

**REDUCCIÓN DE LA DEMANDA SÍSMICA EN ESTRUCTURAS  
APORTICADAS EMPLEANDO AISLADORES DE BASE.**



**JOSÉ ROBERTO GUERRERO MELO**



**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
BUCARAMANGA  
2011**

**REDUCCIÓN DE LA DEMANDA SÍSMICA EN ESTRUCTURAS  
APORTICADAS EMPLEANDO AISLADORES DE BASE.**

**JOSÉ ROBERTO GUERRERO MELO**

**Proyecto de grado en modalidad de investigación para optar el  
título de Ingeniero Civil**

**DIRECTOR  
LEOCADIO RICO PRADILLA  
Ingeniero Civil**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
BUCARAMANGA**

**2011**

## **AGRADECIMIENTOS.**

Deseo expresar mi agradecimiento al ingeniero Leocadio Rico Pradilla, quien con su conocimiento y disposición permitió que esta investigación fuese posible.

De igual forma quiero manifestar mi agradecimiento al ingeniero Daniel Mauricio Moreno Luna por sus comentarios y valiosas aclaraciones.

Gracias a mi familiares y amigos por el apoyo, comprensión y la ayuda brindada en el desarrollo de este trabajo de investigación.

## **CONTENIDO.**

<b>1. INTRODUCCIÓN.</b>	<b>25</b>
<b>2. OBJETIVOS.</b>	<b>26</b>
2.1. OBJETIVO GENERAL:	26
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	26
<b>3. PRINCIPIOS DEL AISLAMIENTO DE BASE.</b>	<b>27</b>
<b>4. LOCALIZACIÓN Y TIPOS DE DISPOSITIVOS.</b>	<b>32</b>
4.1. LOCALIZACIÓN DE LOS AISLADORES.	32
<b>4.2. AISLADORES ELASTOMÉRICOS</b>	<b>33</b>
4.2.1. Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento “low damping bearings”.	33
4.2.2. Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento “High damping rubber bearings” (HDRB):	35
4.2.3. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo “lead rubber bearings” (LRB) - “New Zealand (N-Z):	36
<b>4.3. AISLADORES TIPO FRICCIÓN:</b>	<b>38</b>
4.3.1. Sistema de péndulo de fricción (FPS):	39
<b>5. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS AISLADORES DE BASE.</b>	<b>43</b>
5.1. PARÁMETROS DEL MODELO BILINEAL.	44
5.2. MODELO BILINEAL DEL AISLADOR CON NÚCLEO DE PLOMO.	47
5.3. MODELO BILINEAL DEL AISLADOR DE ALTO AMORTIGUAMIENTO.	49

<b>5.4. MODELO BILINEAL DEL SISTEMA DE PÉNDULO DE FRICCIÓN.</b>	<b>52</b>
<b>6. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE ANÁLISIS PARA ESTRUCTURAS CON BASE FIJA DEFINIDOS POR LA NSR-10.</b>	<b>55</b>
<b>7. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ANÁLISIS PARA LOS MODELOS EMPLEANDO BASE AISLADA.</b>	<b>67</b>
<b>7.1. PROCEDIMIENTO FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE</b>	<b>70</b>
7.1.1. Características de deformación del sistema de aislación.	70
7.1.2. Desplazamientos mínimos laterales:	71
7.1.3. Periodo efectivo para el desplazamiento de diseño:	72
7.1.4. Desplazamiento máximo:	73
7.1.5. Periodo efectivo para el desplazamiento máximo:	73
7.1.6. Desplazamiento total de diseño:	74
7.1.8. Elementos estructurales bajo el sistema de aislación.	76
7.1.9. Elementos estructurales sobre el sistema de aislación.	76
7.1.10. Distribución vertical de las fuerzas	77
<b>7.2. PROCEDIMIENTOS DINÁMICOS.</b>	<b>78</b>
<b>8. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA Y LAS CARGAS PARA LOS MODELOS.</b>	<b>82</b>
<b>8.1. MODELO 1 BASE FIJA:</b>	<b>82</b>
<b>8.2. MODELO 1 BASE AISLADA:</b>	<b>84</b>
<b>8.3. MODELO 2 BASE FIJA:</b>	<b>84</b>
<b>8.4. MODELO 2 BASE AISLADA:</b>	<b>86</b>
<b>9. DEFINICION DE LOS CARACTERISTICAS MECANICAS DE LOS AISLADORES DE BASE EMPLEADOS.</b>	<b>87</b>
<b>9.1. AISLADORES DE BASE EMPLEADOS EN MODELO 1.</b>	<b>87</b>

