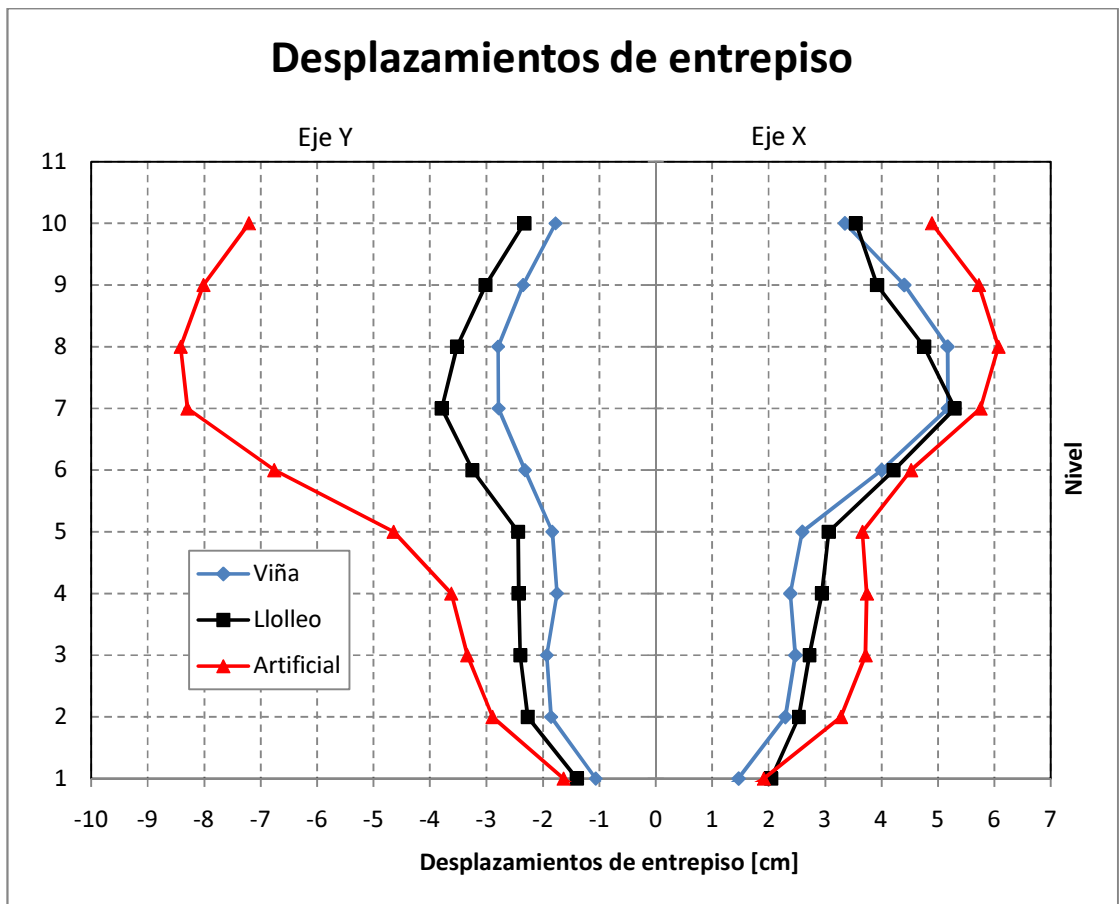


Figura 5.21.
Gráfica comparativa de desplazamientos de entrepiso.

En los desplazamientos de entrepiso (Fig. 5.15.), se sigue observando que el registro *Artificial Y* provoca grandes movimientos en la dirección Y, mientras que con los otros registros en esa misma dirección, se observa que *Lollole Y* produce desplazamientos de entrepiso algo mayores a los de *Viña del Mar Y*. En el eje X se

observa la tendencia general, es decir, el que produce más efecto es el registro *Artificial X*, seguido de *Llolleo X* y *Viña del Mar X* que en este contexto producen efectos similares.-

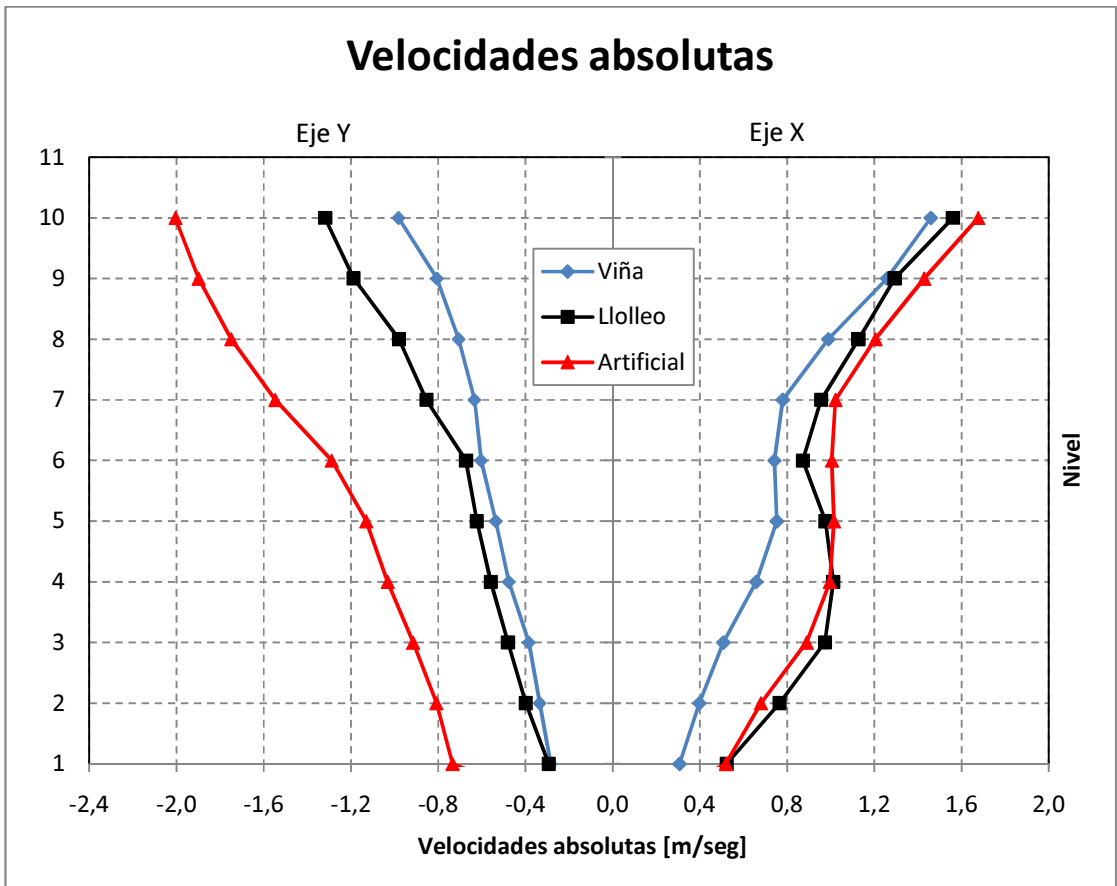


Figura 5.22.
Gráfica comparativa de velocidades absolutas.

El gráfico de comparación de velocidades (Fig. 5.16.) nos muestra que en la dirección Y se observa la misma tendencia que en los gráficos anteriores, el registro *Artificial Y* produce mayores efectos que todos los demás. En el eje X se también se mantiene la tendencia, es decir, el que produce mayores velocidades es el registro *Artificial X*, seguido en un estrecho margen por los registros *Llolleo X* y *Viña del Mar X*.-

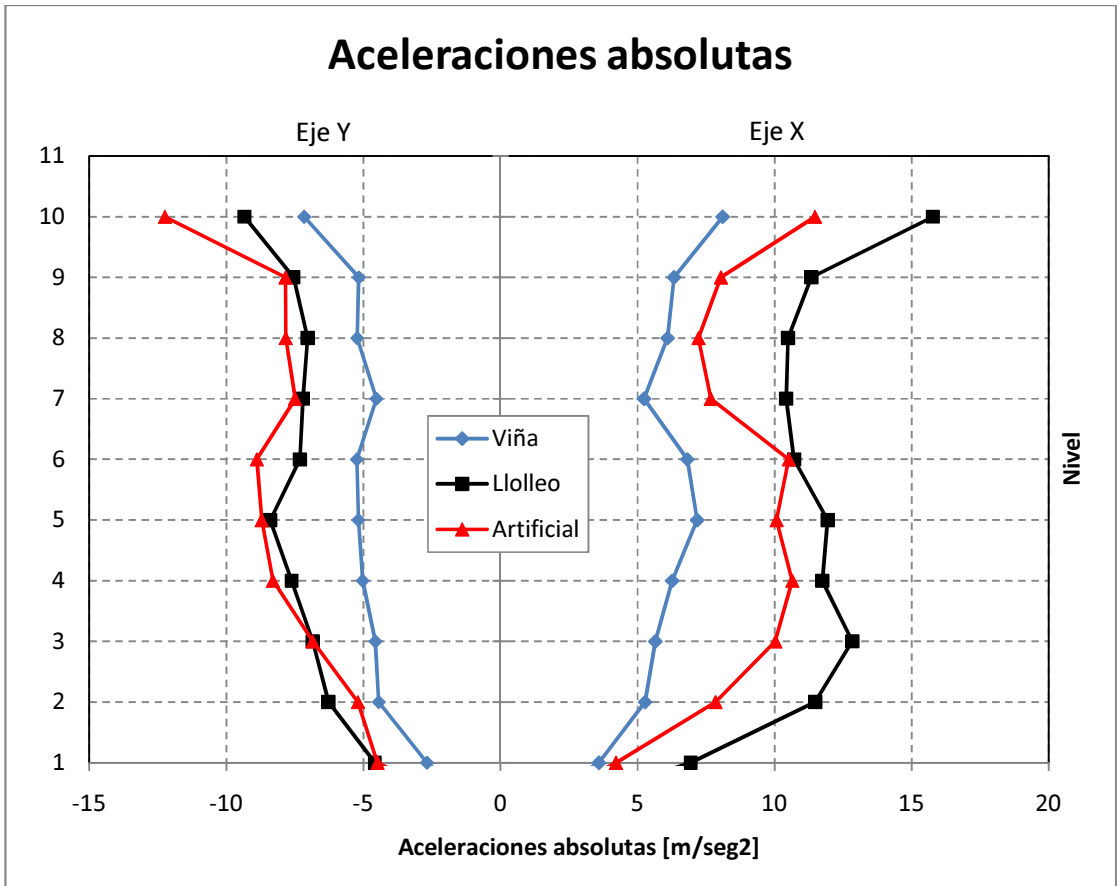


Figura 5.23.
Gráfica comparativa de aceleraciones absolutas.

Respecto de las aceleraciones absolutas (Fig. 5.17.), en el eje Y las aceleraciones mas grandes se producen con el registro *Artificial Y*, seguido por las encontradas con *Lolloo Y* y *Viña del Mar Y*. En la dirección X, podemos observar que las aceleraciones producidas por *Lolloo X* son mayores a las producidas por *Artificial X*, esto es debido a que *Lolloo X* tiene *peaks* de aceleraciones mayores a los del registro *Artificial X*.

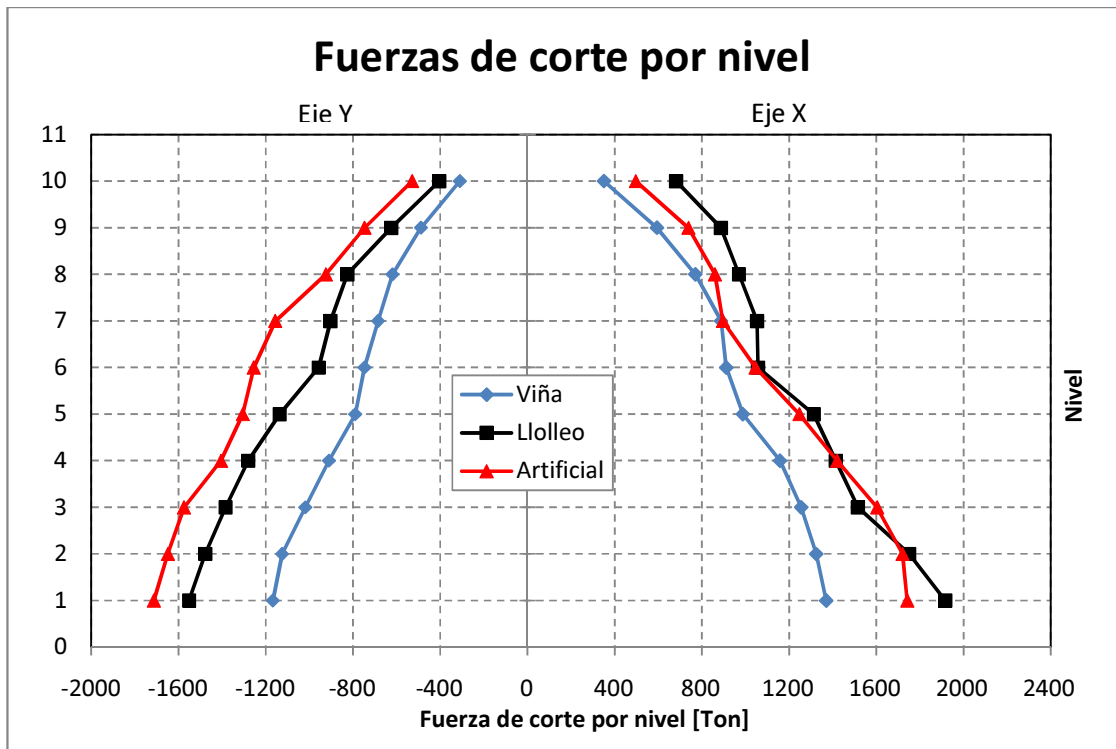


Figura 5.24.
Gráfica comparativa de fuerzas de corte.

En el gráfico de comparación de esfuerzos de corte (Fig. 5.18.), podemos ver que en la dirección X se observa claramente que el registro que produce mayores esfuerzos es el *Artificial Y*, seguido por el de *Lollole Y* y el de *Viña del Mar Y*, mientras que en la dirección X se aprecia que el registro de *Lollole X* produce más esfuerzo que el registrado con *Artificial X*, esto mantiene la tendencia encontrada para las aceleraciones.-

Se debe hacer notar que la elección de la dirección de aplicación de los registros fue efectuada sin un patrón determinado, luego, algunos resultados pueden aparecer con algunas tendencias fuera de lo esperado, pero estas tendencias se producen por la geometría dispar del edificio, la orientación de las columnas y directamente por el nivel de aceleraciones de los registros. Sin embargo estas tendencias no afectan el objetivo final del estudio, ya que éste es el de analizar las reducciones obtenidas al introducir los disipadores, sometiendo a la estructura al mismo régimen de análisis que en este caso.-

CAPÍTULO 6

DISEÑO Y MODELACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS SBC.

El presente capítulo comprende el diseño y la caracterización de los dispositivos SBC, además de su modelación en el programa computacional SAP2000, la forma de disponer los disipadores en los marcos, y la selección de la distribución de los dispositivos en el edificio.-

6.1. Características de los dispositivos SBC.

Los dispositivos escogidos están formados por una serie de elementos en general muy comunes, los cuales varían levemente según el tipo específico de disipador.

Sus componentes son:

- a) Una placa de acero central, con perforaciones alargadas. El tipo específico de placa, su longitud y la cantidad y tamaño de las perforaciones, dependen del tipo específico de dispositivo al que corresponde.-
- b) Dos perfiles canal (C), dispuestos a ambos costados del alma del perfil central IN, ambos con perforaciones simples. El tipo específico de perfil canal, su longitud y la cantidad y tamaño de las perforaciones, dependen del tipo específico de dispositivo al que corresponde.-
- c) Dos placas de contacto de espesor 1/8", fabricadas con material tipo *Brass* (UNS-260). Estas placas se ubican en la zona de contacto entre la placa central y los perfiles C, a ambos costados, y tendrán perforaciones simples. La geometría y la cantidad de perforaciones que posea cada placa, dependen del tipo específico de dispositivo al que corresponde.-
- d) Pernos de alta resistencia A325, que unen los perfiles y placas anteriormente descritos. La cantidad y dimensión de los pernos, dependen del tipo específico de dispositivo al que corresponde.-

En las Figuras 6.1. y 6.2. se puede observar un esquema general de los dispositivos utilizados en el estudio.-

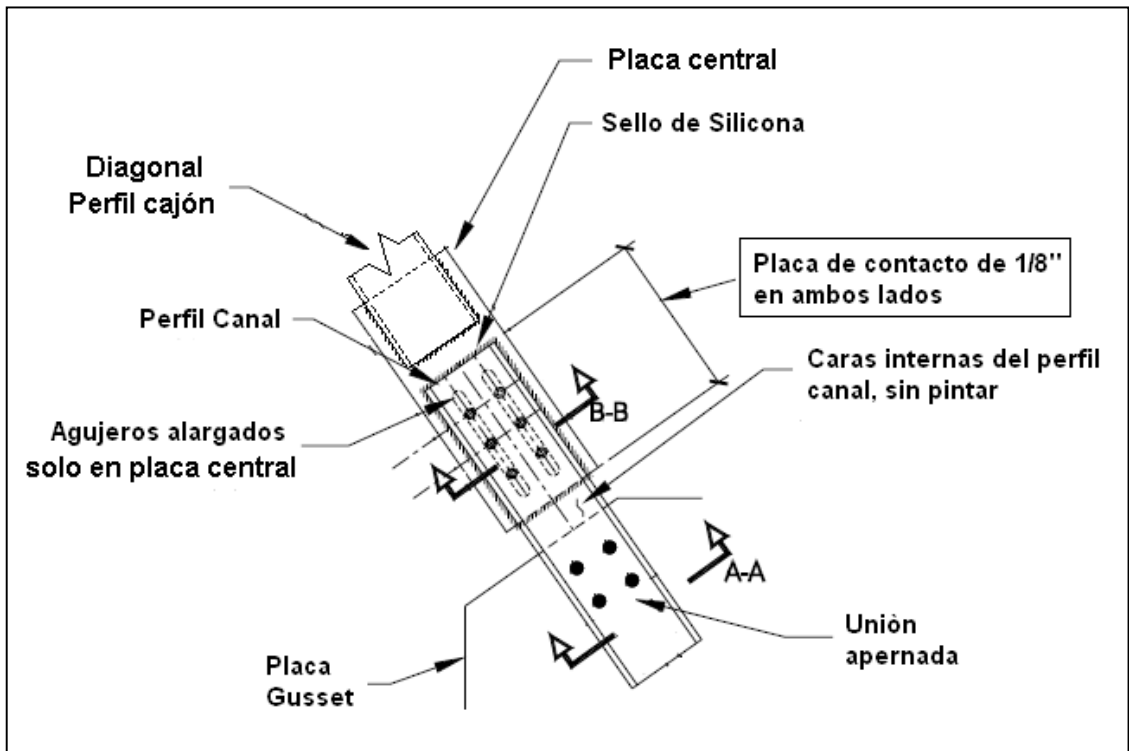


Figura 6.1.
Esquema general del tipo de SBC escogido.

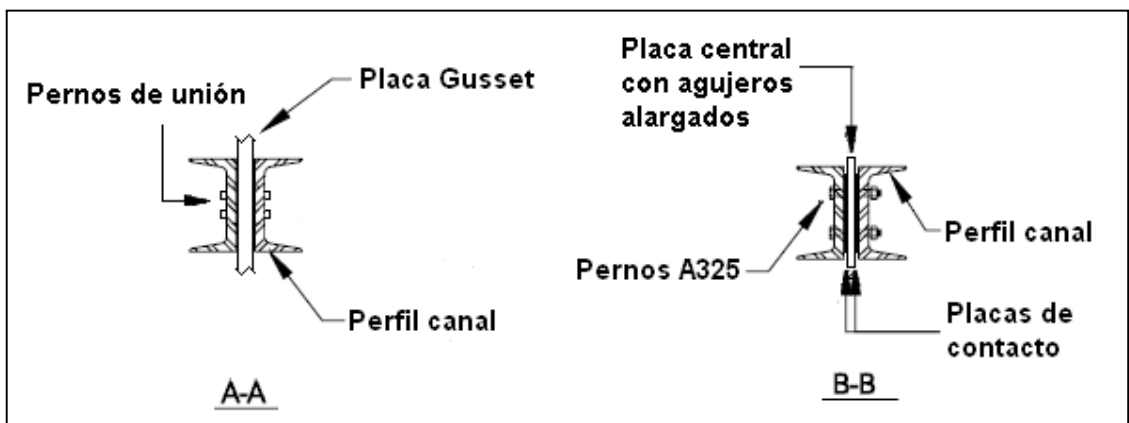


Figura 6.2.
Cortes del SBC escogido.

El coeficiente de roce estático entre la placa central (acero A36), y la placa de contacto (*Brass UNS-260*), es de 0,5 según los estudios de Grigorian y Popov (12), pero de todas maneras, este coeficiente se deberá comprobar con un test de laboratorio.-

En la Figura 6.3. se puede ver un esquema detallado de la unión de la placa central del dispositivo, las placas de contacto y el alma de los perfiles canal dispuestos exteriormente, mediante los pernos A325.-

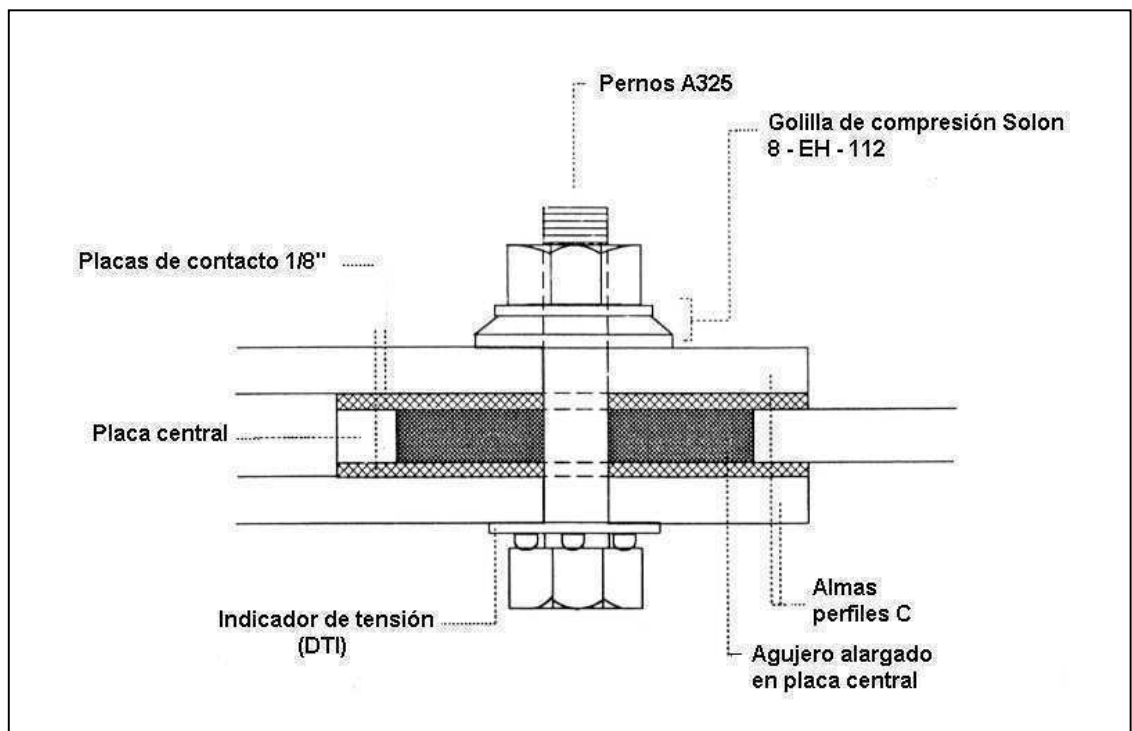


Figura 6.3.
Detalles de la unión de los elementos componentes del SBC.