9.1.1.	Aislador elastomérico de alto amortiguamiento. “HDRB”.	87
9.1.2.	Aislador elastomérico con núcleo de plomo. “LRB”.	89
9.1.3.	Sistema de péndulo de fricción. “FPS”.	90
<b>9.2.</b>	<b>AISLADORES DE BASE EMPLEADOS EN MODELO 2.</b>	<b>92</b>
9.2.1.	Aislador elastomérico de alto amortiguamiento. “HDRB”.	92
9.2.2.	Aislador elastomérico con núcleo de plomo. “LRB”.	93
9.2.3.	Sistema de péndulo de fricción. “FPS”.	94
<b>10.</b>	<b>MODELADO DE LOS SISTEMAS EN SAP2000.</b>	<b>96</b>
<b>10.1.</b>	<b>MODELADO DE LOS SISTEMAS DE AISLACION.</b>	<b>96</b>
10.1.1.	Aisladores elastoméricos.	96
10.1.2.	Péndulo de fricción.	98
<b>10.2.</b>	<b>ESTRUCTURA CON BASE FIJA.</b>	<b>101</b>
<b>10.3.</b>	<b>ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE CON BASE AISLADA.</b>	<b>108</b>
10.3.1.	Definir las propiedades en SAP2000 para los aisladores elastometricos.	110
10.3.2.	Definir las propiedades en SAP2000 para los aisladores friccionales.	111
<b>11.</b>	<b>RESULTADOS.</b>	<b>115</b>
<b>11.1.</b>	<b>RESULTADOS PARA BASE FIJA MODELO 1.</b>	<b>115</b>
11.1.1.	Análisis modal.	115
11.1.2.	Análisis estático lineal (fuerza horizontal equivalente).	116
11.1.3.	Análisis dinámico lineal (Espectro de respuesta).	117
11.1.4.	Análisis dinámico lineal (Análisis cronológico).	117
<b>11.2.</b>	<b>RESULTADOS PARA BASE AISLADA MODELO 1.</b>	<b>119</b>
11.2.1.	Análisis modal.	119
11.2.2.	Análisis estático lineal (fuerza horizontal equivalente).	121
11.2.3.	Análisis dinámico lineal (Espectro de respuesta).	121
11.2.4.	Análisis dinámico no lineal (Análisis cronológico).	121
<b>11.3.</b>	<b>RESULTADOS PARA BASE FIJA MODELO 2.</b>	<b>125</b>
11.3.1.	Análisis modal.	125
11.3.2.	Análisis estático lineal (fuerza horizontal equivalente).	126

11.3.3.	Análisis dinámico lineal (Espectro de respuesta).	127
11.3.4.	Análisis dinámico lineal (Análisis cronológico).	127
<b>11.4.</b>	<b>RESULTADOS PARA BASE AISLADA MODELO 2.</b>	<b>129</b>
11.4.1.	Análisis modal.	129
11.4.2.	Análisis estático lineal (fuerza horizontal equivalente).	131
11.4.3.	Análisis dinámico lineal (Espectro de respuesta).	131
11.4.4.	Análisis dinámico no lineal (Análisis cronológico).	131
<b>12.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.</b>	<b>135</b>
<b>12.1.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS MODELO 1.</b>	<b>135</b>
12.1.1.	Graficas cortante basal Vs tiempo.	136
12.1.2.	Graficas de desplazamiento para un nodo de control en la cubierta vs tiempo.	146
12.1.3.	Grafica aceleración en el nodo de control en la cubierta vs tiempo.	156
12.1.4.	Grafica desplazamientos de los nodos por piso vs tiempo.	166
12.1.5.	Grafica cortante en la base vs desplazamiento.	170
<b>12.2.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS MODELO 2.</b>	<b>175</b>
12.2.1.	Graficas de cortante basal Vs tiempo.	176
12.2.2.	Grafica desplazamiento en nodo de control en la cubierta vs tiempo.	186
12.2.3.	Grafica aceleraciones en el nodo de control en la cubierta vs tiempo.	196
12.2.4.	Grafica desplazamientos de los nodos por piso vs tiempo.	206
12.2.5.	Grafica cortante en la base vs desplazamiento.	210
<b>CONCLUSIONES.</b>		<b>215</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.</b>		<b>218</b>
<b>ANEXOS</b>		

## LISTA DE FIGURAS.

Figura 1: (a) Estructura con base fija, (b) Estructura con base aislada.....	27
Figura 2: Transmisión de los movimientos del terreno.....	28
Figura 3: Efectos del aislamiento de base, Perspectiva desde el espectro de aceleraciones.....	29
Figura 4: Efectos del aislamiento de base, Perspectiva desde el espectro de desplazamientos.....	29
Figura 5: Efecto de las condiciones de suelo en la respuesta de las estructuras aisladas.....	30
Figura 6: Terminología del sistema de aislación.....	32
Figura 7: Aislador elastomérico de bajo amortiguamiento.....	34
Figura 8: Ciclo fuerza deformación de los aisladores de bajo amortiguamiento.....	34
Figura 9: Aislador elastomérico de alto amortiguamiento (HDRB).....	35
Figura 10: Ciclo fuerza deformación de los aisladores de alto amortiguamiento.....	36
Figura 11: Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB), (N-Z).....	37
Figura 12: Ciclo fuerza deformación de los aisladores con núcleo de plomo.....	37
Figura 13: Aisladores planos deslizantes.....	38
Figura 14: Ciclo fuerza deformación de los aisladores por fricción sin fuerza restauradora.....	38
Figura 15: Combinación de fuerza restauradora y fricción en el FPS.....	40
Figura 16: Principios del funcionamiento del péndulo de fricción simple.....	40
Figura 17: Péndulo de fricción.....	41
Figura 18: Comportamiento del FPS. Fuente: Earthquake protection systems.....	41
Figura 19: (a) Comportamiento Histerético, (b) Comportamiento visco-elástico.....	43
Figura 20: Modelo bilineal del aislador.....	45
Figura 21: Espectro Elástico de Aceleraciones de Diseño como fracción de gravedad definido para un amortiguamiento del 5%.....	58

Figura 22: Acelerogramas correspondientes a la falla frontal de los llanos orientales. ....	59
Figura 23: Acelerogramas correspondientes a la falla Bucaramanga-Santa Marta. ....	59
Figura 24: Espectro de aceleraciones horizontales elástico del umbral de daño definido para un amortiguamiento del 2%.....	65
Figura 25: Factor de reducción por amortiguamiento. ....	72
Figura 26: Comportamiento de los aisladores elastoméricos SAP 2000.....	96
Figura 27: Comportamiento de péndulo de fricción SAP2000. ....	98
Figura 28: Cuadro para la definición de materiales en SAP200.....	102
Figura 29: Definición de secciones en SAP2000. ....	103
Figura 30: Definición de la fuente de masas. ....	103
Figura 31: Cuadro empleado para asignar masas al modelo.....	104
Figura 32: de las fuerzas en SAP200 para el análisis por FHE .....	105
Figura 33: Definir las funciones de espectros en SAP2000. ....	106
Figura 34: Definir las funciones de acelerogramas en SAP2000.....	106
Figura 35: Definición del caso de carga para el espectro de respuesta.....	107
Figura 36: Definición de caso de carga empleando análisis dinámico lineal.....	108
Figura 37: Herramienta de SAP2000 para definir aisladores de base. ....	109
Figura 38: Definición de las propiedades del aislador en SAP2000.....	110
Figura 39: Definición de las propiedades del aislador en SAP2000.....	111
Figura 40: Definición del amortiguamiento para los modos de vibración. ....	112
Figura 41: Función rampa empleada para cargas gravitacionales.....	113
Figura 42: Definición de los casos de carga gravitacionales en SAP2000. ....	113
Figura 43: Definición de los casos de carga no lineales para los sismos en SAP2000.....	114
Figura 44: Modos de vibración modelo 1 base fija.....	116
Figura 45: Modelado Final de la estructura correspondiente al modelo 1.....	119
Figura 46: Modos de vibración modelo 2 base aislada. ....	120
Figura 47: Modos de vibración modelo 2 base fija.....	126

Figura 48: Modelado Final de la estructura correspondiente al modelo 2.....	129
Figura 49: Modos de vibración modelo 2 base aislada.....	130
Figura 50: Cortante Basal Coalinga X Vs tiempo.....	136
Figura 51: Cortante Basal Coalinga Y Vs tiempo.....	136
Figura 52: Cortante Basal Duzce X Vs tiempo.....	137
Figura 53: Cortante Basal Duzce Y Vs tiempo.....	137
Figura 54: Cortante Basal Friuli X Vs tiempo.....	138
Figura 55: Cortante Basal Friuli Y Vs tiempo.....	138
Figura 56: Cortante Basal Helena X Vs tiempo.....	139
Figura 57: Cortante Basal Helena Y Vs tiempo.....	139
Figura 58: Cortante Basal Loma prieta X Vs tiempo.....	140
Figura 59: Cortante Basal Loma prieta Y Vs tiempo.....	140
Figura 60: Cortante Basal Mammoth X Vs tiempo.....	141
Figura 61: Cortante Basal Mammoth Y Vs tiempo.....	141
Figura 62: Cortante Basal Montenegro X Vs tiempo.....	142
Figura 63: Cortante Basal Montenegro Y Vs tiempo.....	142
Figura 64: Cortante Basal Pretolia X Vs tiempo.....	143
Figura 65: Cortante Basal Pretolia Y Vs tiempo.....	143
Figura 66: Cortante Basal Umbría X Vs tiempo.....	144
Figura 67: Cortante Basal Umbría Y Vs tiempo.....	144
Figura 68: Cortante Basal Whittier X Vs tiempo.....	145
Figura 69: Cortante Basal Whittier Y Vs tiempo.....	145
Figura 70: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Coalinga X.....	146
Figura 71: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Coalinga X.....	146
Figura 72: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Duzce X.....	147
Figura 73: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Duzce Y.....	147
Figura 74: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Friuli X.....	148
Figura 75: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Friuli Y.....	148
Figura 76: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Helena X.....	149
Figura 77: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Helena Y.....	149

Figura 78: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Loma prieta X .....	150
Figura 79: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Loma prieta Y .....	150
Figura 80: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Mammoth X .....	151
Figura 81: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Mammoth Y. ....	151
Figura 82: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Montenegro X .....	152
Figura 83: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Montenegro Y .....	152
Figura 84: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Pretolia x.....	153
Figura 85: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Pretolia Y .....	153
Figura 86: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Umbria X.....	154
Figura 87: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Umbria Y.....	154
Figura 88: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Whittier Y. ....	155
Figura 89: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para whittier Y. ....	155
Figura 90: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Coalinga X. ....	156
Figura 91: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Coalinga Y. ....	156
Figura 92: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Duzce X. ....	157
Figura 93: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Duzce Y. ....	157
Figura 94: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Friuli X.....	158
Figura 95: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Friuli Y.....	158
Figura 96: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Helena X.....	159
Figura 97: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Helena Y .....	159
Figura 98: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Loma prieta X. ....	160
Figura 99: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Loma prieta Y. ....	160
Figura 100: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Mammoth X. ....	161
Figura 101: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Mammoth Y. ....	161
Figura 102: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Montenegro X. ....	162
Figura 103: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Montenegro Y. ....	162
Figura 104: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Pretolia X. ....	163
Figura 105: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Pretolia X. ....	163
Figura 106: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Umbria X.....	164
Figura 107: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Umbria X.....	164