6.2. Carga óptima de deslizamiento.

El parámetro más importante para el diseño de los dispositivos SBC es la carga de deslizamiento inicial, que es la carga mínima para lograr el deslizamiento entre las placas. La disipación de la energía en estos dispositivos se produce cuando existe un ciclo de cargas que es mayor a esta carga de deslizamiento inicial. Para valores muy altos de esta carga de deslizamiento inicial, va a ser muy difícil provocar el deslizamiento entre las placas por lo que la energía disipada puede ser mínima. Por otro lado, para valores muy bajos de la carga de deslizamiento inicial, la fuerza normal que existe entre las placas y que da origen a la fricción puede ser muy baja, por lo que aunque se produzcan grandes deslizamientos relativos entre las placas, la energía disipada puede ser de igual forma mínima. Para esta carga de deslizamiento inicial, existe un valor óptimo el cual nos entrega el mejor rendimiento del dispositivo ante el sismo de diseño y minimiza la respuesta de la estructura (Fig. 6.4.).-

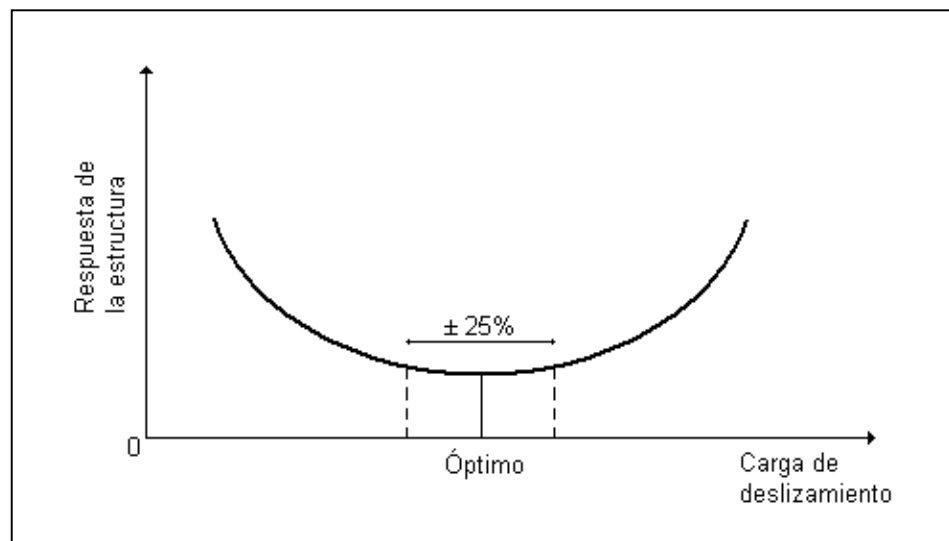


Figura 6.4.
Gráfica de carga de deslizamiento versus respuesta de la estructura.

Algunos autores (20) indican que una variación de $\pm 25\%$ de esta carga óptima de deslizamiento inicial, no incide de forma considerable en la minimización de la respuesta de la estructura, por lo que es aceptable.-

6.3. Obtención de la carga de deslizamiento inicial.

La carga de deslizamiento inicial con la se trabaja en el modelo, debe estar en el rango de aceptación de la carga óptima para los dispositivos SBC instalados en la estructura.-

Para poder encontrar el valor de esta carga de deslizamiento inicial, se utiliza un proceso iterativo con el método de tiempo historia, en su modo no-lineal y con integración directa.-

Cada ciclo de este proceso iterativo, comprende una serie de pasos, a saber:

1. Elección de los disipadores a utilizar, de acuerdo a la carga de deslizamiento inicial utilizada.
2. Cálculo de las diagonales donde se disponen los disipadores SBC.
3. Se procede a analizar el modelo, con el objeto de conocer el comportamiento de los disipadores y de la estructura con respecto al caso base. Los ítems que se analizan son los desplazamientos, velocidades y aceleraciones, fuerzas acumuladas por piso (momentos y cortes), comportamiento histerético de los disipadores y desempeño de los distintos elementos de la estructura, a saber, vigas, columnas y diagonales.
4. Con los datos anteriores tabulados, se vuelve al paso 1.

Una vez tabulados una suficiente cantidad de casos de carga de deslizamiento inicial, se elige aquella que nos entregue la mejor respuesta tanto del comportamiento de los dispositivos como el de la estructura. De esta forma, nos aseguramos de que nuestra carga elegida esté en el rango de validez del valor óptimo.-

Como resultado del proceso iterativo anteriormente descrito, se decide diseñar tres tipos de dispositivos, cada uno con una carga de deslizamiento inicial propia. Para los niveles 1 al 5 se diseñaron disipadores SBC con carga de deslizamiento inicial de 45 [Ton], para los pisos 6, 7 y 8 se diseñaron dispositivos con carga de deslizamiento de 40 [Ton], y para los niveles 9 y 10, se diseñaron SBC con carga inicial de 35 [Ton].-

6.4. Dispositivos escogidos.

Teniendo claro las cargas iniciales de deslizamiento para cada grupo de dispositivos, el siguiente paso es con éste dato, encontrar la fuerza de pretensión y la cantidad de pernos que debe tener el dispositivo correspondiente. Estos se valores se pueden calcular utilizando la fórmula para el diseño de pernos de alta resistencia de tipo deslizamiento crítico, dispuesta en la especificación “*Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*” (2):

$$\phi \cdot R_n = \mu \cdot D_u \cdot h_{sc} \cdot T_b \cdot N_s \cdot N_b \quad (6.1)$$

Donde:

ϕ : Factor que depende si escogemos el diseño según nivel de servicio o según el nivel de resistencia. En este caso el diseño será según nivel de servicio, por lo que $\phi = 1$.

R_n : Resistencia al deslizamiento. En este caso corresponde a las cargas de deslizamiento inicial planteadas anteriormente (45, 40 y 35 toneladas, ver Capítulo 6.3.).

μ : Coeficiente de roce entre las superficies. En este caso es de 0,5.

D_u : Es un factor de sobre pretensión promedio, y es 1,13.

h_{sc} : Es un factor de perforación. En este caso es 1 pues dispondremos de agujeros de dimensión normal para cada perno en la dirección transversal a la dirección de la carga.

T_b : Pretensión requerida para los pernos de alta resistencia.

N_s : Número de planos de deslizamiento. En este caso son 2 los planos de deslizamiento.

N_b : Número de pernos. El número de pernos es de 4 dispuestos en dos hileras paralelas de 2 pernos cada una.

Tomando los valores correspondientes al caso en estudio, la ecuación (6.1) queda expresada como:

$$\begin{aligned} R_n &= 0,5 \cdot 1,13 \cdot T_b \cdot 2 \cdot 4 \\ R_n &= 4,520 \cdot T_b \end{aligned} \quad (6.2)$$

De esta forma podemos encontrar la pretensión necesaria para los pernos de alta resistencia para cada requerimiento de carga según tipo de dispositivo (ver Capítulo 6.3.):

- a) Pretensión requerida para pernos de SBC de pisos 1-5:

$$45 = 4,520 \cdot T_b \quad \rightarrow \quad T_b = 9,956 [Ton] = 21,949 [Kip]$$

- b) Pretensión requerida para pernos de SBC de pisos 6-8:

$$40 = 4,520 \cdot T_b \quad \rightarrow \quad T_b = 8,850 [Ton] = 19,511 [Kip]$$

- c) Pretensión requerida para pernos de SBC de pisos 9-10:

$$35 = 4,520 \cdot T_b \quad \rightarrow \quad T_b = 7,743 [Ton] = 17,070 [Kip]$$

En la Tabla 6.1., extraída de la especificación “*Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings*” (2), se aprecia la pretensión mínima para pernos de alta resistencia, según el tamaño del perno.-

TABLE J3.1		
Minimum Bolt Pretension, kips*		
Bolt Size, in.	A325 Bolts	A490 Bolts
1/2	12	15
5/8	19	24
3/4	28	35
7/8	39	49
1	51	64
1 1/8	56	80
1 1/4	71	102
1 3/8	85	121
1 1/2	103	148

*Equal to 0.70 times the minimum *tensile strength* of bolts, rounded off to nearest kip, as specified in ASTM specifications for A325 and A490 bolts with UNC threads.

Tabla 6.1.
Pretensión mínima para pernos de alta resistencia.

Dados estos valores, la elección de los pernos para cada tipo de dispositivos es la siguiente:

- a) Dispositivos SBC de niveles 1 – 5:
Constarán de 4 pernos de alta resistencia A325 de 3/4", con una pretensión para cada perno de 9,956 [Ton].

- b) Dispositivos SBC de niveles 6 – 8:
Constarán de 4 pernos de alta resistencia A325 de 3/4", con una pretensión para cada perno de 8,850 [Ton].

- c) Dispositivos SBC de niveles 9 – 10:
Constarán de 4 pernos de alta resistencia A325 de 3/4", con una pretensión para cada perno de 7,743 [Ton].

Para darles la pretensión adecuada a cada uno de los pernos de alta resistencia existen varios métodos, de los cuales se eligió el método de las Golillas DTI (con indicador de Tensión Directa).-

Los Indicadores de Tensión Directa (DTI) son dispositivos simples pero muy precisos a la hora de asegurar que los pernos sean instalados al valor de la tensión mínima especificada. Los DTI miden la tensión del perno independientemente de la torsión aplicada. Los DTI son dispositivos endurecidos con la forma de una arandela con protuberancias en una de sus caras, manufacturados de acuerdo a las especificaciones ASTM F959 (Fig. 6.5).-



Figura 6.5.
Indicador de Tensión Directa (DTI).

Cuando un DTI es instalado en un perno con las protuberancias contra la parte de debajo de la cabeza del perno o contra una arandela endurecida, existe una separación notable debido a las protuberancias. A medida que el perno es apretado, las protuberancias son reducidas. Mientras más se aprieta el perno, aumentando la tensión del mismo, más se aplastan las protuberancias. Cuando las protuberancias se han aplastado de modo que la separación ha sido reducida a la dimensión requerida, el

perno ha sido tensionado correctamente, y se ha alcanzado la fuerza de apretamiento requerida (Fig. 6.6.).-

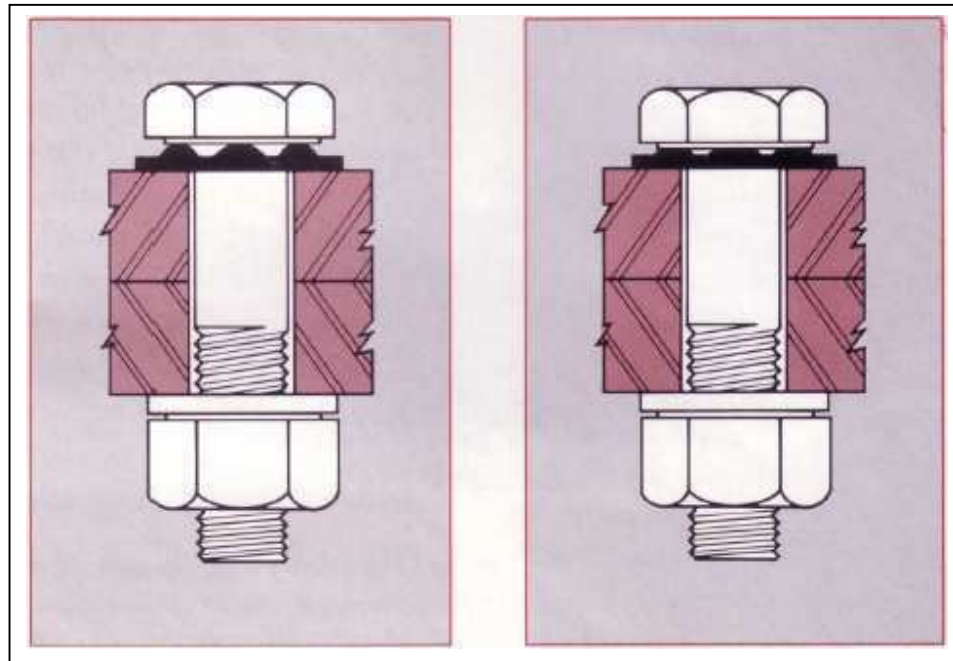


Figura 6.6.
Aplastamiento de las protuberancias del DTI.

Para asegurar que los DTI son instalados correctamente, “calibradores de lámina” de 0,015 pulgadas de espesor se proveen con los envíos de los DTIs. Para asegurarse de que los DTIs han sido correctamente comprimidos y que el perno ha sido apretado, el “calibrador de lámina” apropiado no debe entrar entre las protuberancias (Fig. 6.7.).-

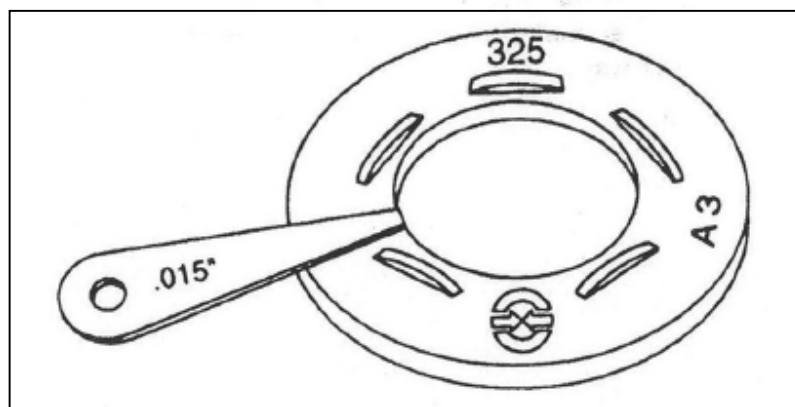


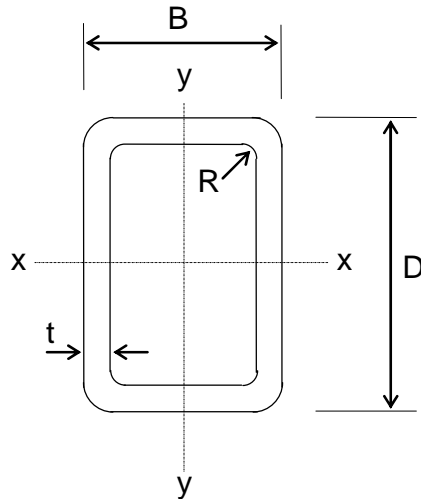
Figura 6.7.
Calibrador de lámina para los DTI.

Se debe hacer notar que el método de pretensión escogido no excluye la posibilidad de utilizar otros métodos alternativos que puedan tener otra precisión, como el método de la vuelta de tuerca o la utilización de llaves dinamométricas, pues hay que recordar que pequeñas variaciones en la fuerza de desplazamiento inicial de los dispositivos, no alteran en mayor medida la respuesta de la estructura (Fig. 6.4.).-

Una vez obtenidos en detalle las características de los dispositivos, queda determinar el perfil que se utilizará como diagonal para poder montar en ella los dispositivos. Este análisis corresponde al cálculo de un perfil de acero A36, que sea capaz de soportar una carga axial de compresión correspondiente a la fuerza de deslizamiento inicial del dispositivo SBC que soporta, ya que una vez superada esa carga, la diagonal ya no recibe esfuerzo adicional, pues entra en funcionamiento el SBC.-

De esta forma, el diseño de las diagonales según cada grupo de esfuerzo de deslizamiento es:

a) Para las diagonales de los niveles 1 – 5:



Perfil sección cajón □ 150x150x26,4

$$B = 15 \text{ [cm]}$$

$$D = 15 \text{ [cm]}$$

$$t = 6 \text{ [mm]}$$

$$R = 9 \text{ [mm]}$$

$$A = 33,6 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$i_x = 5,83 \text{ [cm]}$$

$$i_y = 5,83 \text{ [cm]}$$

$$\frac{K \cdot L}{r} = \frac{1 \cdot 500}{5,83} = 85,763 < 200 \text{ (aceptable)} ; f_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L}{r}\right)^2} = 2,819 \text{ [Ton/cm}^2\text{]}$$

$$\lambda_p = 1,12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 32,268 ; \lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 40,335 ; \frac{b}{t} = \frac{150 - 2 \cdot 6}{6} = 23$$

$$\frac{b}{t} < \lambda_p \Rightarrow \text{sección compacta.}$$

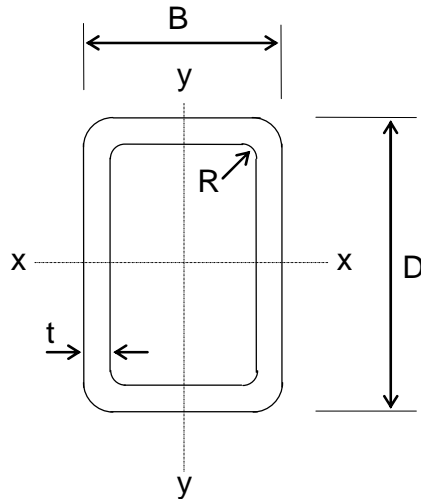
$$4,71 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 135,697 \Rightarrow \frac{K \cdot L}{r} < 4,71 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\therefore f_{cr} = \left[0,658 \begin{matrix} f_y/f_e \\ \end{matrix} \right] \cdot f_y = 1,738 \text{ [Ton/cm}^2\text{]}$$

$$\phi \cdot P_n = 0,9 \cdot A_g \cdot f_{cr} = 0,9 \cdot 33,6 \cdot 1,738 = 52,557 \text{ [Ton]}$$

$$F.U. = \frac{P_u}{\phi \cdot P_n} = \frac{45}{52,557} = 0,856$$

b) Para las diagonales de los niveles 6 – 8:



Perfil sección cajón □ 150x150x22,3

$$B = 150 \text{ [cm]}$$

$$D = 150 \text{ [cm]}$$

$$t = 5 \text{ [mm]}$$

$$R = 7,5 \text{ [mm]}$$

$$A = 28,4 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$i_x = 5,88 \text{ [cm]}$$

$$i_y = 5,88 \text{ [cm]}$$

$$\frac{K \cdot L}{r} = \frac{1 \cdot 500}{5,88} = 85,034 < 200 \text{ (aceptable)} ; f_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L}{r}\right)^2} = 2,866 \text{ [Ton/cm}^2\text{]}$$

$$\lambda_p = 1,12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 32,268 ; \lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 40,335 ; \frac{b}{t} = \frac{150 - 2 \cdot 5}{5} = 28$$

$$\frac{b}{t} < \lambda_p \Rightarrow \text{sección compacta.}$$

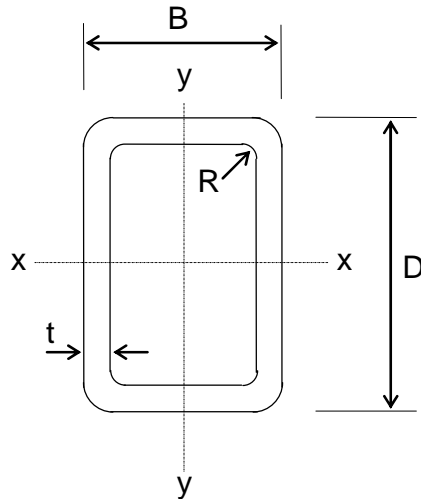
$$4,71 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 135,697 \Rightarrow \frac{K \cdot L}{r} < 4,71 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\therefore f_{cr} = \left[\begin{array}{c} f_y/f_e \\ 0,658 \end{array} \right] \cdot f_y = 1,749 \text{ [Ton/cm}^2\text{]}$$

$$\phi \cdot P_n = 0,9 \cdot A_g \cdot f_{cr} = 0,9 \cdot 28,4 \cdot 1,749 = 44,704 \text{ [Ton]}$$

$$F.U. = \frac{P_u}{\phi \cdot P_n} = \frac{40}{44,704} = 0,895$$

c) Para las diagonales de los niveles 9 – 10:



Perfil sección cajón □ 135x135x23,3

$$B = 13,5 \text{ [cm]}$$

$$D = 13,5 \text{ [cm]}$$

$$t = 6 \text{ [mm]}$$

$$R = 9 \text{ [mm]}$$

$$A = 29,72 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$i_x = 5,21 \text{ [cm]}$$

$$i_y = 5,21 \text{ [cm]}$$

$$\frac{K \cdot L}{r} = \frac{1 \cdot 500}{5,21} = 95,969 < 200 \text{ (aceptable)} ; f_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L}{r}\right)^2} = 2,250 \text{ [Ton/cm}^2\text{]}$$

$$\lambda_p = 1,12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 32,268 ; \lambda_r = 1,40 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 40,335 ; \frac{b}{t} = \frac{135 - 2 \cdot 6}{6} = 20,5$$

$$\frac{b}{t} < \lambda_p \Rightarrow \text{sección compacta.}$$

$$4,71 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 135,697 \Rightarrow \frac{K \cdot L}{r} < 4,71 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\therefore f_{cr} = \left[\begin{array}{c} f_y/f_e \\ 0,658 \end{array} \right] \cdot f_y = 1,580 \text{ [Ton/cm}^2\text{]}$$

$$\phi \cdot P_n = 0,9 \cdot A_g \cdot f_{cr} = 0,9 \cdot 29,72 \cdot 1,580 = 42,262 \text{ [Ton]}$$

$$F.U. = \frac{P_u}{\phi \cdot P_n} = \frac{35}{42,262} = 0,828$$

En la Tabla 6.2. y la Figura 6.8. se resumen las características de los tres tipos de dispositivos SBC escogidos.-

SBC	Nivel	①	②			③		④		⑤			⑥
			Placa central			Perfiles canal		Placas de contacto (Brass)		Pernos A325			Largo
			Diagonal	Espesor [mm]	Ancho [cm]	Largo [cm]	Tipo	Largo [cm]	Ancho [cm]	Largo [cm]	Cantidad	Tamaño	Pretensión [Ton]
Tipo 1	1 - 5	□ 150x150x26,4	6	20	40	C 150x50x9,1	65	15	35	4	3/4"	9,956	8
Tipo 2	6 - 8	□ 150x150x22,3	8	20	40	C 150x50x9,1	65	15	35	4	3/4"	8,85	8
Tipo 3	9 - 10	□ 135x135x23,3	6	18,5	40	C 150x50x9,1	65	15	35	4	3/4"	7,743	8

Tabla 6.2.
Características de los SBC escogidos.

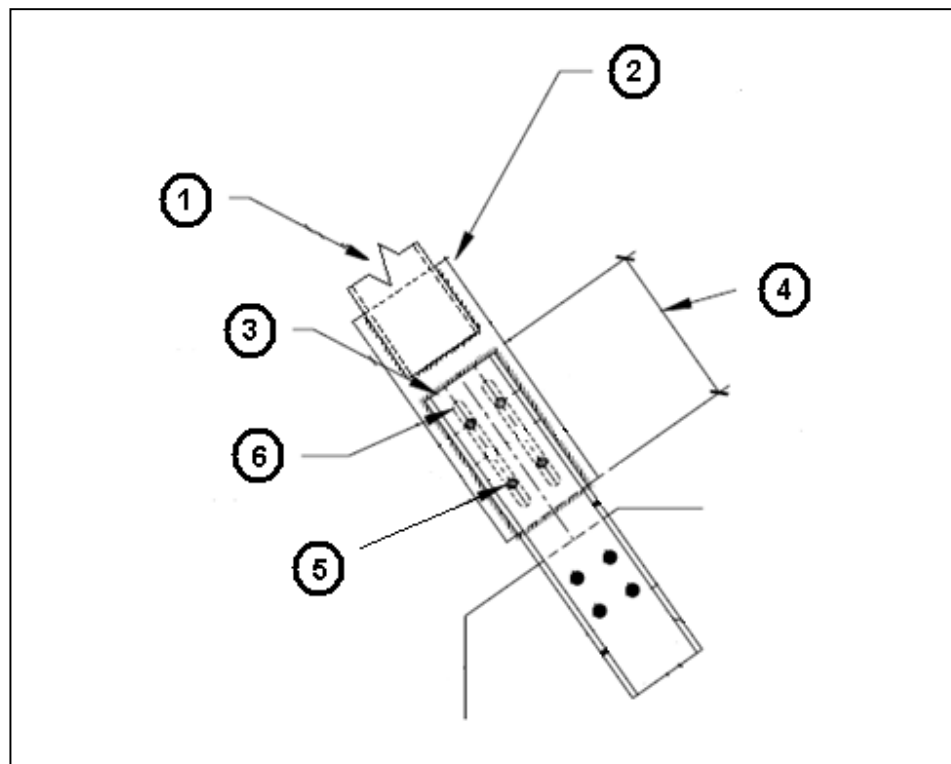


Figura 6.8.
Detalles de los SBC escogidos.

6.5. Ubicación de los dispositivos SBC en la estructura.

6.5.1. Disposición en los marcos estructurales.

La disposición escogida para ubicar los dispositivos SBC en los marcos estructurales fue la diagonal simple, debido a la fácil materialización y montaje. La Figura 6.9. nos muestra un esquema de la disposición elegida.-

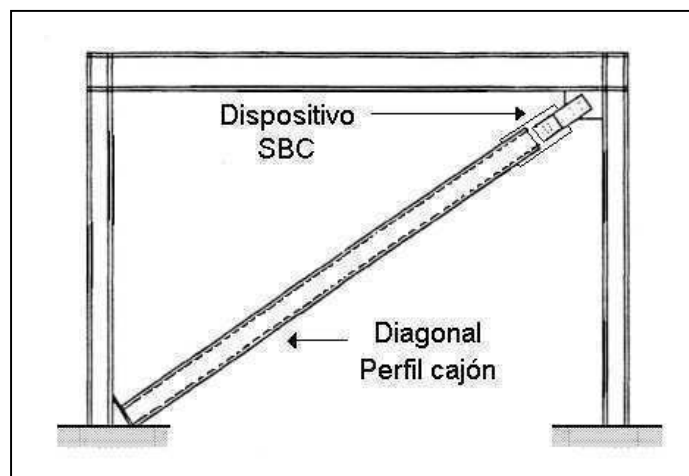


Figura 6.9.
Esquema de la localización de los SBC.

6.5.2. Distribución en la estructura.

La ubicación que los dispositivos deben ocupar en la estructura no es un problema totalmente resuelto, ya que es objeto de un sin número de investigaciones a nivel mundial, las cuales apuntan a averiguar cuál o cuáles son los puntos más adecuados dentro de la estructura para la instalación, en ellos, de dispositivos disipadores de energía.-

De esta forma, se dispusieron dispositivos SBC a través de las líneas verticales de marcos ubicados en el centro de la estructura (Fig. 6.10.). Se eligió esta disposición

en los marcos interiores dado que elegir una diagonal simple implicaría montar perfiles de más de 6 metros de longitud, es decir, un elemento muy esbelto, en cambio, con la disposición elegida, tenemos una configuración similar a la de los marcos perimetrales y además tenemos elementos más compactos.-

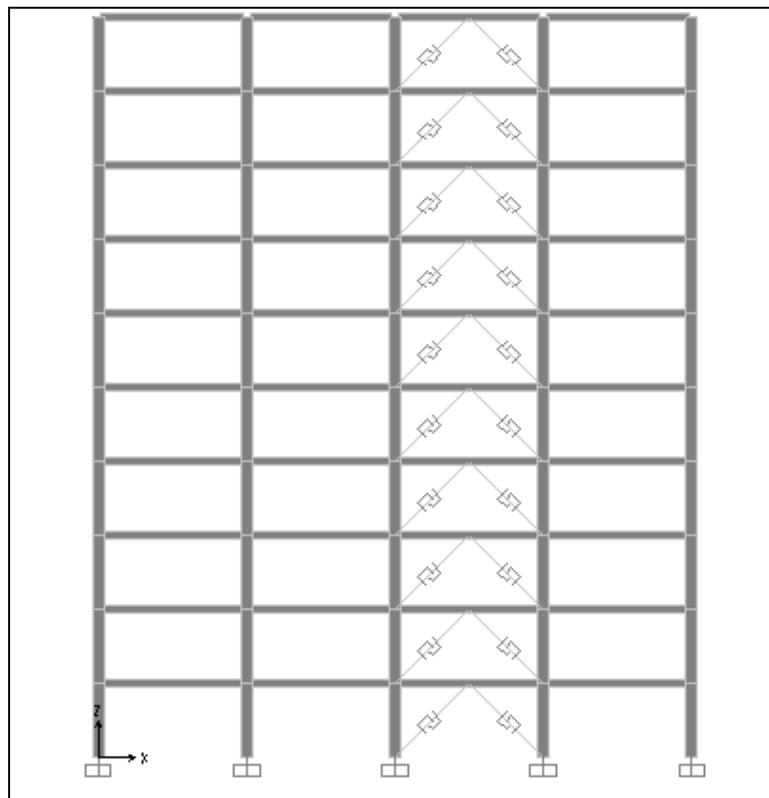


Figura 6.10.
Distribución de los dispositivos en un eje central.

Además de lo anterior, en cada una de las fachadas del edificio, se eligió una línea vertical de marcos para instalar los dispositivos SBC. La configuración final en los ejes periféricos, se puede observar en la Figura 6.11.-

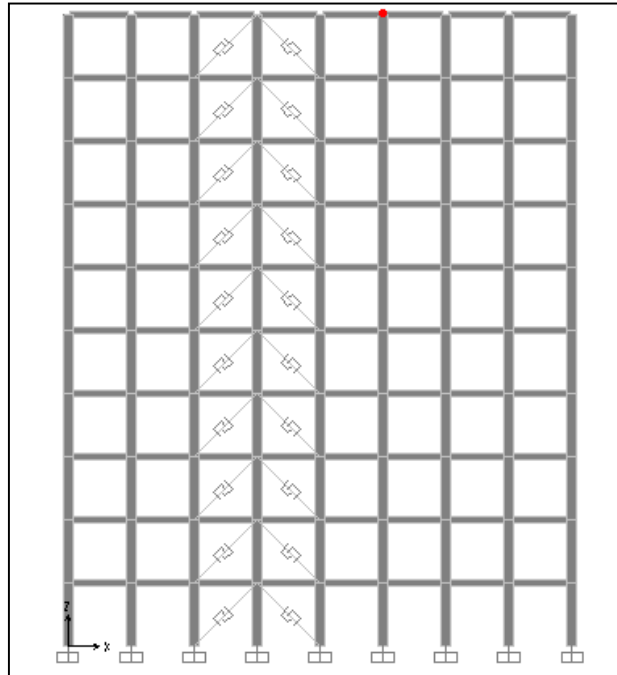


Figura 6.11.
Distribución de los dispositivos en un eje perimetral.

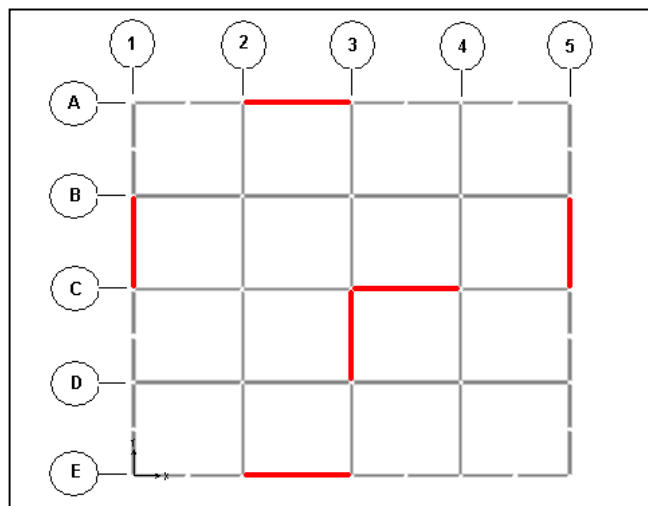


Figura 6.12.
Distribución de los dispositivos según ejes.

En la Figura 6.12. se puede observar una planta de la estructura, en la cual se distingue la distribución de los disipadores SBC según los ejes principales.-

6.6. Modelación computacional de los disipadores SBC.

El elemento utilizado para representar el comportamiento de los dispositivos SBC en SAP 2000 fue el “*hinge*” del tipo de esfuerzo axial, el cual puede modelar deformaciones y propiedades no lineales de piezas metálicas en un grado de libertad determinado y representa correctamente el fenómeno de disipación de energía a través de la fricción seca entre dos placas metálicas.-

Lo primero que se debe hacer es definir las características de la propiedad *hinge* para que represente al dispositivo SBC. Para esto se debe abrir el menú principal de esta propiedad, elegir el tipo de propiedad dúctil y en el submenú la opción de carga axial P (Fig. 6.13.). Luego, se debe entrar en el menú de propiedades de *hinge*.-

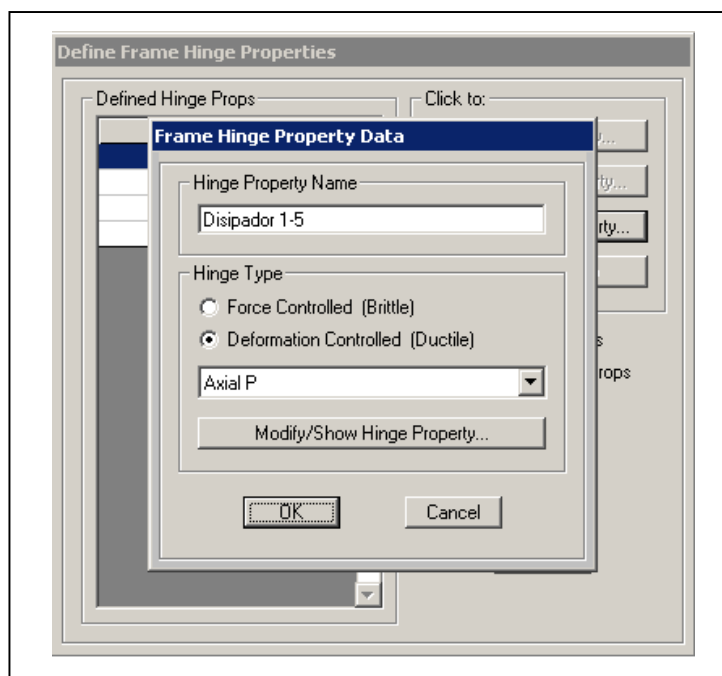


Figura 6.13.
Definición general del SBC con la propiedad *hinge*.

Las propiedades de este tipo de *hinge* difieren de las establecidas para definir a las rótulas plásticas, en este caso el tipo de comportamiento se establece en una gráfica de tipo fuerza – desplazamiento. Además, los parámetros de control de desplazamiento deben ser tales que conformen una curva que sea representativa de la típica curva de histéresis característica de los SBC, es decir un comportamiento elástico hasta llegar a la carga de deslizamiento inicial, y desde allí un comportamiento plástico caracterizado por una meseta horizontal. Por último se establecen la fuerza de desplazamiento inicial y el movimiento relativo máximo entre placas (Fig. 6.14.). Este proceso se debe hacer para definir cada tipo de disipador SBC (tipo 1, 2 y 3).-

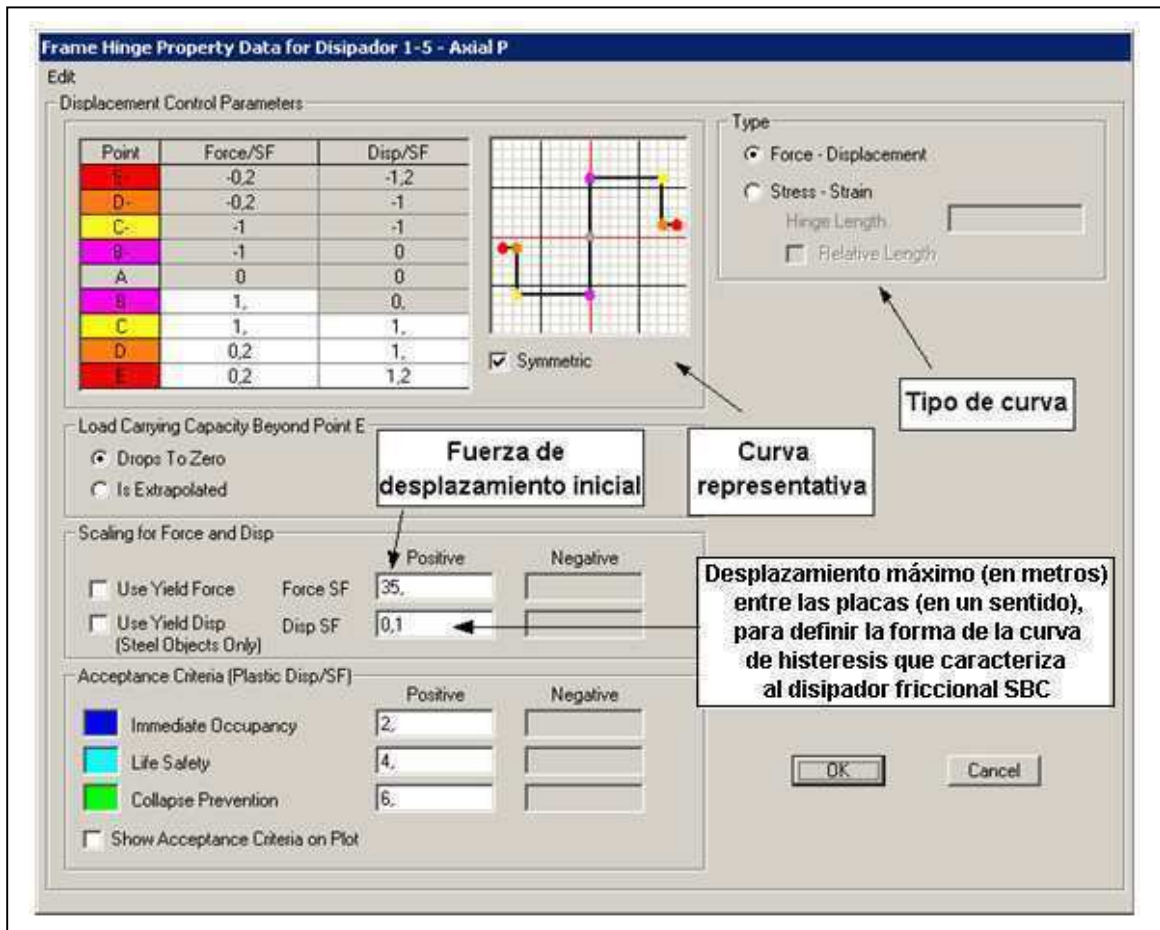


Figura 6.14.
Propiedades del *hinge* que caracterizan al SBC.

Una vez definida la propiedad *hinge* que caracteriza a cada dispositivo SBC, se deben asignar a las correspondientes diagonales que los contienen. La propiedad se asigna en la diagonal a $0,1 \cdot L$ de distancia del extremo inferior del perfil, siendo L la longitud total de la diagonal (Fig. 6.15.)-

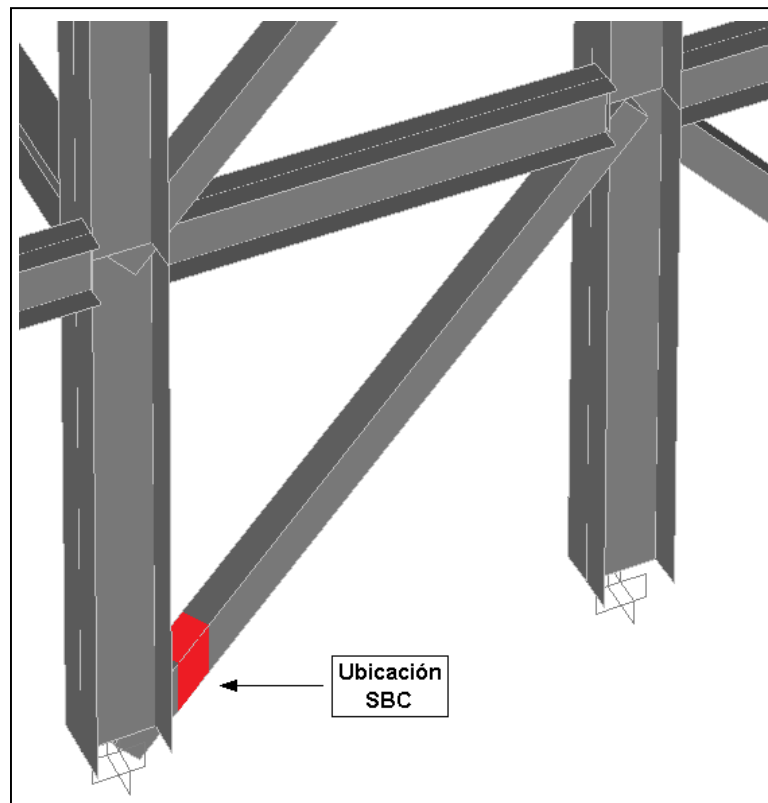


Figura 6.15.
Ubicación de los SBC en las diagonales del modelo.

6.7. Modelación de marcos.

La norma en estudio, tiene como uno de sus requerimiento el de cumplir con un valor mínimo para el corte basal de la estructura sin los dispositivos ni sus diagonales en que están montados. Esto con el fin de que la estructura tenga una resistencia mínima aún después de una posible falla en el funcionamiento de los disipadores.-

Por otro lado, para aprovechar al máximo el funcionamiento de los dispositivos, se procede a liberar de las cargas de momento a los marcos, con excepción de los marcos perimetrales y aquellos que poseen dispositivos SBC (Fig. 6.16.). Esto se materializó en el modelo, con la opción *RELEASES*, soltando en las vigas los momentos en los ejes mayor y menor (Fig. 6.17.).-

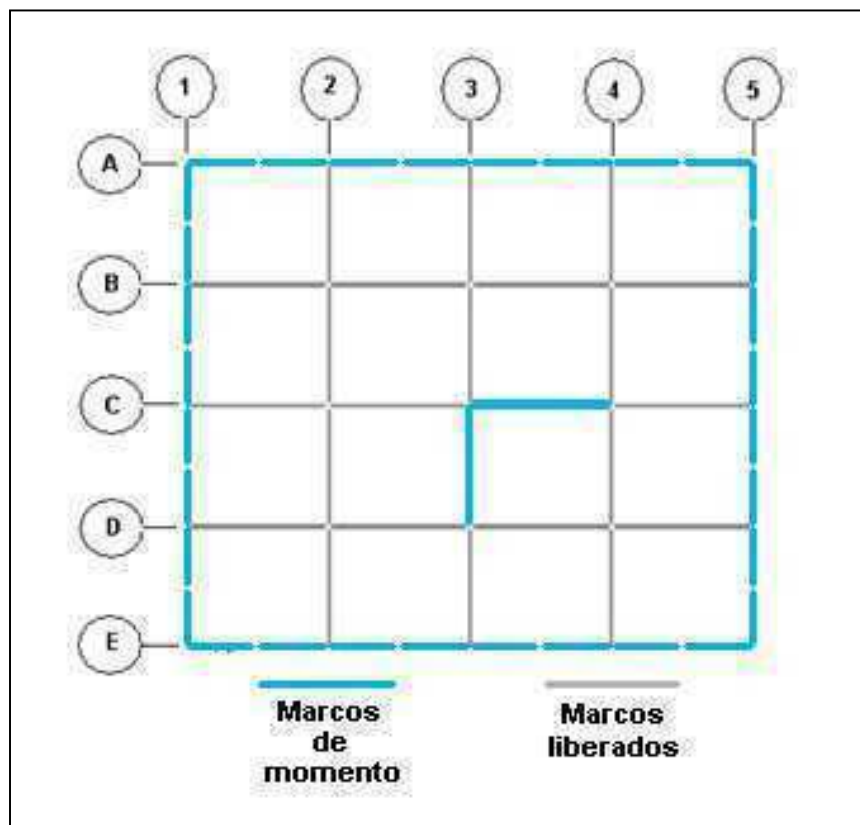


Figura 6.16.
Distribución de marcos de momento para el caso SBC.