Figura 108: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Whittier X. ....	165
Figura 109: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Whittier Y. ....	165
Figura 110: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical pasara LRB.....	166
Figura 111: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical para HDRB.....	166
Figura 112: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical para FPS. ....	167
Figura 113: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical para base fija. ....	167
Figura 114: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical LRB.....	168
Figura 115: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical HDRB..	168
Figura 116: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical FPS.....	169
Figura 117: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical base fija. ....	169
Figura 118: Cortante en la base Vs Desplazamiento de un nodo en el plano de aislación. FPS. ....	170
Figura 119: Cortante en la base Vs Desplazamiento de un nodo en el plano de aislación LRB. ....	171
Figura 120: Cortante en la base Vs Desplazamiento de un nodo en el plano de aislación HDRB. ....	172
Figura 121: Comparación para el análisis estático lineal. Modelo 1 .....	173
Figura 122: comparación para el análisis dinámico modal espectral. Modelo 1 ..	173
Figura 123: Cortante basal para base fija y empleando aisladores. Modelo 1.....	174
Figura 124: Cortante basal para base fija y empleando aisladores. Modelo 1.....	174
Figura 125: Cortante basal Vs tiempo Coalinga X modelo 2 .....	176
Figura 126: Cortante basal Vs tiempo Coalinga Y modelo 2 .....	176
Figura 127: Cortante basal Vs tiempo Duzce X modelo 2 .....	177
Figura 128: Cortante basal Vs tiempo Duzce Y. modelo 2 .....	177
Figura 129: Cortante basal Vs tiempo Friuli X. modelo 2.....	178

Figura 130: Cortante basal Vs tiempo Friuli Y. modelo 2.....	178
Figura 131: Cortante basal Vs tiempo Helena X modelo 2 .....	179
Figura 132: Cortante basal Vs tiempo Helena Y. modelo 2 .....	179
Figura 133: Cortante basal Vs tiempo Loma prieta X modelo 2.....	180
Figura 134: Cortante basal Vs tiempo Loma prieta Y. modelo 2.....	180
Figura 135: Cortante basal Vs tiempo Mammoth X modelo 2.....	181
Figura 136: Cortante basal Vs tiempo Mammoth X modelo 2.....	181
Figura 137: Cortante basal Vs tiempo Montenegro X modelo 2.....	182
Figura 138: Cortante basal Vs tiempo Montenegro Y modelo 2.....	182
Figura 139: Cortante basal Vs tiempo Pretolia X. modelo 2.....	183
Figura 140: Cortante basal Vs tiempo Pretolia Y. modelo 2.....	183
Figura 141: Cortante basal Vs tiempo Umbria X modelo 2 .....	184
Figura 142: Cortante basal Vs tiempo Umbria Y modelo 2 .....	184
Figura 143: Cortante basal Vs tiempo Whittier X. modelo 2.....	185
Figura 144: Cortante basal Vs tiempo Whittier Y. modelo 2.....	185
Figura 145: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Coalinga X. ....	186
Figura 146: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Coalinga Y. ....	186
Figura 147: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Duzce X.....	187
Figura 148: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Duzce Y.....	187
Figura 149: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Friuli X. ....	188
Figura 150: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Friuli X. ....	188
Figura 151: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Helena X.....	189
Figura 152: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Helena Y.....	189
Figura 153: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Loma prieta X. .....	190
Figura 154: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Loma prieta Y. .....	190
Figura 155: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Mammoth X. ...	191
Figura 156: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Mammoth Y ...	191
Figura 157: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Montenegro X	192

Figura 158: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Montenegro Y. .....	192
Figura 159: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Pretolia X.....	193
Figura 160: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Pretolia Y.....	193
Figura 161: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Umbria X.....	194
Figura 162: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Umbria Y.....	194
Figura 163: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Whittier X.....	195
Figura 164: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Whittier Y.....	195
Figura 165: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Coalinga X .....	196
Figura 166: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Coalinga Y .....	196
Figura 167: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Duzce X .....	197
Figura 168: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Duzce Y. ....	197
Figura 169: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Friuli X.....	198
Figura 170: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Friuli Y.....	198
Figura 171: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Helena X.....	199
Figura 172: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Helena Y .....	199
Figura 173: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Loma prieta X.....	200
Figura 174: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Loma prieta Y.....	200
Figura 175: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Mammoth X.....	201
Figura 176: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Mammoth Y.....	201
Figura 177: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Montenegro X .....	202
Figura 178: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Montenegro Y. ....	202
Figura 179: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Pretolia X .....	203
Figura 180: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Pretolia Y. ....	203
Figura 181: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Umbria X.....	204
Figura 182: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Umbria Y.....	204
Figura 183: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Whittier X .....	205
Figura 184: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Whittier Y .....	205
Figura 185: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo LRB.....	206

Figura 186: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo HDRB.....	206
Figura 187: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo FPS.....	207
Figura 188: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo Base fija.....	207
Figura 189: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo LRB.....	208
Figura 190: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo HDRB.....	208
Figura 191: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo FPS.....	209
Figura 192: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo Base fija.....	209
Figura 193: Cortante en la base Vs Desplazamiento de un nodo en el plano de aislación. FPS.....	210
Figura 194: Cortante en la base Vs Desplazamiento de un nodo en el plano de aislación. LRB.....	211
Figura 195: Cortante en la base Vs Desplazamiento de un nodo en el plano de aislación. HDRB.....	212
Figura 196: Comparación de análisis estático lineal Modelo 2.....	213
Figura 197: Comparación de análisis dinámico lineal Modelo 2.....	213
Figura 198: Cortante basal para base fija y empleando aisladores modelo 2.....	214
Figura 199: Cortante basal para base fija y empleando aisladores modelo 2.....	214