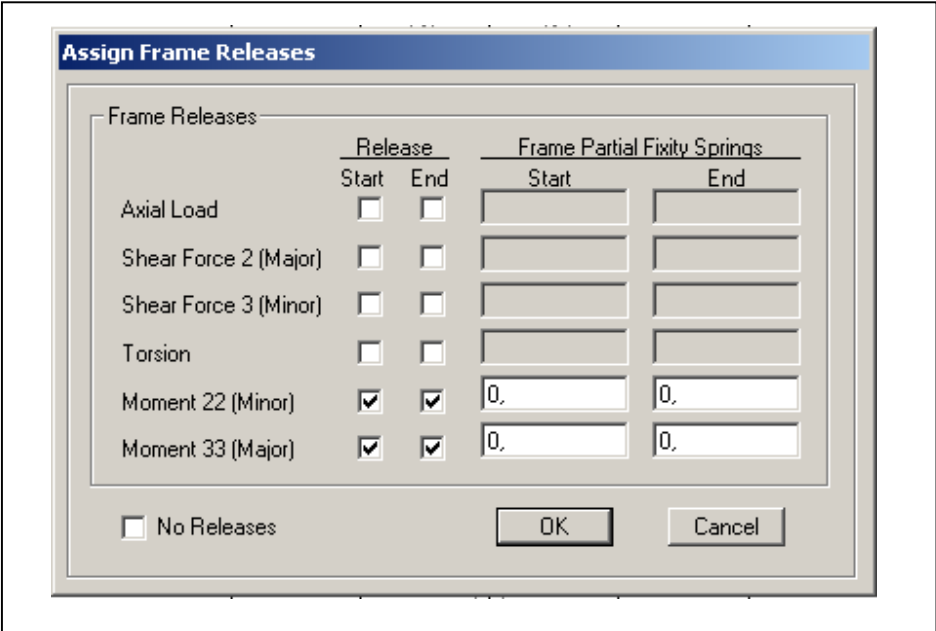


Figura 6.17.
Configuración de la opción *RELEASES*.

CAPÍTULO 7.

ANÁLISIS TIEMPO-HISTORIA DE LA ESTRUCTURA PROVISTA DE LOS SBC.

7.1. Introducción.

En este capítulo se resumen los resultados del análisis del modelo con la incorporación de los dispositivos *Slotted Bolted Connection*, utilizando los mismos registros escogidos anteriormente (Viña del Mar, Llolleo y Artificial), y el mismo tipo de análisis tiempo historia.-

7.2. Requerimientos de la estructura sismorresistente.

En el proyecto de norma se establecen primeramente tres conceptos fundamentales: el *sistema sismorresistente*, la *estructura sismorresistente*, y el *sistema disipador*.-

El *sistema sismorresistente* está formado por el conjunto estructura-disipadores. La *estructura sismorresistente* lo compone el sistema sismorresistente excluyendo los dispositivos disipadores. Por último, el *sistema disipador* lo conforman los dispositivos SBC junto con los elementos que los soportan.-

Además de los requerimientos para diseñar de forma óptima el *sistema disipador*, existe un requerimiento específico con respecto a la *estructura sismorresistente*. El corte basal de la *estructura sismorresistente*, no debe ser menor que $0,6 \cdot V$, siendo V el corte sísmico basal en la dirección de interés dado por la norma NCh433, para el caso de análisis de la estructura inicial sin disipadores.-

Corte	Cantidad [Ton]
Qx	229,891
Qy	252,744

Tabla 7.1.
Cortes basales de la estructura inicial.

En la Tabla 7.1. se establecen los cortes basales calculados según el diseño de la norma NCh433 (método CQC), para el caso de la estructura original sin disipadores.-

Corte	Cantidad [Ton]
Qx	180,300
Qy	193,397

Tabla 7.2.
Cortes basales de la estructura sismorresistente (caso SBC).

En la Tabla 7.2. se establecen los cortes basales de la estructura sismorresistente calculados según el diseño de la norma Nch433 (método CQC), para el caso SBC pero solamente tomando en cuenta la estructura sismorresistente, quitando todas la diagonales y disipadores de la estructura, y manteniendo la distribución de marcos de momento para el caso SBC (Fig. 6.16.).-

Analizando los resultados podemos observar que el corte basal de la estructura sismorresistente es un 78,4% del corte basal calculado en la estructura inicial, para la dirección X y de un 76,5%para la dirección Y, por lo que el requerimiento se cumple.-

Al estudiar los factores de utilización para los elementos de esta estructura modificada, se tiene que los factores encontrados para las combinaciones de cargas que consideran sólo cargas verticales, son muy altos, mientras que los calculados para

las combinaciones de carga que si contemplan solicitaciones sísmicas, son más que razonables.-

En la Figura 7.1. se pueden observar los factores de utilización de los elementos más cargados en la dirección X de análisis (eje D). Estos factores resultan de la aplicación de la combinación de carga número dos establecida en el Capítulo 3.7., la cual toma en cuenta sólo cargas verticales estáticas.-

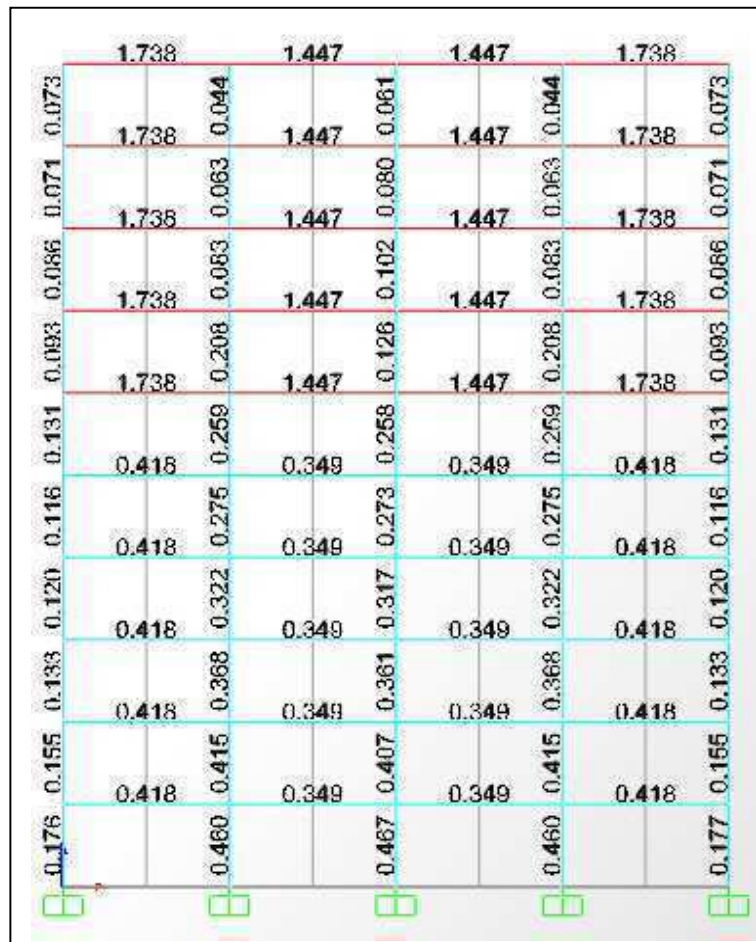


Figura 7.1.

Factores de utilización de los elementos más solicitados en la dirección X (eje D).

La Figura 7.2. nos presenta los factores de utilización de los elementos más solicitados en la dirección Y de análisis (eje 2). De la misma forma que en la dirección de análisis X, estos factores resultan de la aplicación de la combinación de carga número dos establecida en el Capítulo 3.7., la cual toma en cuenta sólo cargas verticales estáticas.-

	1.024	0.811	0.811	1.024
0.066	1.024	0.044	0.811	0.044
0.071	1.024	0.063	0.811	0.063
0.083	1.024	0.083	0.811	0.083
0.093	1.024	0.208	0.811	0.208
0.131	0.283	0.259	0.242	0.259
0.109	0.283	0.275	0.225	0.275
0.116	0.283	0.322	0.225	0.322
0.126	0.283	0.368	0.225	0.368
0.153	0.283	0.415	0.225	0.415
0.183	0.460	0.433	0.460	0.433
	0.183	0.153	0.183	0.153

Figura 7.2.

Factores de utilización de los elementos más solicitados en la dirección Y (eje 2).

Los factores de utilización determinados para el eje D son notoriamente altos. Sin embargo se debe tener en cuenta que estos valores no consideran el aporte que

realiza la losa a las vigas en cuanto al momento de inercia, por lo que si consideramos ésto, los factores de utilización serían menores. La solución a este problema es la de cambiar estas vigas por unas que si resistan esta combinación de cargas. Para efectos del estudio, esto último no afectaría de manera significativa en los análisis posteriores ya que estas vigas han sido modificadas para no transmitir momentos, han sido rotuladas en sus extremos, lo que significa que no son vigas sísmicas, por lo que un cambio en su sección no modifica la respuesta del edificio ante las solicitaciones de los registros. Además, las vigas que si son sísmicas, es decir, que no están rotuladas, tienen factores de utilización inferiores a la unidad en todos los casos, como se ejemplifica en la Figura 7.3., donde se detallan los factores de utilización para el eje C, que posee marcos de momento donde claramente los factores de utilización son aceptables.-

	1.664	1.436	0.730	1.664
0.072	1.664	0.042	0.166	0.129
0.070	1.664	1.436	0.718	1.664
0.085	1.664	0.060	0.119	0.106
0.092	1.664	1.436	0.156	0.141
0.130	1.664	0.103	0.175	0.161
0.114	0.401	0.242	0.298	0.291
0.118	0.401	0.347	0.308	0.299
0.131	0.401	0.301	0.349	0.343
0.153	0.401	0.344	0.389	0.385
0.174	0.401	0.347	0.440	0.436
0.072				
0.070				
0.085				
0.092				
0.130				
0.114				
0.118				
0.131				
0.153				
0.174				

Figura 7.3.
Factores de utilización de elementos del eje C.

Como resumen, se puede decir que con esta configuración de marcos de momento: se aumentan los períodos de los modos con mayor masa traslacional, los desplazamientos de la estructura también aumentan debido a la disminución de marcos de momento, y como ya se ha visto, el corte basal se reduce hasta llegar a un 78,4% en el eje X y un 76,5% en el eje Y.-

7.3. Método de análisis escogido.

Para el caso SBC (Estructura con la incorporación de los disipadores SBC), se utiliza el mismo tipo de análisis escogido para el caso con la estructura sin los disipadores, el análisis tiempo-historia no lineal, transiente, con integración directa y con el método *Hilber-Hughes-Taylor Alpha*.-

Para hacer válida la comparación entre los análisis de la estructura con y sin disipadores, en ambos casos se utilizaron los mismos valores para definir el análisis tiempo historia en SAP2000 y además se escogieron los mismos registros en sus correspondientes direcciones.-

Utilizando este método, se determinan computacionalmente los desplazamientos, velocidades, aceleraciones y esfuerzos de todos los elementos que forman la estructura. Además, se estudia el comportamiento de los dispositivos SBC, en cuanto a su curva de histéresis, desplazamientos relativos máximos y esfuerzo axial solicitado.-

7.4. Obtención de resultados.

En este capítulo se detallan los resultados del análisis tiempo historia de la estructura modificada con la incorporación de los disipadores de energía tipo SBC.-

7.4.1. Resultados para los Registros de Viña del Mar.

A continuación se detallan los desplazamientos, velocidades, aceleraciones y fuerzas por nivel, encontradas en el análisis de respuesta en el tiempo con los registros de Viña del Mar.-

Nivel	Dirección X		Dirección Y	
	Desplazamientos c/r base [cm.]	Desplazamientos entrepisos [cm.]	Desplazamientos c/r base [cm.]	Desplazamientos entrepisos [cm.]
10	20,245	1,751	10,831	0,910
9	18,495	2,246	9,921	0,725
8	16,249	2,656	9,195	0,994
7	13,594	2,840	8,201	1,255
6	10,754	2,654	6,947	0,856
5	8,100	2,210	6,091	1,499
4	5,890	1,910	4,592	1,407
3	3,980	1,731	3,185	1,380
2	2,249	1,465	1,805	1,183
1	0,784	0,784	0,623	0,623

Tabla 7.3.
Desplazamientos (caso SBC) según los registros de Viña del Mar.

Nivel	Velocidades absolutas [m/seg.]	
	Dirección X	Dirección Y
10	0,762	0,689
9	0,689	0,600
8	0,595	0,539
7	0,466	0,484
6	0,446	0,431
5	0,428	0,391
4	0,384	0,350
3	0,368	0,290
2	0,353	0,286
1	0,324	0,290

Tabla 7.4.
Velocidades (caso SBC) según los registros de Viña del Mar.

Nivel	Aceleración absoluta [m/seg ² .]	
	Dirección X	Dirección Y
10	7,092	5,424
9	4,927	3,801
8	4,149	3,968
7	4,027	3,520
6	3,848	3,013
5	3,963	3,181
4	3,528	3,442
3	3,384	3,351
2	3,690	3,150
1	3,322	2,509

Tabla 7.5.
Aceleraciones absolutas (caso SBC) según los registros de Viña del Mar.

Nivel	Dirección X	Dirección Y
	Corte [Ton.]	Corte [Ton.]
10	200,405	137,073
9	342,608	254,925
8	425,285	342,297
7	479,495	458,223
6	582,473	491,764
5	664,448	520,070
4	662,260	505,644
3	570,936	513,730
2	568,553	528,800
1	636,280	544,862

Tabla 7.6.
Esfuerzos de corte (caso SBC) según los registros de Viña del Mar.

En la Tabla 7.7. se pueden observar los desplazamientos totales (distancia entre los desplazamientos máximos de las placas en ambas direcciones) de los SBC con mayor rendimiento. Los ciclos de histéresis de estos SBC se encuentran graficados en el Anexo A.-

Dirección	Tipo	Nivel	Diagonal	Desplazamiento máximo
				[cm]
X	1	1-5	1000	1,737
	2	6-8	1004	1,816
	3	9-10	1008	1,494
Y	1	1-5	1080	1,377
	2	6-8	1061	1,205
	3	9-10	1087	0,732

Tabla 7.7.
Desplazamientos máximos de dispositivos SBC con registros de Viña del Mar.

7.4.2. Resultados para los registros de Lolloe.

A continuación se detallan los desplazamientos, velocidades, aceleraciones y fuerzas por nivel, encontradas en el análisis de respuesta en el tiempo con los registros de Lolloe.-

Nivel	Dirección X		Dirección Y	
	Desplazamientos c/r base [cm.]	Desplazamientos entrepisos [cm.]	Desplazamientos c/r base [cm.]	Desplazamientos entrepisos [cm.]
10	22,529	1,948	11,658	1,229
9	21,048	2,170	11,108	1,556
8	18,915	2,843	10,450	1,922
7	16,087	3,284	9,553	2,090
6	12,957	3,115	8,518	1,996
5	10,251	2,478	7,344	1,709
4	8,248	2,406	5,926	1,716
3	6,202	2,390	4,209	1,773
2	3,819	2,121	2,437	1,581
1	1,400	1,400	0,856	0,856

Tabla 7.8.
Desplazamientos (caso SBC) según los registros de Lolloe.

Nivel	Velocidades absolutas [m/seg.]	
	Dirección X	Dirección Y
10	1,020	0,784
9	0,880	0,631
8	0,784	0,520
7	0,767	0,429
6	0,692	0,432
5	0,661	0,429
4	0,556	0,399
3	0,519	0,377
2	0,501	0,342
1	0,447	0,261

Tabla 7.9.
Velocidades (caso SBC) según los registros de Lolloe.

Nivel	Aceleración absoluta [m/seg ² .]	
	Dirección X	Dirección Y
10	13,630	8,534
9	9,543	5,026
8	9,052	5,141
7	7,103	4,675
6	8,684	5,373
5	7,490	6,658
4	7,378	6,885
3	7,788	5,078
2	8,424	5,665
1	5,852	4,195

Tabla 7.10.
Aceleraciones absolutas (caso SBC) según los registros de Lolloe.

Nivel	Dirección X	Dirección Y
	Corte [Ton.]	Corte [Ton.]
10	436,787	232,159
9	410,245	322,084
8	514,279	368,127
7	536,790	402,990
6	676,347	394,216
5	702,166	455,865
4	759,554	648,787
3	817,324	746,833
2	1012,964	710,659
1	1118,972	758,573

Tabla 7.11.
Esfuerzos de corte (caso SBC) según los registros de Llolleo.

En la Tabla 7.12. se pueden observar los desplazamientos totales (distancia entre los desplazamientos máximos de las placas en ambas direcciones) de los SBC con mayor rendimiento. Los ciclos de histéresis de estos SBC se encuentran graficados en el Anexo B.-

Dirección	Tipo	Nivel	Diagonal	Desplazamiento máximo
				[cm]
X	1	1-5	993	2,393
	2	6-8	1004	3,27
	3	9-10	1009	2,198
Y	1	1-5	1056	1,413
	2	6-8	1063	1,021
	3	9-10	1088	1,121

Tabla 7.12.
Desplazamientos máximos de dispositivos SBC con registros de Llolleo.

7.4.3. Resultados para los registros Artificiales.

A continuación se detallan los desplazamientos, velocidades, aceleraciones y fuerzas por nivel, encontradas en el análisis de respuesta en el tiempo con los registros Artificiales.-

Nivel	Dirección X		Dirección Y	
	Desplazamientos c/r base [cm.]	Desplazamientos entrepisos [cm.]	Desplazamientos c/r base [cm.]	Desplazamientos entrepisos [cm.]
10	22,766	2,632	36,668	4,590
9	21,025	3,192	32,078	5,059
8	19,750	3,485	27,018	5,525
7	17,611	3,642	21,494	5,408
6	14,733	3,282	16,086	4,528
5	11,887	2,864	11,558	2,639
4	9,231	2,883	8,919	2,581
3	6,536	2,804	6,338	2,667
2	3,863	2,495	3,671	2,393
1	1,377	1,377	1,278	1,278

Tabla 7.13.
Desplazamientos (caso SBC) según los registros Artificiales.

Nivel	Velocidades absolutas [m/seg.]	
	Dirección X	Dirección Y
10	1,143	1,109
9	0,995	1,008
8	0,896	0,972
7	0,739	0,936
6	0,681	0,861
5	0,631	0,765
4	0,600	0,653
3	0,572	0,596
2	0,555	0,587
1	0,515	0,592

Tabla 7.14.
Velocidades (caso SBC) según los registros Artificiales.

Nivel	Aceleración absoluta [m/seg ² .]	
	Dirección X	Dirección Y
10	9,566	10,91614
9	6,244	6,83855
8	6,837	6,12556
7	7,105	5,59714
6	5,822	6,44078
5	6,528	6,55038
4	6,815	7,20485
3	5,238	6,04373
2	4,931	5,0807
1	4,372	4,38163

Tabla 7.15.
Aceleraciones absolutas (caso SBC) según los registros Artificiales.

Nivel	Dirección X	Dirección Y
	Corte [Ton.]	Corte [Ton.]
10	266,792	335,839
9	458,897	495,670
8	465,814	626,681
7	584,984	748,129
6	727,881	803,250
5	815,906	846,021
4	928,812	915,777
3	949,418	1003,931
2	1021,547	1076,291
1	1113,215	1121,959

Tabla 7.16.
Esfuerzos de corte (caso SBC) según los registros Artificiales.

En la Tabla 7.17. se pueden observar los desplazamientos totales (distancia entre los desplazamientos máximos de las placas en ambas direcciones) de los SBC con mayor rendimiento. Los ciclos de histéresis de estos SBC se encuentran graficados en el Anexo C.-

Dirección	Tipo	Nivel	Diagonal	Desplazamiento máximo
				[cm]
X	1	1-5	996	2,82
	2	6-8	1003	3,92
	3	9-10	1008	2,979
Y	1	1-5	1040	3,23
	2	6-8	1064	5,38
	3	9-10	1067	4,73

Tabla 7.17.
Desplazamientos máximos de dispositivos SBC con registros Artificiales.

En el Anexo D se presentan gráficas comparativas entre los resultados obtenidos para el Caso Base (estructura sin dispositivos) y el Caso SBC (estructura con dispositivos), que hacen más patente las reducciones en los índices.-

CAPÍTULO 8.
ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.

8.1. Reducción de los índices debido a la incorporación de los SBC.

En cada uno de los ítems analizados se observaron reducciones en sus magnitudes. Esta reducción se presenta a continuación en forma porcentual, de la siguiente forma:

$$\% \text{ de disminución} = \left[\frac{\text{Caso sin disipador} - \text{Caso con disipador}}{\text{Caso sin disipador}} \right] \cdot 100\% \quad (8.1)$$

Estos porcentajes de disminución, para cada uno de los registros escogidos, en cada una de las direcciones de análisis, fueron las siguientes:

Registros de Viña del Mar										
	Despl. c/r a la base		Despl. de entrepisos		Velocidades Abs.		Aceleraciones Abs.		Fuerzas de corte	
Eje	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Nivel	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
10	32,6	37,0	47,7	48,7	47,8	29,8	12,5	24,3	43,0	55,8
9	31,5	36,6	49,0	69,2	45,2	25,5	22,1	26,5	42,3	47,8
8	29,1	33,6	48,6	64,4	39,8	23,7	31,9	24,1	44,8	44,7
7	24,2	30,7	45,2	55,0	40,2	23,6	23,0	22,3	46,0	33,1
6	24,0	28,6	33,7	63,1	39,8	28,5	43,5	42,5	36,1	34,2
5	30,6	24,5	14,8	18,3	43,2	27,0	44,7	38,7	32,7	34,1
4	36,6	30,0	19,8	19,5	41,6	26,5	43,6	31,6	42,8	44,4
3	40,7	34,3	30,0	28,5	27,5	24,7	40,0	26,6	54,5	49,6
2	43,8	38,2	36,1	36,2	11,0	14,5	30,0	29,1	57,1	53,0
1	46,5	41,4	46,5	41,4	-5,7	-1,6	7,4	6,5	53,6	53,3

Tabla 8.1.
Reducción porcentual de índices para los registros de Viña del Mar.

Registros de Lolloe										
	Despl. c/r a la base		Despl. de entrespisos		Velocidades Abs.		Aceleraciones Abs.		Fuerzas de corte	
Eje	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Nivel	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
10	29,2	56,0	45,0	47,3	34,6	40,6	13,5	8,7	35,9	42,6
9	27,1	53,7	44,6	48,4	31,9	46,9	15,8	33,5	53,7	48,5
8	25,3	50,8	40,2	45,4	30,4	47,0	13,7	27,0	47,0	55,4
7	26,2	48,0	38,0	44,9	19,7	49,8	31,8	35,1	49,0	55,4
6	27,0	43,5	26,1	38,5	20,6	35,9	18,8	26,6	36,0	58,8
5	28,0	38,6	19,1	29,9	32,2	31,2	37,2	20,8	46,5	59,9
4	30,3	36,3	18,2	29,3	45,0	28,7	37,1	9,7	46,3	49,3
3	30,8	36,5	12,2	26,1	46,7	21,5	39,3	25,9	46,1	46,0
2	30,7	37,4	16,4	30,3	34,4	14,3	26,6	9,8	42,1	51,9
1	31,4	38,7	31,4	38,7	14,5	11,2	15,6	8,5	41,6	51,1

Tabla 8.2.
Reducción porcentual de índices para los registros de Lolloe.