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Valores de $A_a$ y de $A_v$ .....	56
Tabla 2: Nivel de amenaza sísmica según valores de $A_a$ y de $A_v$ .....	56
Tabla 3: Valores del coeficiente $F_a$ , para la zona de periodos cortos del espectro. .....	57
Tabla 4: Valores del coeficiente $F_v$ , para la zona de períodos intermedios del espectro. ....	57
Tabla 5: Valores del coeficiente de importancia $I$ .....	57
Tabla 6: Derivas máximas como porcentaje de $h_{pi}$ .....	64
Tabla 7 Valores de $A_a$ , $A_v$ , $A_e$ y $A_d$ y definición de la zona de amenaza sísmica de los municipios colombianos. ....	64
Tabla 8: Derivas máximas para el umbral de daño como porcentaje de $h_{pi}$ .....	66
Tabla 9: Coeficiente de amortiguamiento relacionado con el sistema de aislamiento.....	71
Tabla 10: Evaluación de cargas del modelo 1. ....	83
Tabla 11: Propiedades y cargas correspondientes a los entrepisos modelo 1 base fija. ....	83
Tabla 12: Propiedades y cargas correspondientes a los entrepisos modelo 1 base aislada.....	84
Tabla 13: Evaluación de cargas del modelo 2. ....	85
Tabla 14: Propiedades y cargas correspondientes a los entrepisos modelo 2 base fija. ....	85
Tabla 15: Propiedades y cargas correspondientes a los entrepisos modelo 2 base fija. ....	86
Tabla 16: Propiedades del HDRB. Para análisis lineal del sistema de aislación. ....	88
Tabla 17: Datos empleados para definir las propiedades del aislador.....	88
Tabla 18: Propiedades del HDRB. Para el análisis no lineal del sistema de aislación.....	89

Tabla 19: Propiedades del LRB empleado. Para análisis lineal del sistema de aislación.....	89
Tabla 20: Propiedades del LRB empleado. Para análisis no lineal del sistema de aislación.....	90
Tabla 21: Propiedades del FPS empleado. Para análisis lineal del sistema de aislación.....	90
Tabla 22: Propiedades del FPS empleado. Para análisis no lineal del sistema de aislación.....	91
Tabla 23: Propiedades del HDRB. Para análisis lineal del sistema de aislación. 92	
Tabla 24: Datos empleados para definir las propiedades del aislador.....	92
Tabla 25: Propiedades del HDRB. Para el análisis no lineal del sistema de aislación.....	93
Tabla 26: Propiedades del LRB empleado. Para análisis lineal del sistema de aislación.....	93
Tabla 27: Propiedades del LRB empleado. Para análisis no lineal del sistema de aislación.....	94
Tabla 28: Propiedades del FPS empleado. Para análisis lineal del sistema de aislación.....	94
Tabla 29: Propiedades del FPS empleado. Para análisis no lineal del sistema de aislación.....	95
Tabla 30: Periodos de vibración y porcentajes de participación de masa modelo 1 base fija.....	115
Tabla 31: Cortantes basales obtenidos para el análisis estático lineal. ....	117
Tabla 32: Cortantes basales obtenidos para el análisis dinámico lineal empleando el espectro de respuesta.....	117
Tabla 33: Cortantes basales para el análisis dinámico lineal empleando acelerogramas. ....	118
Tabla 34: Periodos de vibración y porcentajes de participación de masa modelo 1 base aislada.....	120
Tabla 35: Cortantes basales obtenidos para el análisis estático lineal. ....	121

Tabla 36: Cortantes basales obtenidos para el análisis dinámico lineal empleando el espectro de respuesta.....	121
Tabla 37: Cortantes basales para el análisis dinámico no lineal empleando HDRB. ....	122
Tabla 38: Cortantes basales para el análisis dinámico no lineal empleando LRB. ....	123
Tabla 39: Cortantes basales para el análisis dinámico no lineal empleando FPS. ....	124
Tabla 40: Periodos de vibración y porcentajes de participación de masa modelo 2 base fija.....	125
Tabla 41: Cortantes basales obtenidos para el análisis estático lineal. ....	126
Tabla 42: Cortantes basales obtenidos para el análisis dinámico lineal empleando el espectro de respuesta.....	127
Tabla 43: Cortantes basales para el análisis dinámico lineal empleando acelerogramas .....	128
Tabla 44: Periodos de vibración y porcentajes de participación de masa modelo 1 base aislada.....	130
Tabla 45: Cortantes basales obtenidos para el análisis estático lineal. ....	131
Tabla 46: Cortantes basales obtenidos para el análisis dinámico lineal empleando el espectro de respuesta.....	131
Tabla 47: Cortantes basales para el análisis dinámico no lineal empleando HDRB. ....	132
Tabla 48: Cortantes basales para el análisis dinámico no lineal empleando LRB. ....	133
Tabla 49: Cortantes basales para el análisis dinámico no lineal empleando FPS. ....	134
Tabla 50: Resumen de reducciones para los cortantes basales empleando aisladores.....	135
Tabla 51: Reducciones en fuerzas cortantes empleando aisladores de base. Modelo 2 .....	175

## LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1: Rigidez efectiva en un sistema bilineal.....	46
Ecuación 2: Desplazamiento de fluencia en sistema bilineal.....	46
Ecuación 3: Fuerza de fluencia en un sistema bilineal. ....	46
Ecuación 4: Amortiguamiento efectivo en un sistema bilineal.....	46
Ecuación 5: Amortiguamiento efectivo en un sistema bilineal.....	47
Ecuación 6: Fuerza característica para un aislador elastométrico con núcleo de plomo. ....	48
Ecuación 7: Rigidez plástica para un aislador elastométrico con núcleo de plomo. ....	48
Ecuación 8: Rigidez elástica en un aislador elastométrico con núcleo de plomo...48	
Ecuación 9: Desplazamiento de fluencia para un aislador elastométrico con núcleo de plomo. ....	49
Ecuación 10: Amortiguamiento efectivo para un aislador elastométrico con núcleo de plomo. ....	49
Ecuación 11: Rigidez plástica para un aislador elastométrico de alto amortiguamiento. ....	50
Ecuación 12: Fuerza característica para un aislador elastométrico de alto amortiguamiento. ....	50
Ecuación 13: Fuerza de fluencia para un aislador elastométrico de alto amortiguamiento. ....	51
Ecuación 14: Rigidez elástica para un aislador elastométrico de alto amortiguamiento. ....	51
Ecuación 15: Rigidez efectiva para un aislador elastométrico de alto amortiguamiento. ....	51
Ecuación 16: Fuerza característica para un aislador tipo péndulo de fricción.....	52
Ecuación 17: Coeficiente de fricción dinámico para un aislador tipo péndulo de fricción.....	52

Ecuación 18: Rigidez plastica post-fluencia para un aislador tipo pendulo de fricción.....	53
Ecuación 19: Desplazameinto de diseño para un aislador tipo pendulo de fricción. ....	53
Ecuación 20: Rigidez efectiva para un aislador tipo pendulo de fricción.....	54
Ecuación 21: Energia disipada en un ciclo para un aislador tipo pendulo de fricción.....	54
Ecuación 22 .....	54
Ecuación 23: Cortante sísmico en la base método fuerza horizontal equivalente. ....	61
Ecuación 24: Ajuste de resultados para el análisis dinámico espectral. ....	63
Ecuación 25: Momento polar de inercia.....	83

## RESUMEN

**TITULO:** REDUCCIÓN DE LA DEMANDA SÍSMICA EN ESTRUCTURAS APORTICADAS EMPLEANDO AISLADORES DE BASE\*

**AUTOR:** GUERRERO MELO, José Roberto \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Aislamiento sísmico, Aisladores elastoméricos, Aisladores de fricción, Análisis Dinámico no lineal, Demanda Sísmica.

### CONTENIDO:

En este documento se presenta la investigación realizada sobre la reducción de la demanda sísmica para las estructuras de configuración tipo pórticos en concreto reforzado resistentes a momentos, cuando se emplean aisladores de base elastoméricos y de fricción, estableciendo una comparación entre estructuras convencionales con base fija y estructuras aisladas de su base.

Para este caso de estudio se emplean diferentes aisladores de base entre ellos las gomas de alto amortiguamiento, las gomas de bajo amortiguamiento con núcleo de plomo y el sistema de péndulo de fricción, se definen las propiedades de cada sistema de aisladores empleando el modelo bilineal, el modelado y los análisis correspondientes se desarrollan empleando el Software SAP2000.

Los análisis de las estructuras con base fija se realizaron según el Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR-10 y los análisis de estructuras aisladas según las recomendaciones de la norma "*NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings — Provisions and Commentary*" FEMA 450.

Los resultados del presente documento miden la reducción de la demanda sísmica y evidencian la importancia de emplear técnicas de control estructural para lograr un nivel de desempeño superior garantizando la seguridad a la vida y la integridad de la estructura y sus contenidos para sismos intensidades altas.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad Físico mecánicas. Escuela Ingeniería Civil. Director: Ing. Leocadio Rico Pradilla.

## ABSTRACT.

**TITLE:** SEISMIC DEMAND REDUCTION IN FRAMED STRUCTURES USING BASE ISOLATORS\*

**AUTHOR:** GUERRERO MELO, José Roberto \*\*

**KEY WORDS:** Elastomeric isolators, Friction isolators, Nonlinear dynamic analysis, Seismic isolation, Seismic demand.

### DESCRIPTION:

This paper presents a research developed about the reduction of seismic demand for structures with configuration is moment resisting frames of reinforced concrete, when using elastomeric base isolators and friction isolators, establishing a comparison between conventional fixed base structures and isolated structures.

This case of study uses different base isolators including high damping rubber bearing, lead rubber bearing and fiction pendulum system, the properties of each isolator are defined using the bilinear theory, modeling and corresponding analyzes are developed using the software SAP2000.

The analysis of fixed-base structures were performed according to the Reglamento Colombiano de construcción sismo resistene NSR-10 and the analysis of isolated structures by "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings - Provisions and Commentary" FEMA 450.

The results of this paper measured the reduction of seismic demand and demonstrate the importance of using structural control techniques to achieve a higher performance level to ensure the life safety and integrity of the structure and contents for high intensity earthquakes.

---

\* Research work

\*\* Physical Mechanical Engineering Faculty, Civil Engineering, Chief: Leocadio Rico Pradilla.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la ingeniería sísmica se ha orientado a investigar sistemas que reduzcan la amenaza sísmica con el fin de preservar la vida. Entre estos, los sistemas de control estructural pasivos como el aislamiento de la base han tomado gran importancia en el diseño y rehabilitación de estructuras, gracias a los buenos resultados que han mostrado en los estudios realizados y en los eventos sísmicos que han ocurrido, además con la ayuda de los computadores y procesadores actuales se facilita el análisis y los diseños de estructuras que incorporan estos sistemas. Hoy en día existe un número importante de ejemplos de estructuras construidas o rehabilitadas con aislamiento de base especialmente en aquellos países desarrollados y propensos a la amenaza sísmica.