Registros Artificiales										
	Despl. c/r a la base		Despl. de entrespisos		Velocidades Abs.		Aceleraciones Abs.		Fuerzas de corte	
Eje	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Nivel	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
10	33,6	26,7	46,2	36,3	31,7	44,7	16,5	10,8	46,2	36,5
9	32,7	26,7	44,2	36,9	30,3	46,9	22,3	12,8	37,8	33,7
8	28,4	26,5	42,6	34,4	25,7	44,4	5,2	21,8	45,8	32,2
7	26,3	25,3	36,7	34,8	27,6	39,5	7,3	25,3	34,7	35,3
6	26,0	22,9	27,4	33,0	32,2	33,2	44,6	27,5	30,3	36,0
5	25,5	23,5	21,8	43,2	37,8	32,3	35,1	24,8	34,6	35,2
4	25,5	21,5	22,9	28,7	39,7	36,7	35,9	13,2	34,6	34,8
3	28,7	20,8	24,5	20,2	35,7	34,8	47,7	11,8	40,8	36,3
2	28,7	20,6	23,9	17,2	18,4	27,3	37,1	2,3	40,6	34,7
1	28,0	21,7	28,0	21,7	0,8	5,8	-3,9	2,4	36,1	34,5

Tabla 8.3.
Reducción porcentual de índices para los registros Artificiales.

8.2. Análisis de resultados.

La primera conclusión que se puede obtener al analizar estos resultados es que, la incorporación de los dispositivos SBC en la estructura, produce una efectiva reducción en desplazamientos con respecto a la base, desplazamientos de entrepiso, velocidades absolutas, aceleraciones absolutas y en los esfuerzos de corte de cada uno de los niveles.-

La Tabla 8.4. resume los rangos aproximados de porcentajes en que se produjeron las disminuciones para cada situación:

	Desplazamientos c/r a la base		Desplazamientos de entrepisos		Velocidades Absolutas		Aceleraciones Absolutas		Fuerzas de corte	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
	Rango %	Rango %	Rango %	Rango %	Rango %	Rango %	Rango %	Rango %	Rango %	Rango %
Viña del Mar	24 - 47	24 - 42	14 - 49	18 - 70	-5 - 48	-2 - 30	7 - 45	6 - 43	32 - 58	33 - 56
Llolleo	25 - 32	36 - 56	12 - 45	26 - 49	14 - 47	11 - 50	13 - 40	8 - 36	35 - 54	42 - 60
Artificial	25 - 34	20 - 27	21 - 47	17 - 44	0 - 40	5 - 47	-4 - 48	2 - 28	30 - 47	32 - 37

Tabla 8.4.
Rango porcentual de disminuciones para los registros.

Se debe hacer notar que para confeccionar la Tabla 8.4. se escogieron rangos que incluyen a los porcentajes de disminución representativos de cada índice. Existen algunos porcentajes con valores cercanos a cero e incluso algunos que son negativos, aunque muy pequeños. Estos porcentajes corresponden a variaciones que se produjeron en el primer piso de la estructura y afectan a valores muy menores (como son las velocidades), por lo que se asume que estos valores indican que los dispositivos no produjeron reducciones significativas para este nivel, o que aumentaron en muy poca medida los valores en esos casos, pero finalmente las reducciones son mucho más importantes.-

De esta forma se puede notar que los porcentajes de disminución varían en cada índice según cada registro pero generalmente no de una gran forma, así por ejemplo, los porcentajes de reducción de los desplazamientos con respecto a la base en la dirección X, es bastante similar en para los tres registros, lo mismo ocurre para los desplazamientos de entrepiso en la dirección X y en la disminución de los esfuerzos de corte en el mismo eje.-

También se puede decir que las disminuciones son menores en los primeros pisos y mayores en los últimos, excepto en el caso de los esfuerzos de corte donde las mayores solicitaciones, y por lo tanto, reducciones están en el primer piso, y en el caso de las aceleraciones, donde se observa una mayor disminución en los pisos centrales.-

Se ha dicho que la variable que define a un dispositivo friccional SBC es la carga de deslizamiento inicial con la que comienza a disipar energía mediante el roce, pero para encontrar el sistema óptimo de dispositivos que provean la mayor capacidad de respuesta ante un sismo de diseño, es necesario tener en cuenta otros aspectos como son la disposición del dispositivo en los marcos y la distribución de los mismos en la estructura. Este es un problema que tiene a grandes rasgos tres variables de importancia a tomar en cuenta, y además estas variables no son independientes entre si. En este estudio se escogieron como invariables la disposición en los marcos de los dispositivos y la distribución de los mismos en la estructura, analizando sólo la variación de la carga de deslizamiento inicial, por lo que el diseño final expuesto en este trabajo es muy posible que no sea el óptimo, es decir, que los resultados encontrados pueden ser aún mejores. Hay que hacer notar convenientemente, que el diseño óptimo utilizando estas tres variables es muy complejo, y no hay una metodología oficial ni documentada que nos indique como realizarlo.-

8.3. Comparación de resultados con los obtenidos con otros disipadores.

La comparación se realizará con tres tipos de disipadores pasivos de energía, estudiados en la misma estructura, con los registros Artificiales y una disposición en la estructura, muy similar a la de este estudio. Los disipadores contrastados son: disipadores tipo ADAS, estudio realizado por Daniel Almasio en 2004 (4); marcos con arriostramientos excéntricos, hecho por Andrés Martínez (2004); y disipadores tipo Taylor, realizado por Jose Manuel Morales en (2004). La comparación se realiza en estos términos debido a que los otros trabajos, el análisis de disminución porcentual se realizó únicamente para los registros Artificiales. En la Tabla 8.5. se resumen y comparan los rangos de reducción porcentual para cada índice estudiado, según el registro escogido:

	Despl. c/r a la base		Velocidades Abs.		Aceleraciones Abs.		Fuerzas de corte	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
	Rango %	Rango %	Rango %	Rango %	Rango %	Rango %	Rango %	Rango %
ADAS	15,4 - 25,4	2,9 - 25,5	2,2 - 51,5	-0,1 - 32,8	2,8 - 46,9	12,4 - 52,4	-1,3 - 39	4,1 - 38,5
Arriostramiento Excéntrico	2 - 37		1 - 37		2 - 35		5 - 28	
Taylor	9,04 - 23,47	1,23 - 17,69	-7,20 - 48,99	-1,77 - 32,78	-11,17 - 43,21	-1 - 49	67,54 - 75,39	61,32 - 76,04
SBC	25 - 34	20 - 27	0 - 40	5 - 47	-4 - 48	2 - 28	30 - 47	32 - 37

Tabla 8.5.

Comparación de porcentajes de reducción para los registros Artificiales.

En forma general, los porcentajes de reducción son similares para todos los índices con la salvedad que en el caso de desplazamientos con respecto a la base para niveles bajos, se nota que el sistema SBC reduce más que los otros.-

Se debe tener presente que el comportamiento del disipador tipo Taylor es distinto de los demás ya que éste (el tipo Taylor) es un dispositivo de tipo viscoso, en cambio los otros son de tipo friccional (dispositivos SBC) y de plastificación (dispositivos ADAS y de arriostramiento excéntrico).-

Por último, aunque los porcentajes de reducciones son similares entre los dispositivos, se puede concluir que para la realidad nacional, la alternativa de los SBC

es la más valorable, ya que cuenta con ventajas significativas en comparación con los otros dispositivos:

- Sus componentes se encuentran en nuestro país y son de muy fácil acceso.
- El armado y montaje de los dispositivos es simple, por lo que no se requiere de mano de obra altamente calificada para realizarlo.
- Es de fácil acceso para la realización de controles o mantenimiento.
- Tiene variadas formas de ser instalado en el marco, lo cual permite un mejor aprovechamiento del mismo.
- Puede ser utilizado para actividades sísmicas posteriores a un gran sismo (“replicas”), pues solo requiere de algo de mantenimiento, y está nuevamente en uso.

8.4. Análisis de los requerimientos del proyecto de norma.

Como ya se ha dicho en capítulos anteriores, la elección de los registros de diseño es una materia fundamental para este análisis, esta elección debe realizarse según una rigurosa revisión de las características de los registros, ya que estos deben representar de la mejor forma posible todas las condiciones y variables locales encontradas en el lugar de emplazamiento de la estructura. Esto último, no es una tarea fácil, de hecho, el catastro de registros sísmicos en Chile es bastante escaso, la red de acelerógrafos que hay en el país, es insuficiente para poder tener una gama amplia de excitaciones de un mismo lugar. Esta carencia de excitaciones puede ser suplida con el desarrollo de registros artificiales, realizados mediante programas computacionales, a partir de características definidas, propias de un lugar. A raíz de esto último, muchas veces el método de respuesta en el tiempo deberá contar con registros artificiales para su desarrollo, lo cual implicaría una dificultad extra.-

En el proyecto de norma se pide como requerimiento que la estructura sismorresistente del complejo estructura-disipadores, tenga como mínimo un 60% del corte mínimo de la estructura original, calculado según la norma NCh433. Este requerimiento tiene como espíritu establecer una resistencia mínima necesaria del

complejo estructura-disipadores, para que en una eventualidad de falla de los dispositivos, el edificio aun tenga una resistencia a los esfuerzos provocados por el sismo. Este punto puede ser discutible, ya que en el caso de los dispositivos SBC, éstos pueden ser diseñados de forma que la posibilidad de una falla sea mínima. Hay que notar que al entrar en funcionamiento el dispositivo, éste no transmite más carga axial a la diagonal que la de su diseño, (diagonal diseñada con factores de utilización de 0,85 aproximadamente) por lo que ésta (la diagonal) no podría colapsar. Además, el largo de los agujeros por donde se produce el deslizamiento entre las placas, se diseña de manera que impida totalmente la posibilidad de que la movilidad de los pernos sea mayor. En la estructura modificada con la incorporación de los dispositivos, se tuvo que mantener como marcos de momentos a una buena cantidad de éstos, para poder cumplir con el requerimiento. Pero si se hubiesen liberado de momentos a la mayoría de los marcos, el rendimiento de los dispositivos hubiese sido mejor, ya que hubieran aumentado los desplazamientos de entrepiso que inciden directamente en el actuar de los SBC. Además de esto, se revisaron todos los factores de utilización para las vigas, y en todas aquellas vigas que pertenecen a los marcos de momento, estos factores fueron satisfactorios (menores que 0,8). Se propone, por lo tanto, que éste requerimiento sea menos exigente, ya que de esta forma se podría mejorar el desempeño de los dispositivos y por ende, mejorar la respuesta de la estructura.-

El análisis tiempo historia es la forma más fidedigna de analizar una estructura ante la acción de un sismo de gran magnitud, pero es un análisis bastante complejo. Como se ha visto anteriormente, este análisis consiste en cálculo paso a paso de la respuesta dinámica de una estructura a una carga especificada que puede variar con el tiempo. Computacionalmente existen varias formas de realizar este análisis, cada una con sus particularidades, definiciones de constantes, etc. Normalmente la utilización de estos métodos sin un adecuado manejo de sus características, puede significar horas y hasta días de cálculo computacional, lo que le quita eficiencia al análisis, por lo que es recomendable comprender a fondo cada uno de los sistemas de cálculo, para de esta forma elegir el mejor de ellos según las características del problema a analizar.-

8.5. Conclusiones y comentarios.

- Los disipadores friccionales de energía SBC, reducen efectivamente aceleraciones, desplazamientos, velocidades y esfuerzos de corte, en las estructuras sometidas a un sismo de gran intensidad.
- El nivel de reducción de los índices anteriormente descritos, es a lo menos similar si es que no mejor que los encontrados al realizar análisis con otros dispositivos (ADAS, Taylor y arriostramientos excéntricos). Además, los dispositivos SBC son los que poseen las mejores características para ser implementados a nivel nacional.
- El modelo de análisis sugerido por el proyecto de norma es el que mejor representa la respuesta de una estructura ante un gran sismo, aunque es muy complejo y generalmente requiere de grandes cantidades de tiempo en cálculos computacionales. Existe una opción de análisis denominada *Fast Nonlinear Analysis* (FNA), en base a una superposición modal. Este método de análisis tiempo historia es mucho más rápido que los otros hechos en base a la integración directa. Lamentablemente este método excluye por completo las propiedades *hinges* que definen a las rótulas plásticas y a los disipadores SBC, por lo que no se puede utilizar en este caso. Sin embargo, este sistema de análisis si incluye a los elementos llamados "*Nlink*" con los cuales se pueden modelar una gran variedad de dispositivos no lineales. En el presente estudio, se determinó que la mejor forma de modelar a los disipadores SBC computacionalmente era mediante la propiedad "*hinge*", sin embargo el modelo de este dispositivo también se puede realizar con un elemento "*Nlink*", con un buen grado de aproximación. De esta forma, se podría utilizar el análisis FNA para poder realizar el estudio, reduciendo mucho tiempo de cálculo computacional. Se debe recalcar nuevamente, que este análisis es realizado en base a una superposición modal, por lo que se debe estudiar el grado de precisión del método mediante comparaciones con el método de tiempo historia con integración directa.-

- Del análisis tiempo historia de la estructura original con la definición de rótulas plásticas, se puede decir que para todos los registros el giro plástico no llega a ser mayor que 0,02 rad, por lo que el sistema estructural necesario para llevar a cabo una estructura diseñada según la norma NCh433, es simplemente el *Ordinary Moment Frames*, es decir, un marco con uniones ordinarias para transmitir momento.
- A pesar de que una pequeña variación en la carga de deslizamiento inicial, teóricamente no afecta en gran medida a la respuesta de la estructura contra el sismo, es recomendable realizar mantenimientos para poder asegurar que las condiciones de roce se mantengan según el diseño y además que el apriete de los pernos sea el efectivo.
- Otro punto a tener presente es el tratamiento de las deformaciones remanentes que pueda tener la estructura después de la aplicación de un sismo de gran intensidad. Estas deformaciones remanentes en la estructura pueden provocarse si los dispositivos SBC luego de ser requeridos no vuelven a su posición de equilibrio estático debido las fuerzas restitutivas de la estructura (marcos de momento). Este problema puede resolverse liberando de tensión a los pernos de los dispositivos que poseen más desplazamiento, escalonadamente hasta liberar al dispositivo que presenta menos, en este proceso debería producirse un reacomodo paulatino de las posiciones de equilibrio debido a la acción de las fuerzas restitutivas de los marcos de momento.
- Es necesaria la realización de más estudios que puedan aportar al entendimiento del complejo problema que significa el diseño de los dispositivos pasivos de energía. Se deben estudiar las distintas formas de aplicar los dispositivos en los marcos de la estructura, para comprender como este aspecto influye de manera directa en el rendimiento de los SBC y de que manera al mismo tiempo se puede aprovechar mejor el espacio del marco. Además, se debe estudiar el factor de la distribución de los dispositivos en la estructura, ya que en estos momentos no existe análisis alguno que permita evaluar la importancia que tiene este aspecto en el rendimiento de los

disipadores. Por último, se deben realizar estudios que traten de analizar el problema de diseño tomando en consideración estas tres variables relevantes, para de esta forma poder llegar al sistema óptimo de disipación.-

ANEXO A

**CICLOS DE HISTÉRESIS
DE DISPOSITIVOS SBC
MEDIDOS PARA LOS REGISTROS DE
VIÑA DEL MAR**

A.1. Dirección X.

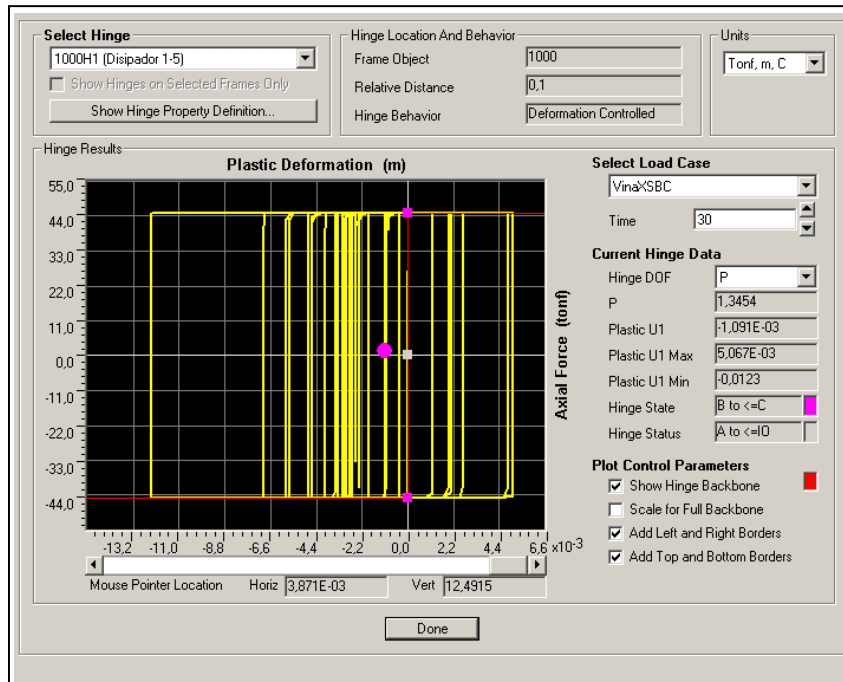


Figura A.1.
 Ciclo de histéresis, disipador tipo 1, registro *Viña del Mar X*.

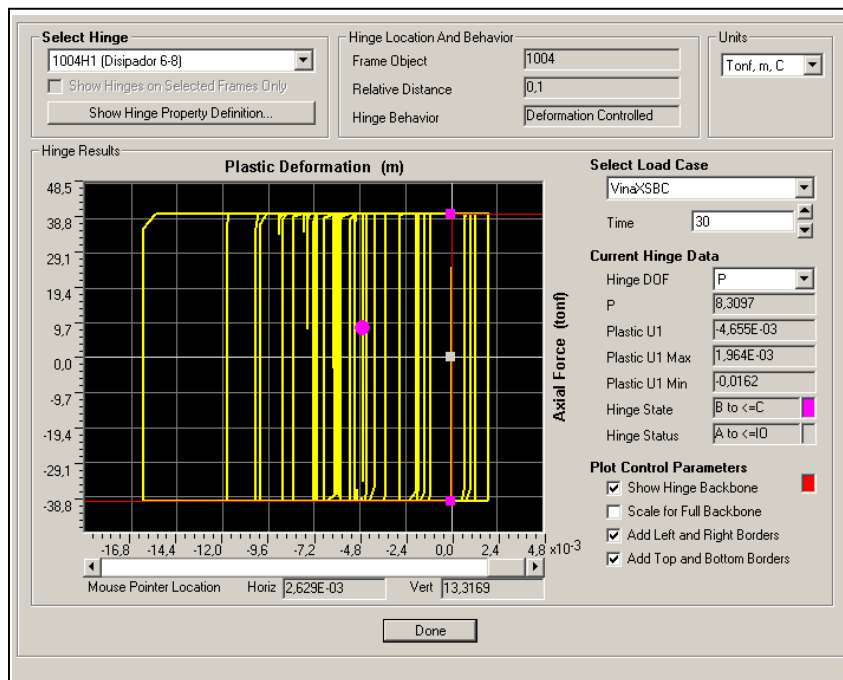


Figura A.2.
 Ciclo de histéresis, disipador tipo 2, registro *Viña del Mar X*.

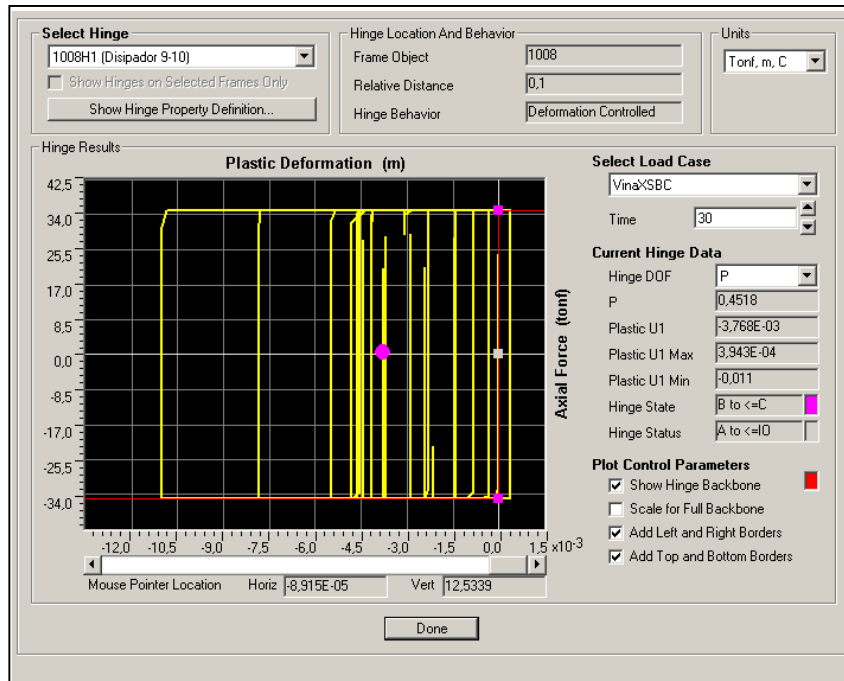


Figura A.3.
Ciclo de histéresis, disipador tipo 3, registro *Viña del Mar X*.

A.2. Dirección Y.

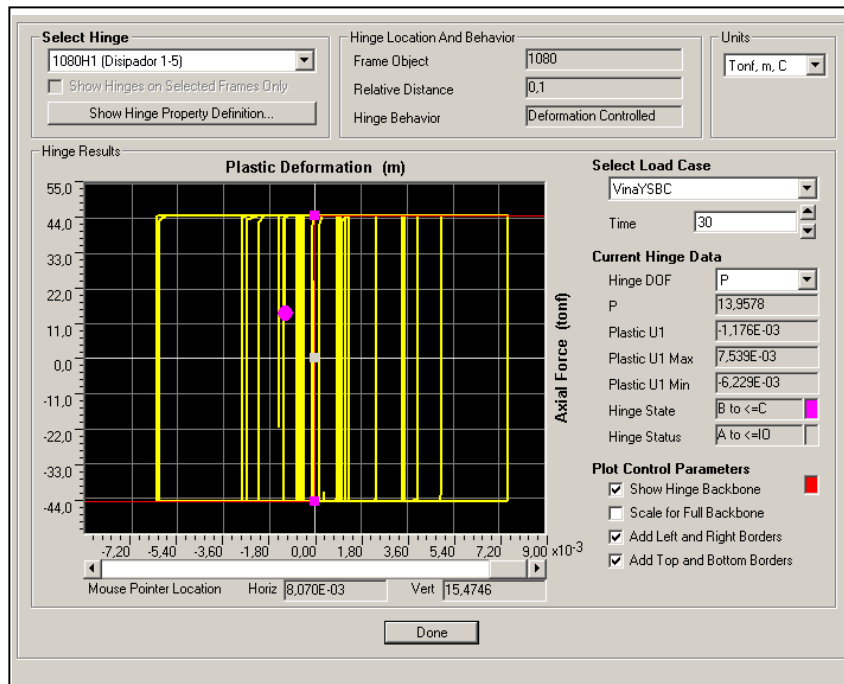


Figura A.4.
Ciclo de histéresis, disipador tipo 1, registro *Viña del Mar Y*.

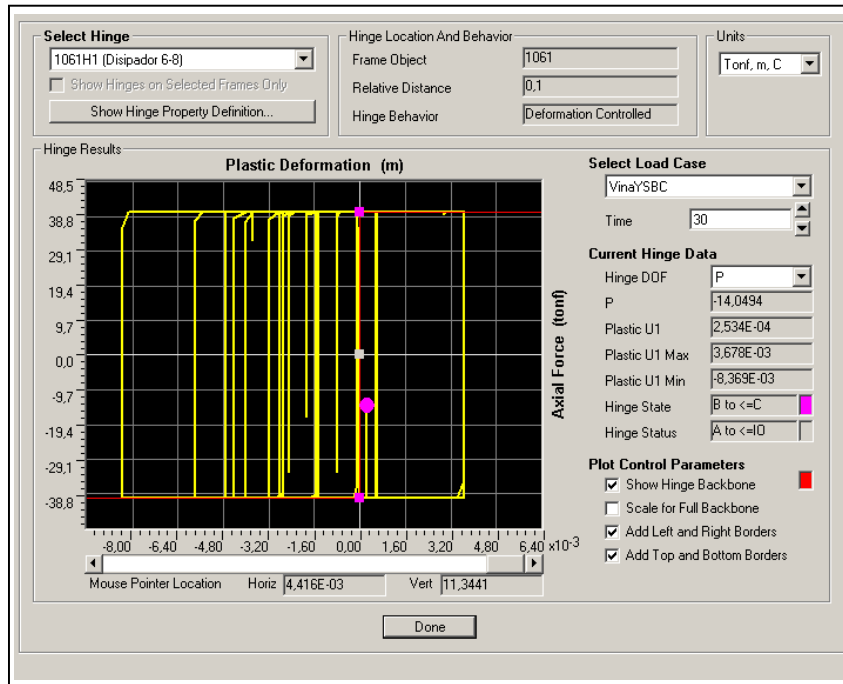


Figura A.5.
 Ciclo de histéresis, disipador tipo 2, registro *Viña del Mar Y.*

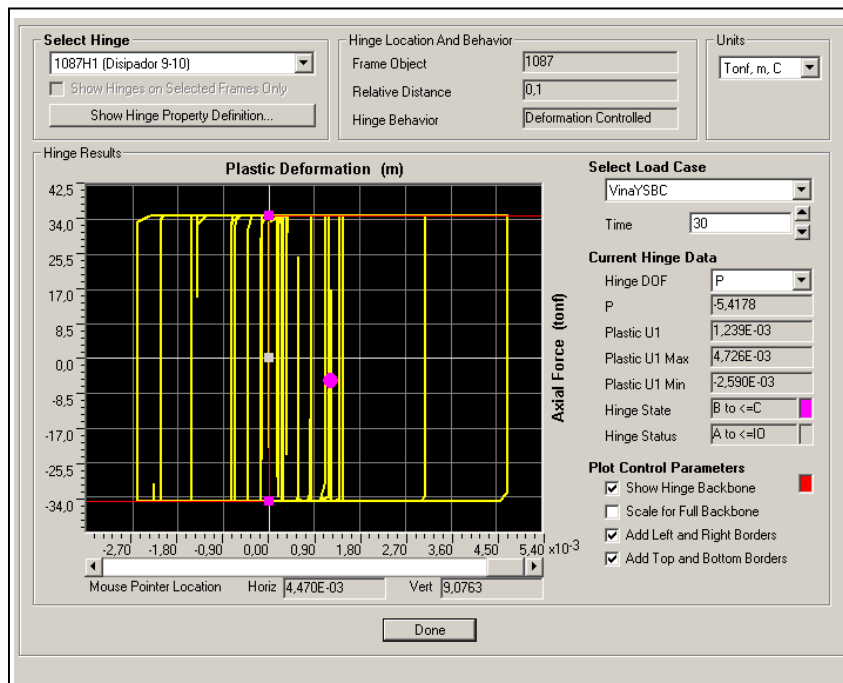


Figura A.6.
 Ciclo de histéresis, disipador tipo 3, registro *Viña del Mar Y.*

ANEXO B

CICLOS DE HISTÉRESIS DE DISPOSITIVOS SBC MEDIDOS PARA LOS REGISTROS DE LLOLLEO

B.1. Dirección X.

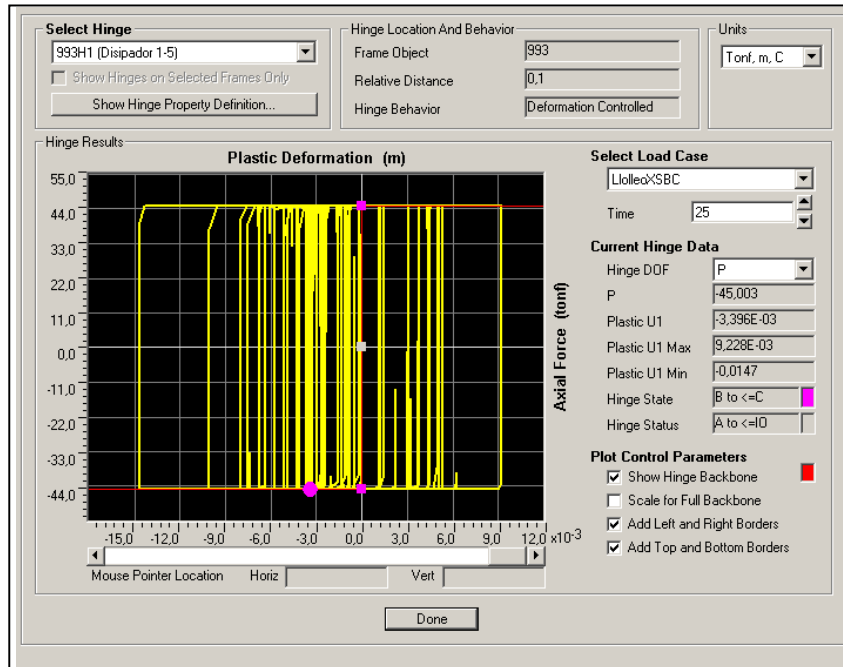


Figura B.1.
 Ciclo de histéresis, disipador tipo 1, registro *Lolloe X*.

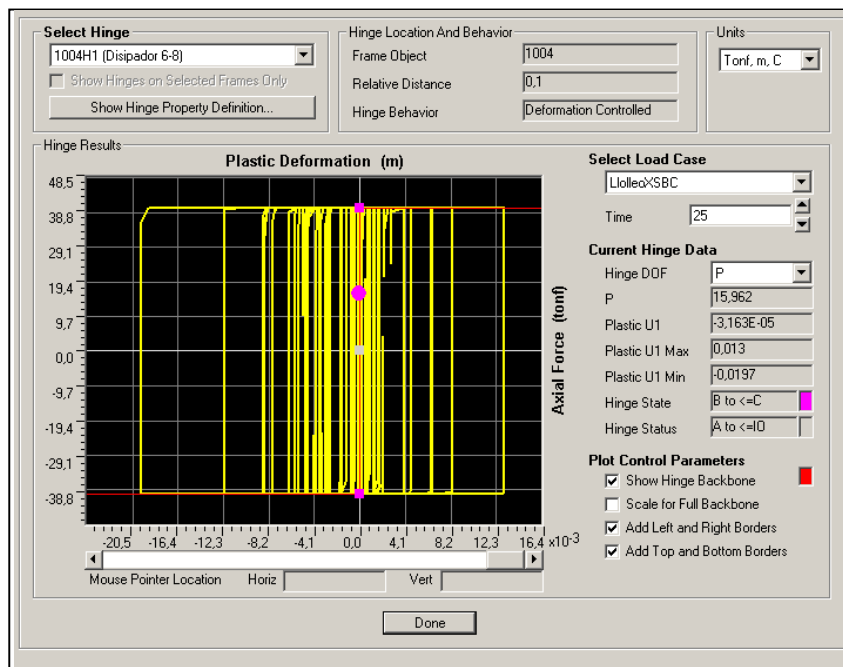


Figura B.2.
 Ciclo de histéresis, disipador tipo 2, registro *Lolloe X*.

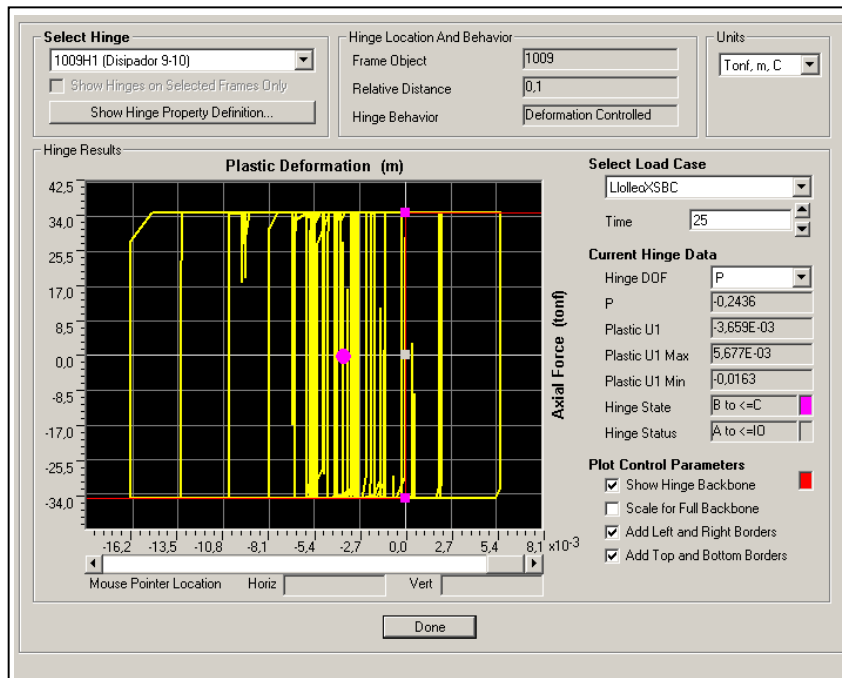


Figura B.3.
Ciclo de histéresis, disipador tipo 3, registro *Llollo X*.

B.2. Dirección Y.

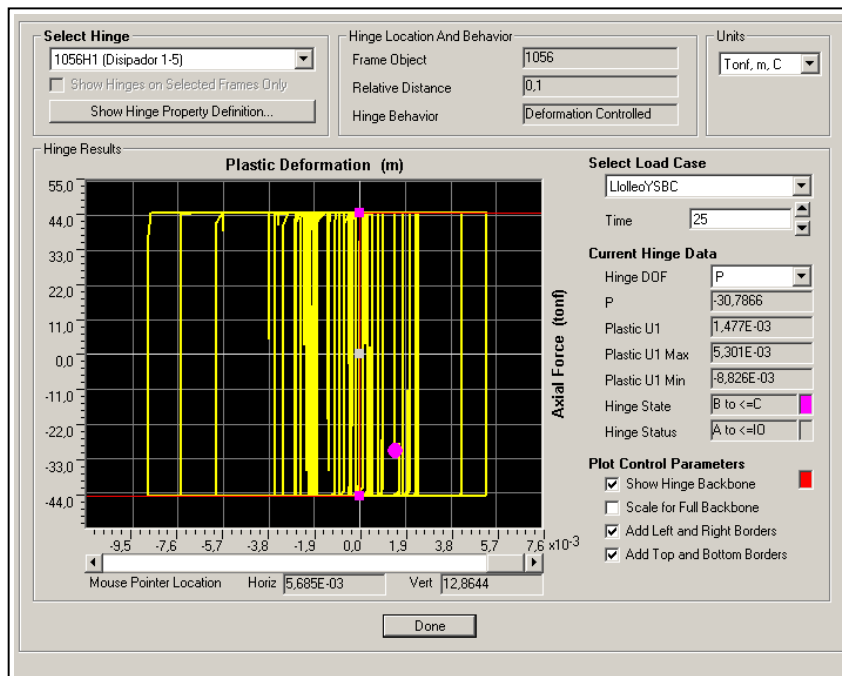


Figura B.4.
Ciclo de histéresis, disipador tipo 1, registro *Llollo Y*.

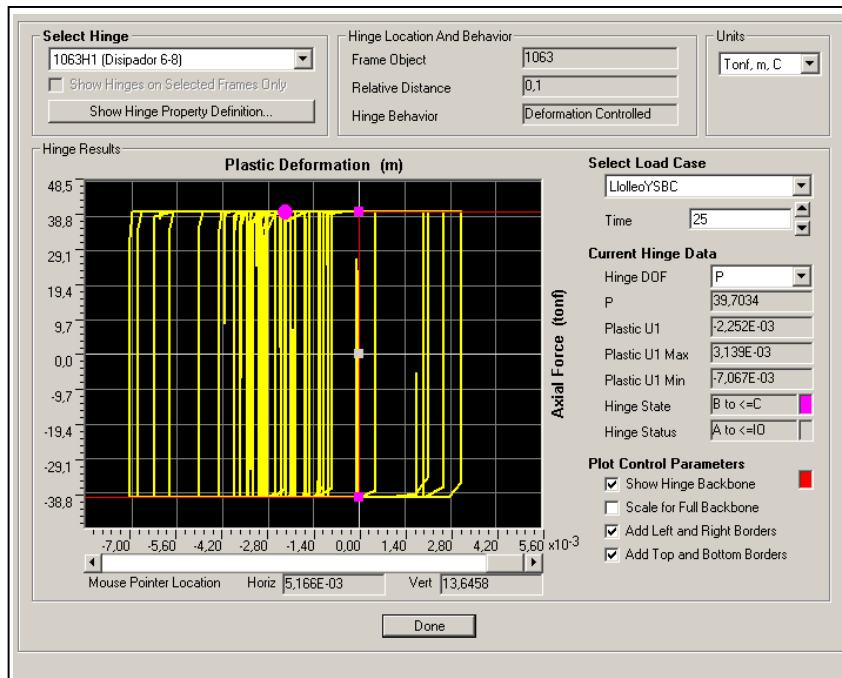


Figura B.5.
 Ciclo de histéresis, disipador tipo 2, registro *Llolleo Y*.

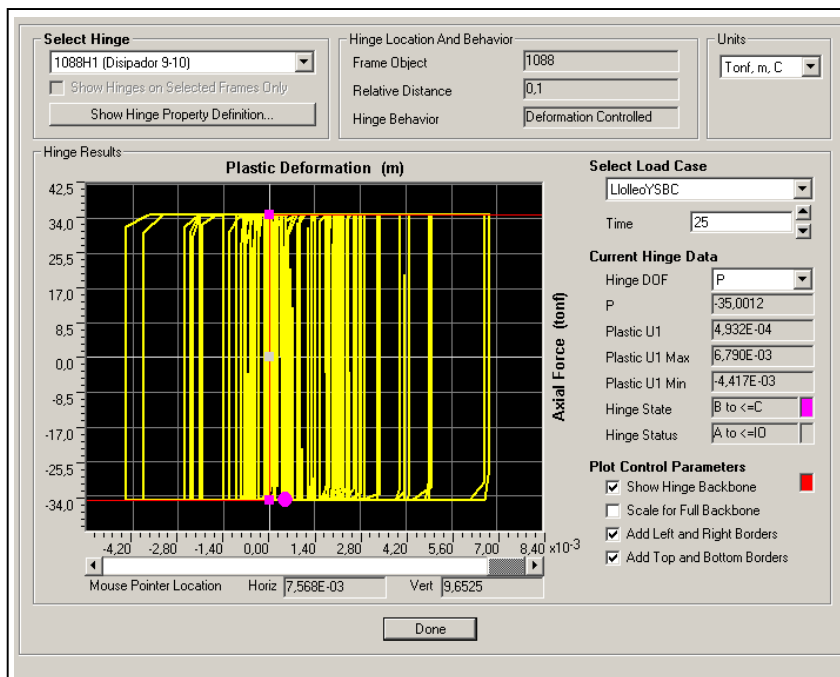


Figura B.6.
 Ciclo de histéresis, disipador tipo 3, registro *Llolleo Y*.

ANEXO C

CICLOS DE HISTÉRESIS DE DISPOSITIVOS SBC MEDIDOS PARA LOS REGISTROS ARTIFICIALES

C.1. Dirección X.

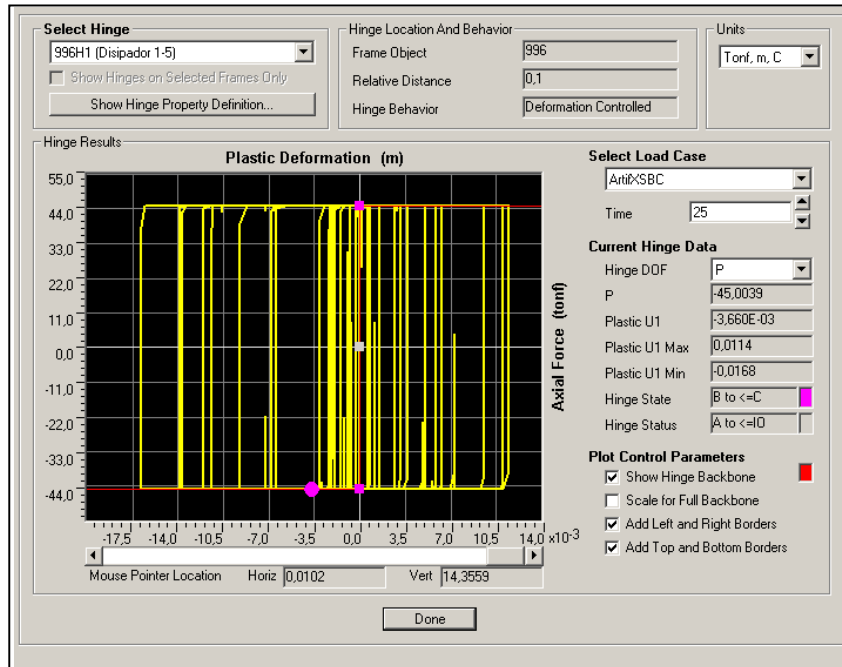


Figura C.1.
Ciclo de histéresis, disipador tipo 1, registro *Artificial X*.

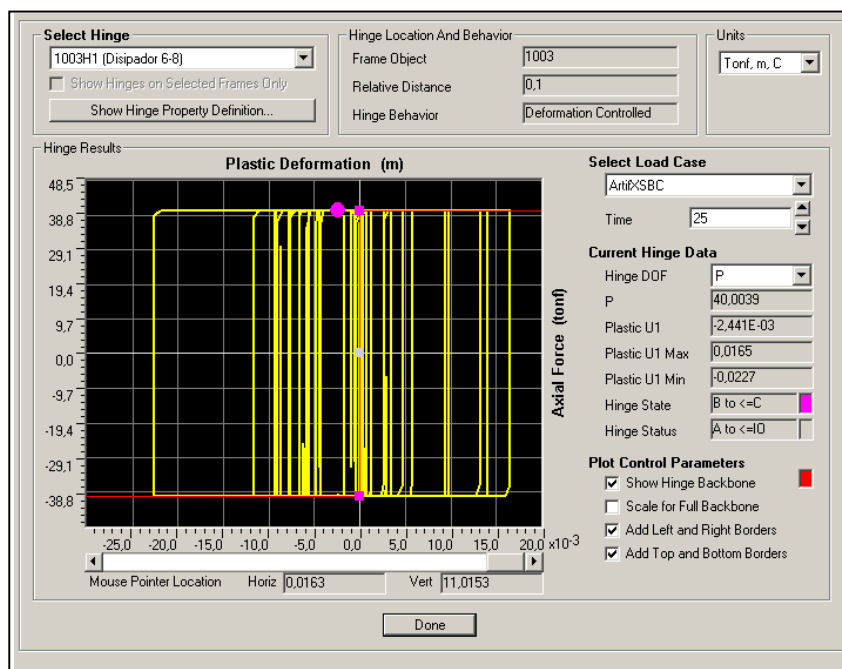


Figura C.2.
Ciclo de histéresis, disipador tipo 2, registro *Artificial X*.

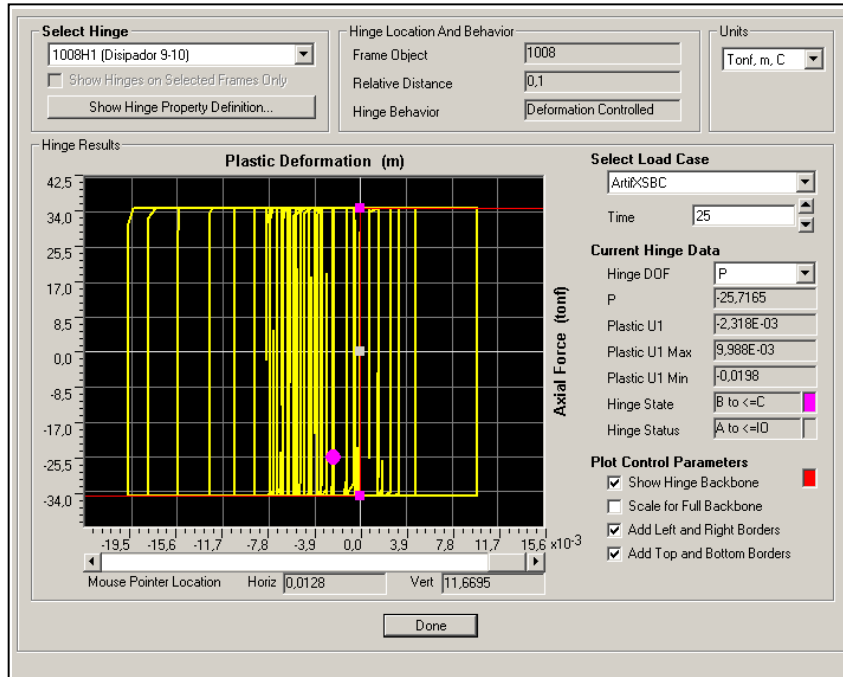


Figura C.3.
Ciclo de histéresis, disipador tipo 3, registro *Artificial X*.