En nuestro país recientemente se ha comenzado a trabajar con estas técnicas de control sísmico en obras de gran importancia, pero la realidad de nuestro medio nos enseña que son muy pocas las construcciones que emplean estas técnicas desarrolladas para reducir los efectos de las fuerzas sísmicas en las estructuras, manteniéndose el diseño convencional como la alternativa más empleada.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL:**

- Evaluar la reducción de la demanda sísmica en estructuras aporticadas mediante la comparación de la respuesta de un edificio sin aislamiento basal y uno con aislamiento basal.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Evidenciar como la disipación pasiva de energía es una tecnología que mejora el desempeño de una edificación añadiendo amortiguamiento a su estructura.
- Mostrar el comportamiento sísmico de una estructura aporticada con aisladores de base por medio de un modelo computarizado empleando análisis dinámico lineal.
- Emplear diferentes sistemas de aislamiento de base como LRB, péndulo de fricción, en estructuras aporticadas para realizar los análisis.
- Comparar los resultados de los análisis de los diferentes sistemas de aislamiento de base.

### 3. PRINCIPIOS DEL AISLAMIENTO DE BASE

Intuitivamente el concepto de aislar la estructura del suelo para evitar los daños producidos por los sismos es simple de comprender, después de todo en un sismo el suelo se mueve y por esta razón se generan los daños incluso en aquellas estructuras que se encuentren bien diseñadas y cumplan con las normativas correspondientes. Entonces se requiere un sistema que provea la resistencia apropiada para las sollicitaciones verticales y que permita generar un desacoplamiento del movimiento del terreno.

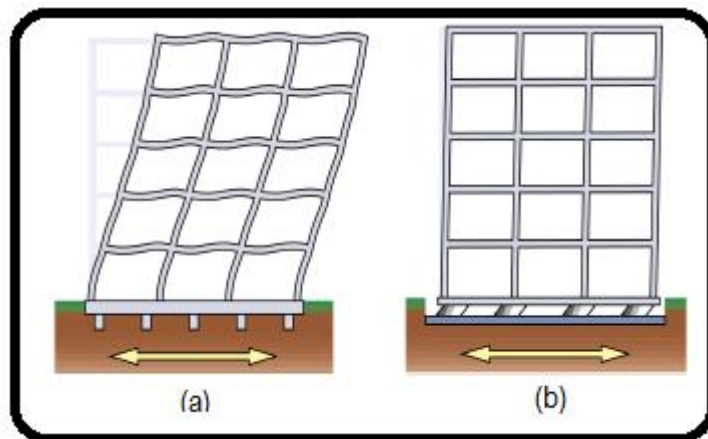


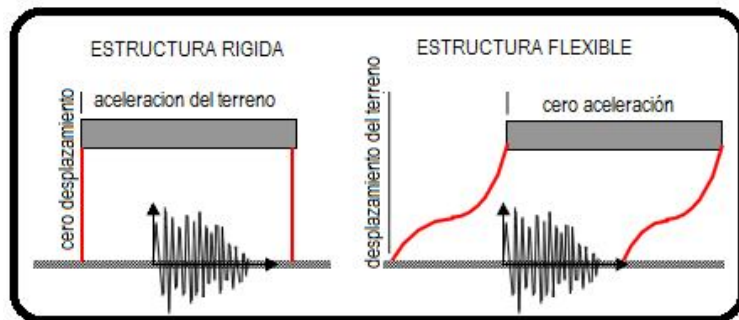
Figura 1: (a) Estructura con base fija, (b) Estructura con base aislada.

Fuente: Seismic protective systems

Sabemos que los sismos ocurren y son incontrolables por este motivo debemos buscar que la capacidad de las estructuras sea superior a la demanda generada por los movimientos del terreno. Los sismos generan fuerzas inerciales proporcionales al producto de la masa del edificio y la aceleración del terreno, de esta forma al aumentar la aceleración se debe aumentar la resistencia de la estructura, sin embargo no es práctico aumentar la resistencia de la estructura en

aquellas zonas donde se presenten grandes aceleraciones ya que diseñar para estos niveles de resistencia no será fácil y viable económicamente. Los fundamentos de los diseños estructurales tradicionales se enfocan en la capacidad de la estructura, el sistema de aislamiento de base se centra en reducir la demanda, ya que nosotros no podemos controlar el sismo pero podemos modificar la demanda de este sobre la estructura previniendo que los movimientos se transmitan desde la cimentación hacia la estructura.

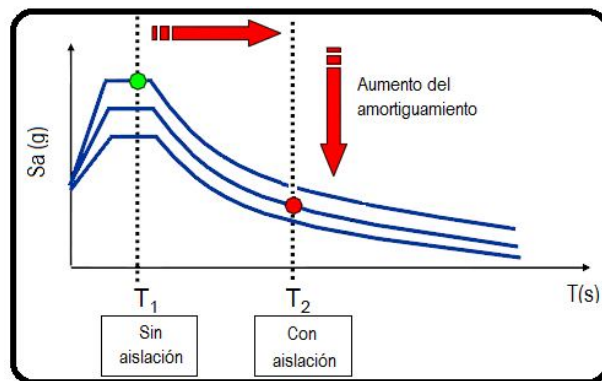
El principio fundamental del aislamiento de base es modificar la respuesta de la estructura para que el movimiento del terreno bajo esta no se transmita, si pensamos en un sistema ideal esta separación sería total, pero en la práctica se requiere contacto entre la estructura y el suelo. Podemos analizar la transmisión de los movimientos del terreno a la estructura relacionando dos casos hipotéticos donde una estructura perfectamente rígida (periodo cero) tendrá una aceleración igual a la aceleración del terreno y el desplazamiento relativo será cero es decir que el suelo y la estructura se mueven la misma cantidad; por otra parte una estructura perfectamente flexible (periodo infinito) al producirse un sismo no inducirá aceleración y el desplazamiento relativo será igual al movimiento del terreno.