C.2. Dirección Y.

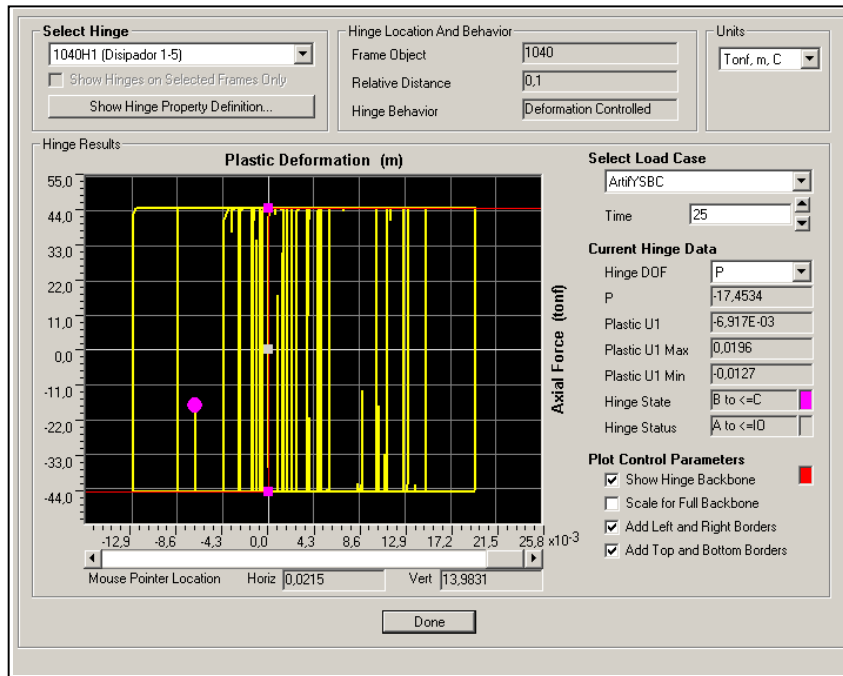


Figura C.4.
Ciclo de histéresis, disipador tipo 1, registro *Artificial Y*.

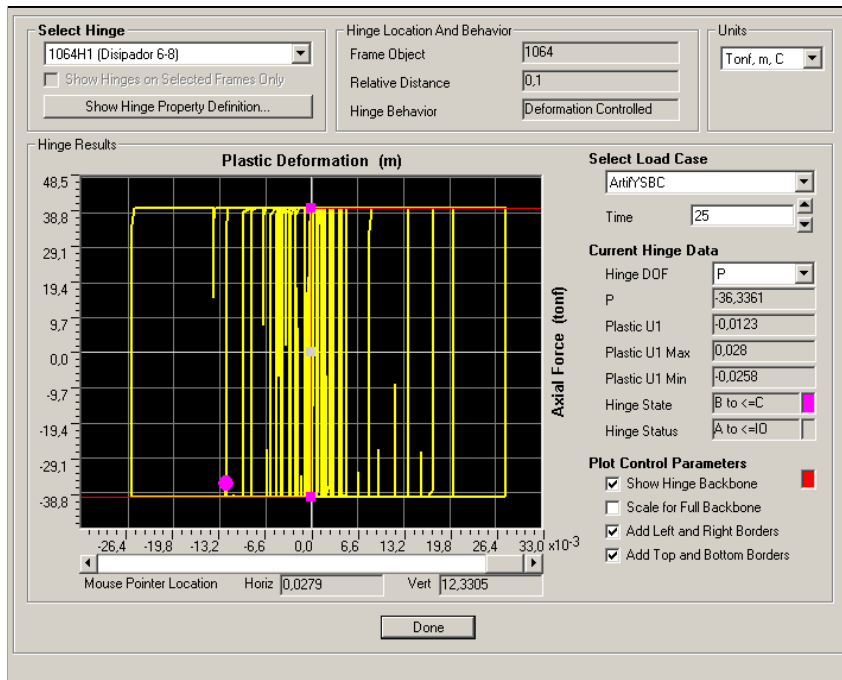


Figura C.5.
 Ciclo de histéresis, disipador tipo 2, registro *Artificial Y*.

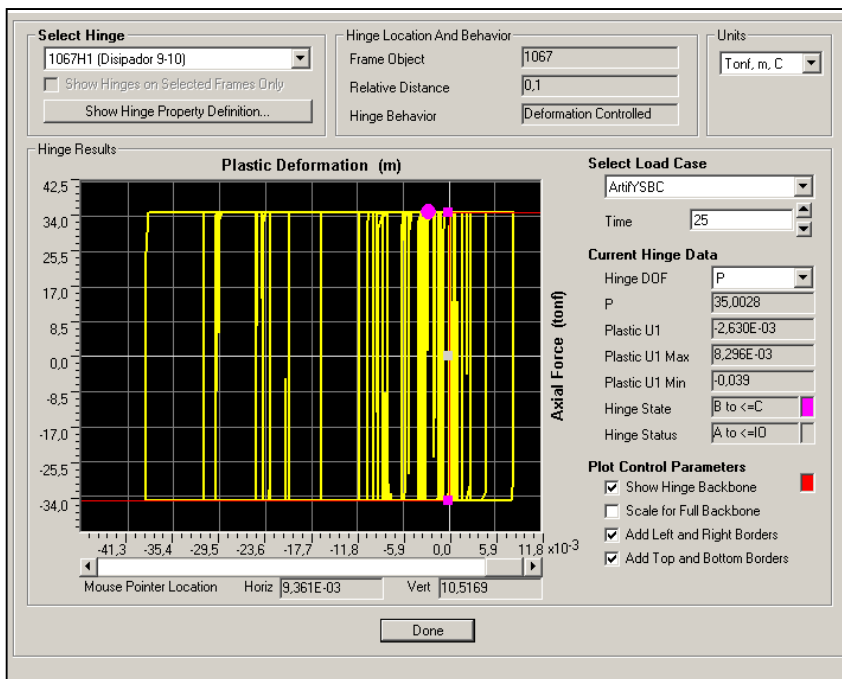


Figura C.6.
 Ciclo de histéresis, disipador tipo 3, registro *Artificial Y*.

ANEXO D

**GRÁFICAS COMPARATIVAS
ENTRE EL ANÁLISIS DEL CASO BASE
Y EL ANÁLISIS DEL CASO SBC**

D.1. Registros de Viña del Mar.

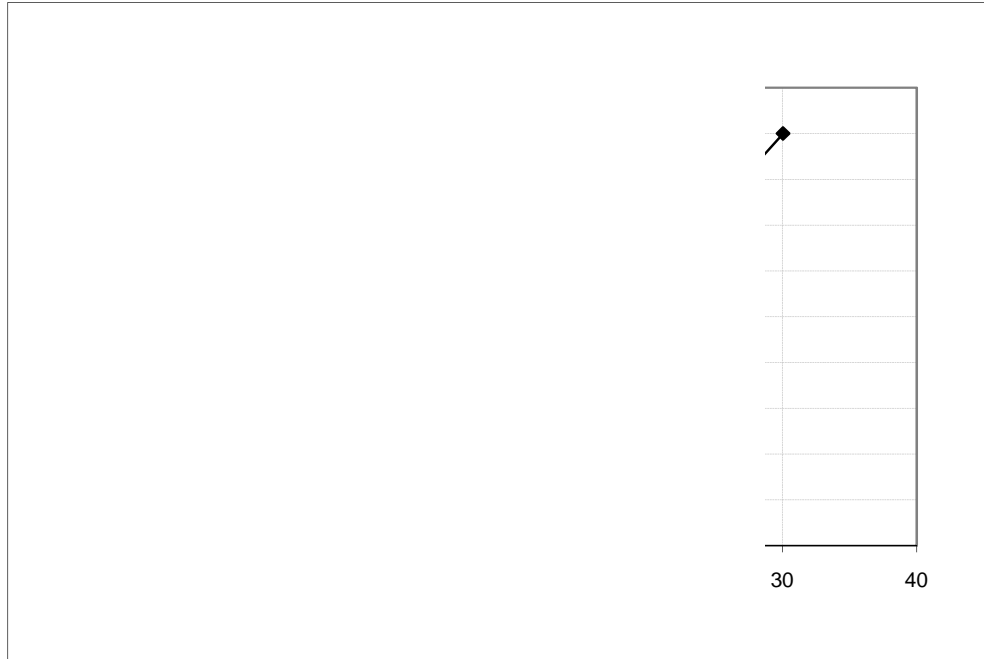


Figura D.1.

Comparación entre desplazamientos para los registros de Viña del Mar.

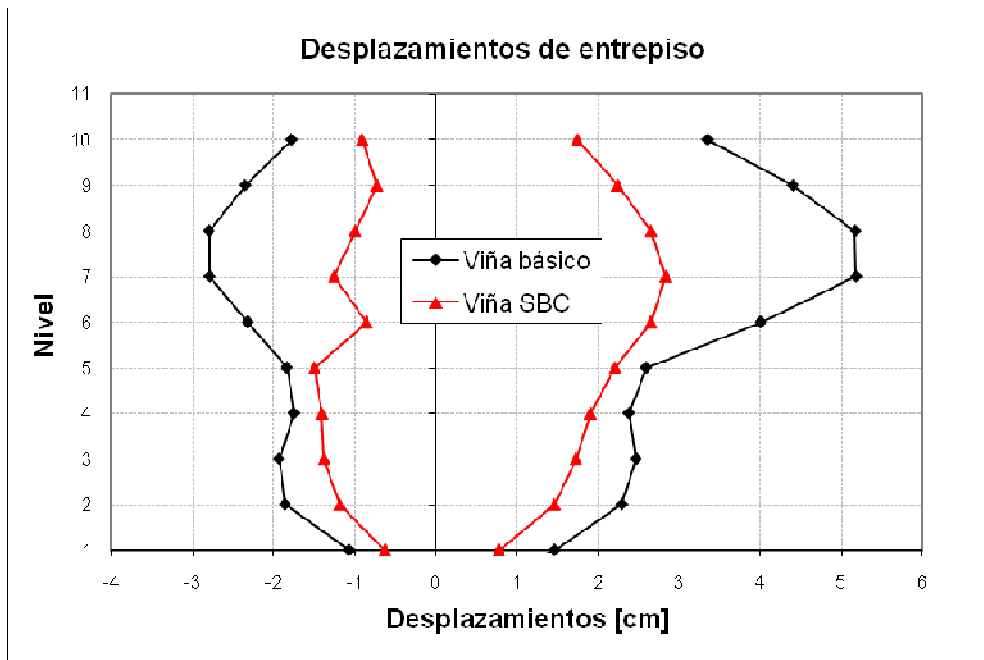


Figura D.2.

Comparación entre desplazamientos de entepiso para los registros de Viña del Mar.

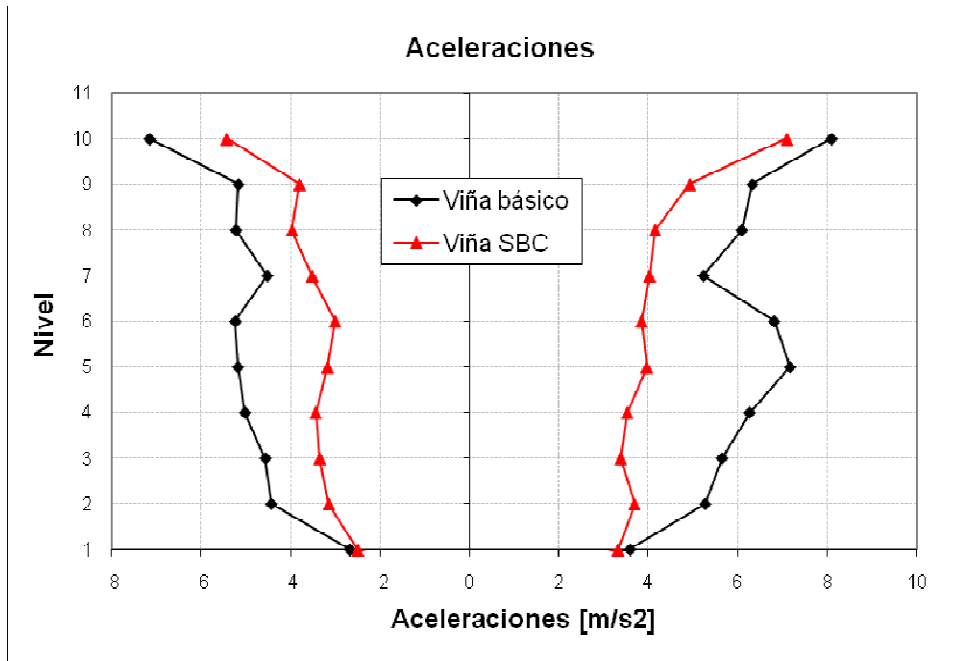


Figura D.3.
Comparación entre aceleraciones absolutas para los registros de Viña del Mar.

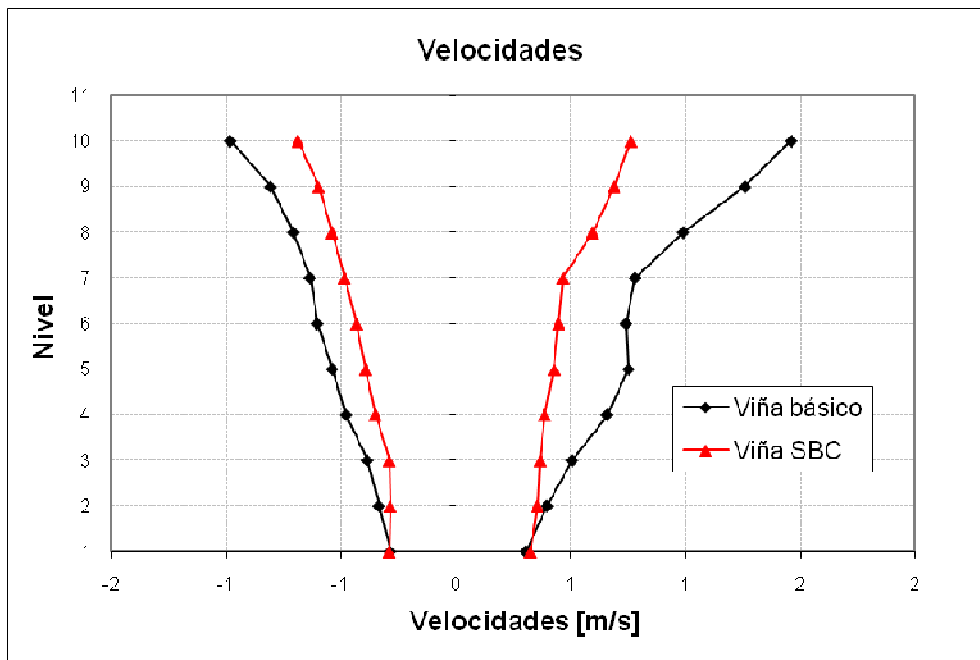


Figura D.4.
Comparación entre velocidades absolutas para los registros de Viña del Mar.

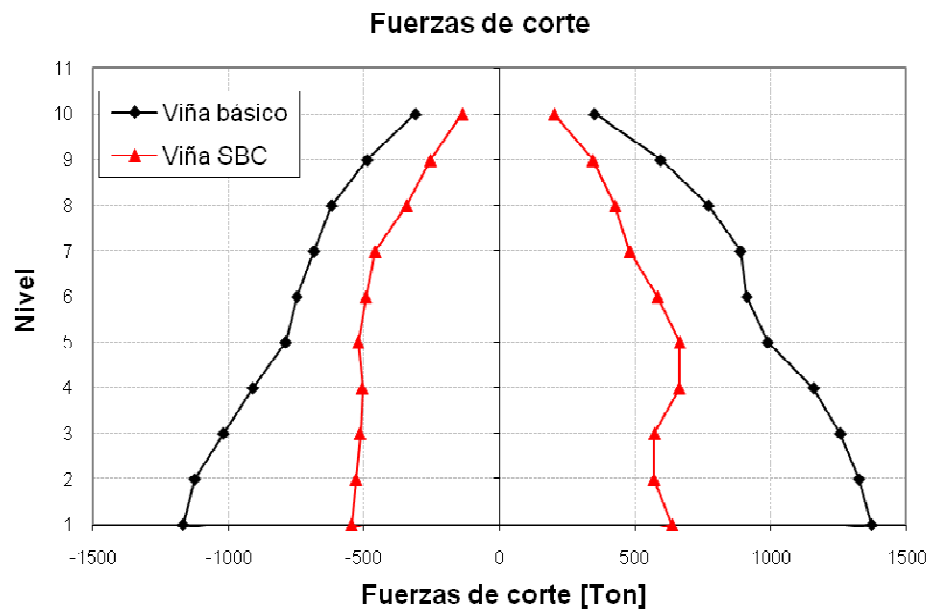


Figura D.5.
Comparación entre fuerzas de corte para los registros de Viña del Mar.

Para los gráficos anteriores, Viña básico se refiere al análisis tiempo historia de la estructura original sin la incorporación de los dispositivos SBC, con los registros de Viña del Mar. En cambio, Viña SBC hace mención al análisis de la estructura modificada con la incorporación de los dispositivos SBC, con los registros de Viña del Mar.-

D.2. Registros de Lloleo.

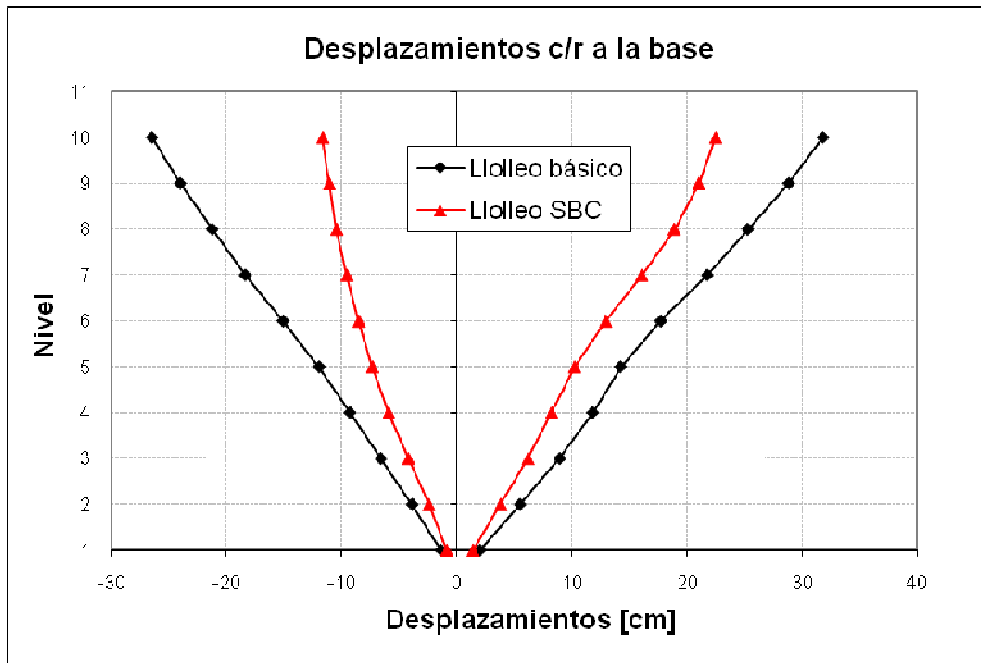


Figura D.6.
Comparación entre desplazamientos para los registros de Lloleo.

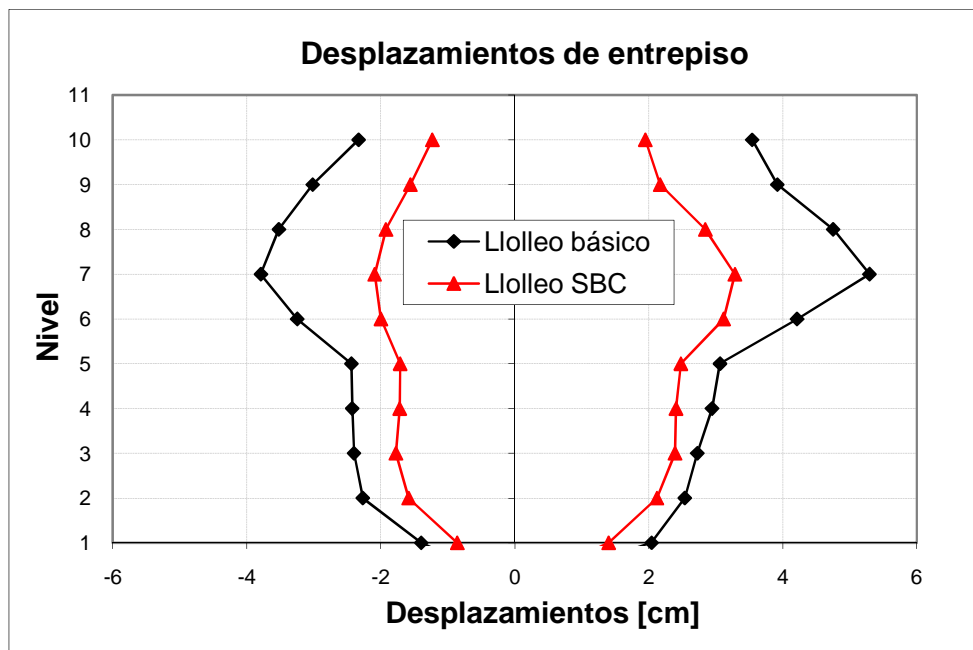


Figura D.7.
Comparación entre desplazamientos de entrepiso para los registros de Lloleo.

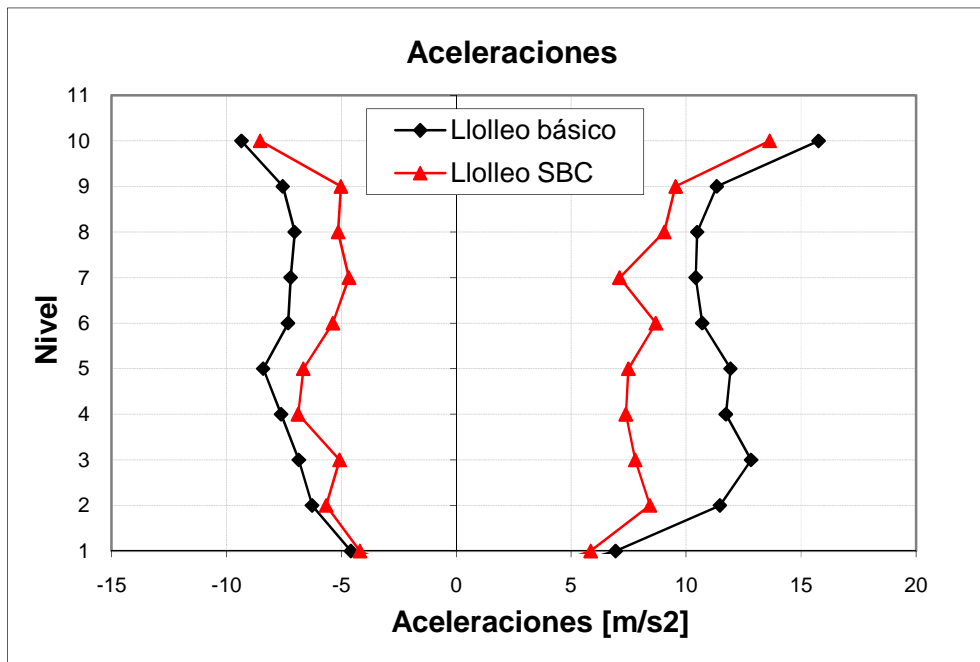


Figura D.8.
 Comparación entre aceleraciones absolutas para los registros de Lolleo.

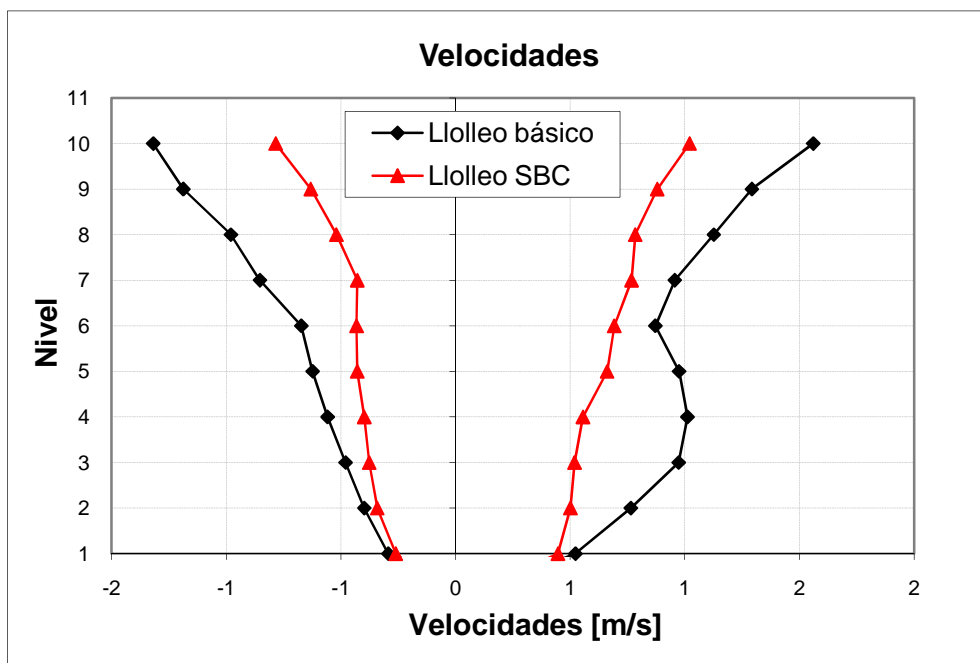


Figura D.9.
 Comparación entre velocidades absolutas para los registros de Lolleo.

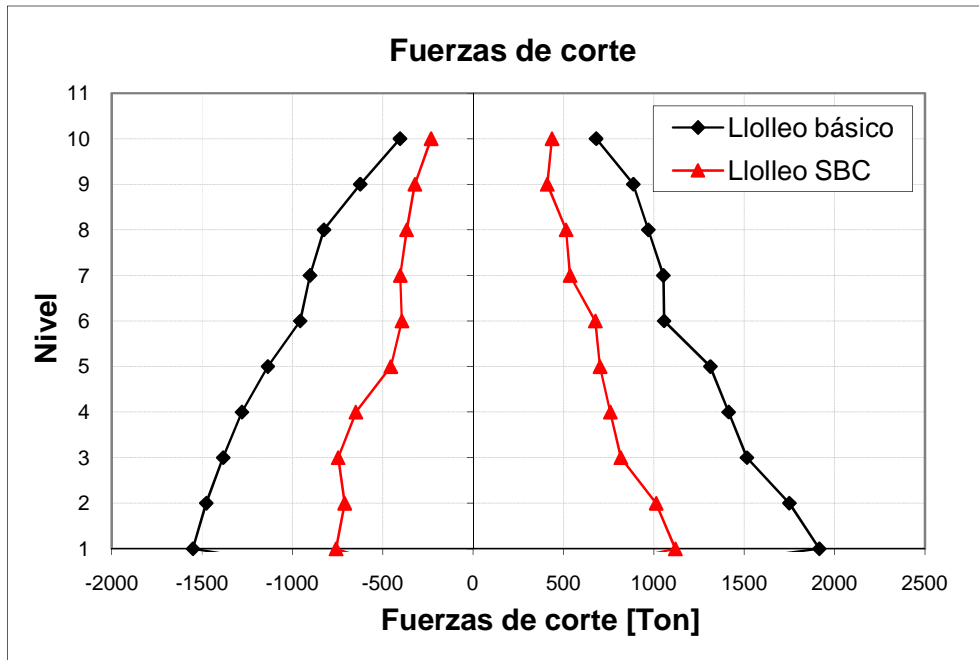


Figura D.10.
Comparación entre fuerzas de corte para los registros de Llollo.

Para los gráficos anteriores, Llollo básico se refiere al análisis tiempo historia de la estructura original sin la incorporación de los dispositivos SBC, con los registros de Llollo. En cambio, Llollo SBC hace mención al análisis de la estructura modificada con la incorporación de los dispositivos SBC, con los registros de Llollo.-

D.3. Registros Artificiales.

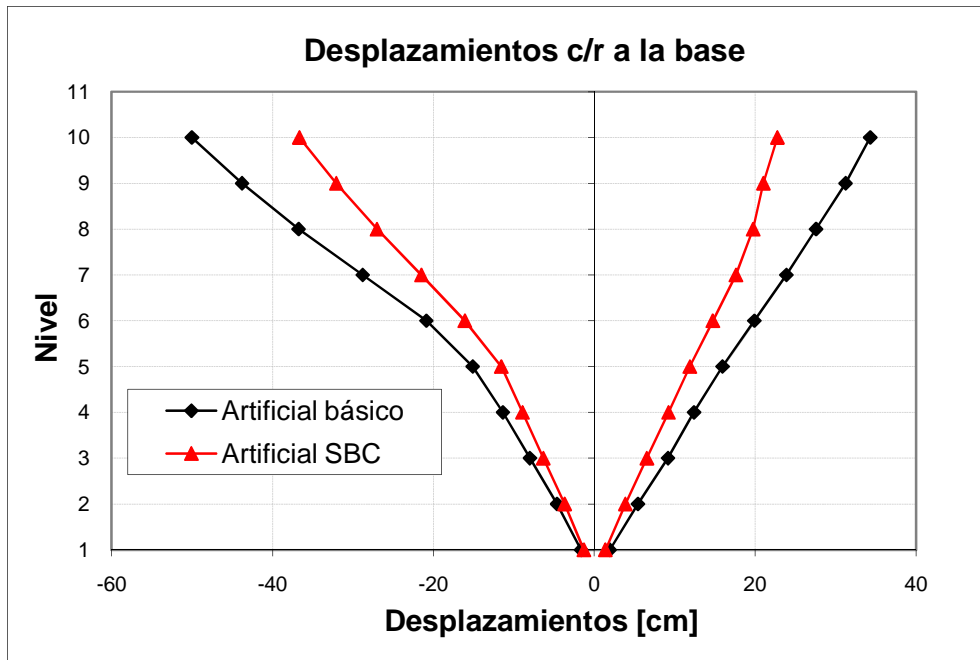


Figura D.11.
Comparación entre desplazamientos para los registros Artificiales.

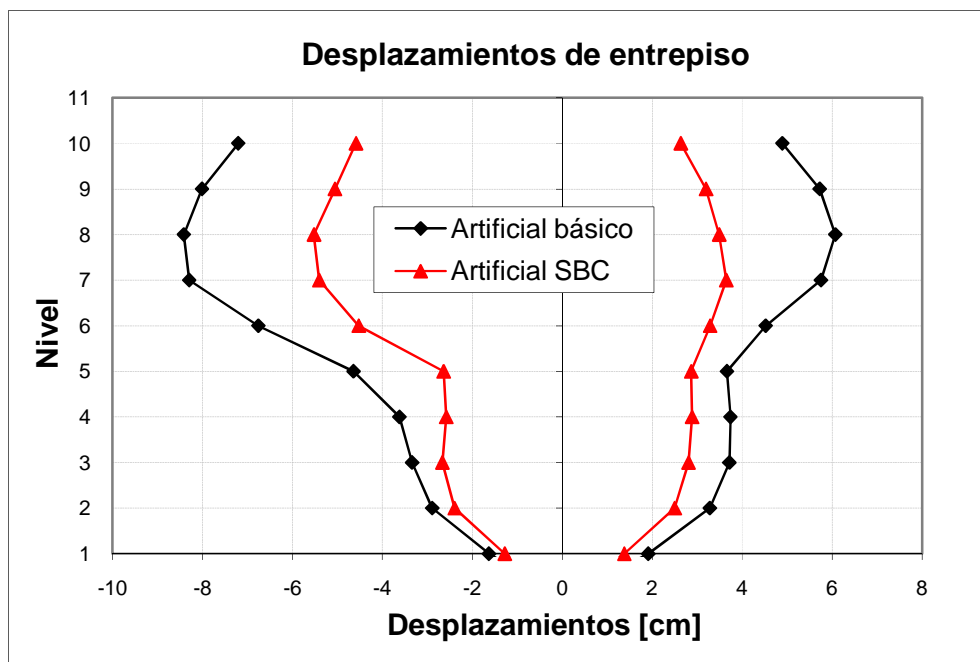


Figura D.12.
Comparación entre desplazamientos de entrepiso para los registros Artificiales.

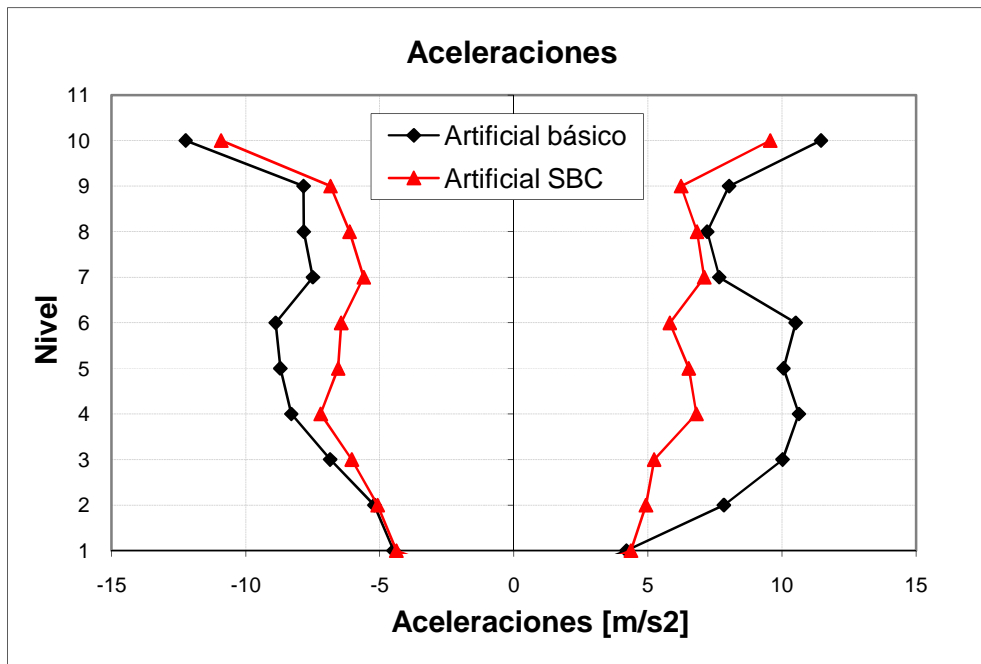


Figura D.13.
Comparación entre aceleraciones absolutas para los registros Artificiales.

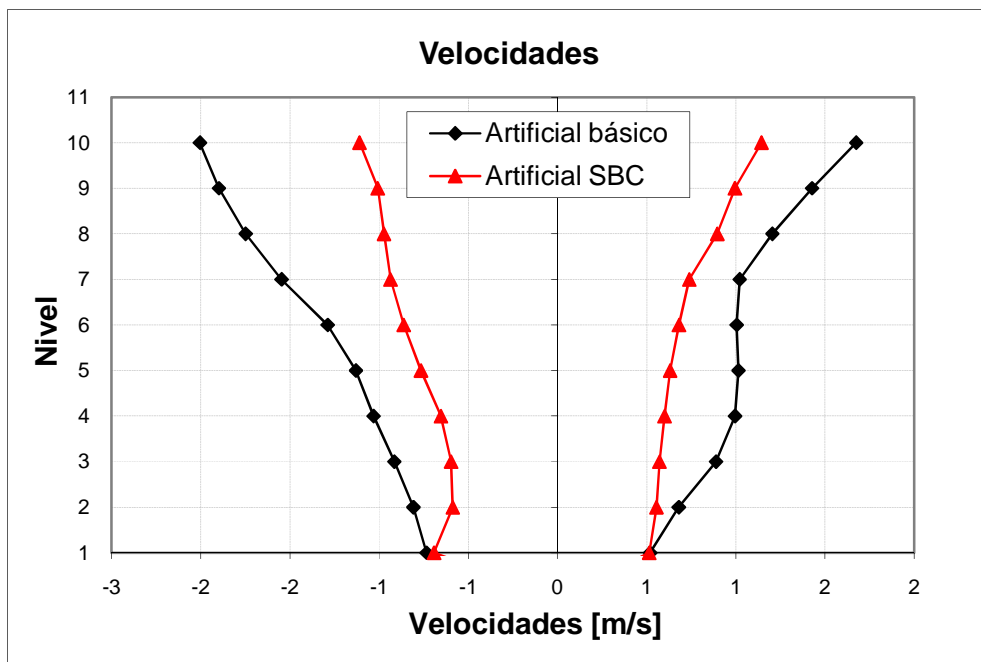


Figura D.14.
Comparación entre velocidades absolutas para los registros Artificiales.

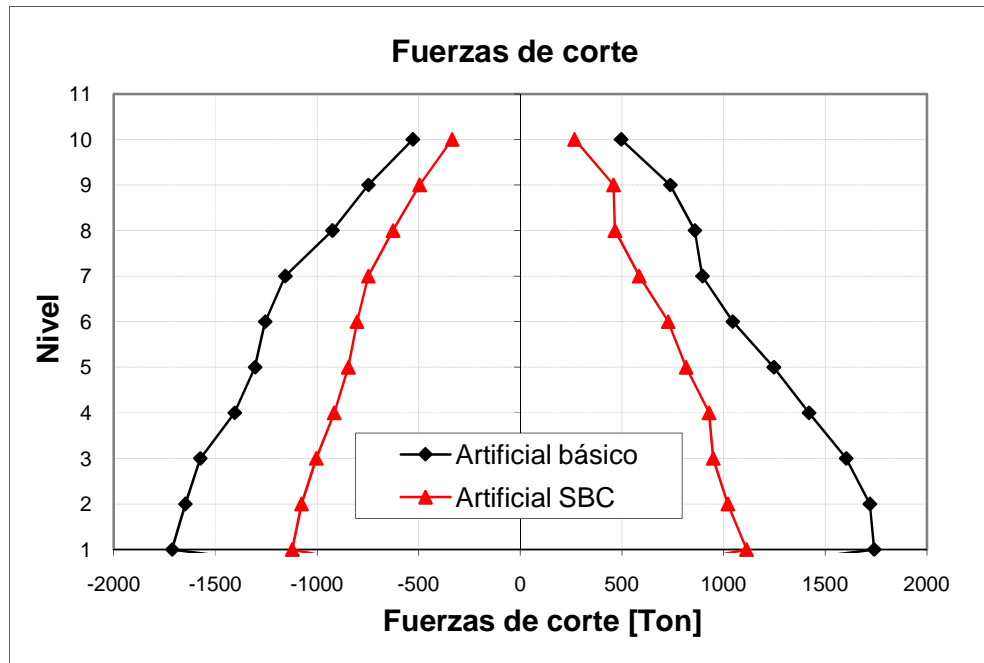


Figura D.15.
Comparación entre fuerzas de corte para los registros Artificiales.

Para los gráficos anteriores, Artificial básico se refiere al análisis tiempo historia de la estructura original sin la incorporación de los dispositivos SBC, con los registros Artificiales. En cambio, Artificial SBC hace mención al análisis de la estructura modificada con la incorporación de los dispositivos SBC, con los registros Artificiales.-

REFERENCIAS

1. Aiken, I. D., Kelly, J. M. 1991. "Earthquake simulator testing of energy absorbing systems for multistory structures" International Meeting on Earthquake Protection of Buildings, Ancona, Italy, June, 1991.
2. AISC, American Institute of Steel Construction, Inc. "Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings", 2005.
3. AISC, American Institute of Steel Construction, Inc. "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings", 2005.
4. Almasio, D. G., "Análisis sísmico de edificios de acero equipados con disipadores tipo ADAS", Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Civil Mención: Estructuras Construcción, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2004.
5. Cahís i Carola, Xavier, "Desarrollo de un nuevo disipador de energía para diseño sismorresistente. Análisis numérico y validación experimental de su comportamiento", Universidad Politécnica de Cataluña, 2000.
6. Castro Fajardo, O.B. "Estudio de amplificación de suelos superficiales y su correlación con registros de acelerogramas de Marzo de 1985 en las zonas de :Illapel, Los Vilos, Talca, Cauquenes y Chillán". Memoria para optar al título Profesional de Ingeniero Civil. Mención Estructuras y Construcción. . Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. 2003.
7. CSI, "Example 6-008. Link – Plastik wen link", Software verification SAP 2000, Computers & Structures Inc., Berkeley, California, USA, 2007.
8. Dorka, E. y Bayer, "Distribution of seismic links in hysteretic device systems", Proc. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, 2000.

9. Filiatrault, A., Cherry, S. 1990. "A simplified seismic design procedure for friction damped structures". Proc. Fourth US. Nat. Conference on Earthquake Engineering May, 1990, Palm Springs, California.
10. Filiatrault, A., Cherry, S. 1987. "Performance evaluation of friction damped braced steel frames under simulated earthquake loads". Earthquake Spectra, Vol. 3, N° 1, 1987.
11. Foti, D., Bozzo, L. y López-Almarsa, F. "Numerical efficiency assessment of energy dissipators for seismic protection of building", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 543-556, 1998.
12. Gandala, M.A. "Dispositivos mecánicos para disipar la energía sísmica, alternativa económicamente viable", 1998.
13. Grigorian, C. E., Popov, E. E. 1993. "Slotted bolted connections for energy dissipation". Department of Civil Engineering University of California, Berkeley. ATC-17-1 Vol. 2.
14. Lazan, B. J. "Damping of Materials and Members in Structural Mechanics", Department of Aeronautics and Engineering Mechanics. University of Minnesota. Pergamon Press Ltd. 1968.
15. Martínez Romero, E. Seminario: "Sistemas Innovativos de Protección Sísmica de Estructuras Nuevas: Una visión de aplicación práctica". 27 y 28 de Mayo de 2003.
16. Martínez-Romero, E. Seminario "La disipación pasiva de energía y su aplicación a la rehabilitación Post-Sísmica de edificios. Una visión de aplicación práctica". 27 y 28 de Mayo, 2003.
17. Martínez-Romero, E. "Three 27-Story Buildings located in Highly Sismic Zone, Resulted in Advantage to other Structural System by Using Steel Framing Incorporating Steel Dampers", 1998.

18. Norma chilena NCh. 2369 Of.2002 "Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales" del Instituto Nacional de Normalización INN CHILE, 2002.
19. Norma chilena NCh. 433 Of.96 "Diseño sísmico de edificios" del Instituto Nacional de Normalización INN CHILE, 1996.
20. Norma chilena NCh 1537 Of.86 "Cargas permanentes y sobrecargas de uso" del Instituto Nacional de Normalización INN CHILE, 1986.
21. Pall, A. y Pall, R. T. "Performance-based design using Pall Friction Dampers – an economical design solution", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B. C., Canada, Agosto 1-6, 2004, paper N° 1955.-
22. Pall, A. S., Pall, R. 1993. "Friction-Dampers used for seismic control of new an existing buildings in Canada" PALL DYNAMICS LIMITED 100 Montevista, D. D. O., Montreal, Quebec H9B 2Z9, Canada. ATC-17-1 Vol. 2.
23. Pall, A. S., Marsh, C. 1982. "Response of friction damped braced frames". ASCE, Journal of the Structural Division. Vol. 108, St6, June 1982.
24. Rai, D.C. y Wallace, B.J. "Aluminium shear-links for enhance seismic resistance", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, 315 -342, 1998.
25. Sáez Geraldo, A.A. y Holmberg Fuenzalida, A.H. "Análisis de los acelerogramas del terremoto de Chile de 1985: segunda parte". 1990.
26. Scholl, R.E. "Improve the earthquake performance of structure with Added Damping and Stiffness elements", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, 3, 489-498, 1990.
27. Servicio Sismológico de la Universidad de Chile. Servicio sismológico en línea <http://ssn.dgf.uchile.cl/home/sismohisto.html>. Consulta 20 Septiembre 2007.

28. Su, Y.F. y Hanson, R.D. "Comparison of effective supplemental damping equivalent viscous and hysteretic", Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, 3, 507-516, 1990.
29. Tremblay, R., Steiner, S. F. 1993. "Energy dissipation through friction bolted connections in concentrically braced steel frames". Department of Civil Engineering of British Columbia, Vancouver, B. C., Canada V6T1Z4. ATC-17-1 Vol. 2.
30. Tsai, K. C., Chen, H.W., Hong, C.P. y Su, Y.F. "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistance construction", Earthquake Spectra, 9, 505-528, 1993.
31. Vulcano, A. 1991. "Nonlinear seismic response of damped braced frames". International Meeting on Earthquake Protection of Buildings. Ancona, Italy, June, 1991.
32. Whittaker, A., Bertero, V., Alonso, J., and Thompson, C. "Earthquake Simulator testing of Steel Plate Added Damping and Stiffness Elements", Earthquake Engineering Research Center, UCB/EERC-89/02, University of California, Berkeley, 1989.