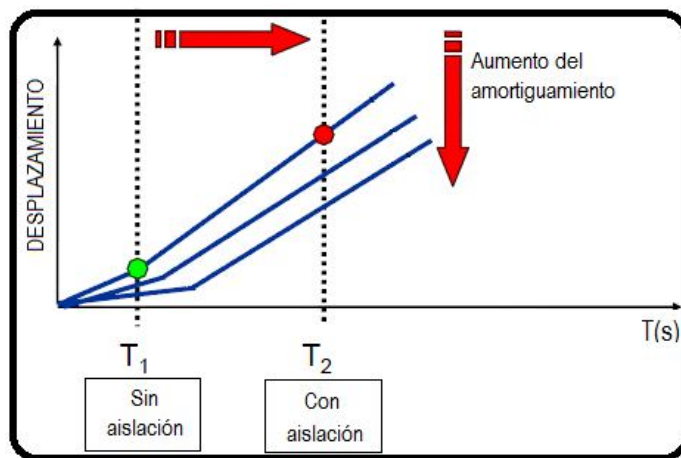
**Figura 2: Transmisión de los movimientos del terreno.**

**Fuente: BASE ISOLATIONS DESIGN GUIDELINES.**

Las componentes fundamentales de un sistema de aislación son la flexibilidad y el amortiguamiento, la combinación de estos dos genera grandes efectos en la respuesta de las edificaciones, especialmente en estructuras caracterizadas por tener bajos periodos. La flexibilidad es un efecto de incrementar el periodo en una estructura esto genera un aumento en los desplazamientos los cuales se encuentran concentrados en el plano de aislación.



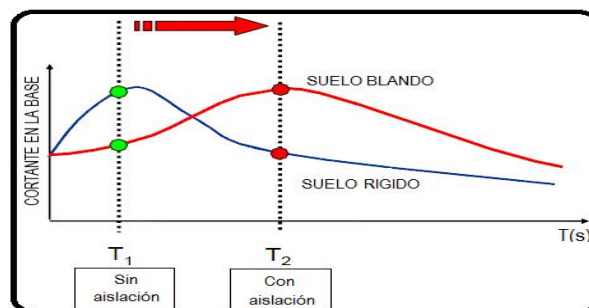
**Figura 3: Efectos del aislamiento de base, Perspectiva desde el espectro de aceleraciones.**  
**Fuente: Seismic protective systems**



**Figura 4: Efectos del aislamiento de base, Perspectiva desde el espectro de desplazamientos.** Fuente: Seismic protective systems

Los sistemas de aislamiento de base son un sistema de control estructural pasivo de grandes beneficios ya que permite que las labores realizadas en estas edificaciones continúen sin mayores interrupciones (Nivel de ocupación Inmediata)<sup>1</sup>, minimiza los daños en elementos estructurales y no estructurales, reduce las aceleraciones minimizando de esta forma el daño de los equipos y contenidos dentro de la edificación. Para lograr estos beneficios se debe tener en cuenta en qué casos se hace más efectivo el aislamiento de base dependiendo del tipo de suelo donde se encuentre localizada la estructura y el periodo fundamental de esta.

Se sabe que el aislamiento de base es más efectivo si se emplea en estructuras con periodos fundamentales bajos, es decir estructuras rígidas de altura media a baja; en cuanto al tipo de suelo el sistema de aislamiento de base es más efectivo en tipos de suelo rígido esto se debe a que los suelos blandos pueden filtrar las altas frecuencias generadas por el sismo y generar frecuencias que produzcan periodos altos, amplificando de manera indeseable los desplazamientos de las estructuras aisladas de su base.



**Figura 5: Efecto de las condiciones de suelo en la respuesta de las estructuras aisladas.**

**Fuente: Seismic protective systems**

<sup>1</sup> Según los niveles de desempeño estructural definidos por el Federal Emergency Management Agency (FEMA).

La mayoría de la población mundial está bajo la amenaza sísmica, solo en nuestro país de acuerdo con los estudios realizados para la determinación del grado de amenaza sísmica de las diferentes regiones se encontró que 16.45 millones de colombianos de 553 de los 1126 municipios del país se encuentran en zonas de amenaza sísmica alta, es decir el 39.7% de la población nacional; 19.62 millones de habitantes de 431 municipios localizados en zonas de amenaza sísmica intermedia, equivalentes al 47.3% de la población del país; y 5.39 millones de habitantes en 139 municipios localizados en zonas de amenaza sísmica baja, es decir el 13% del total de la población nacional según la última información suministrada por el DANE proveniente del censo de 2005. En otras palabras, el 87% de los colombianos se encuentran bajo un nivel de riesgo sísmico apreciable, que no solamente depende del grado de amenaza sísmica sino también del grado de vulnerabilidad que en general tienen las edificaciones en cada sitio,<sup>2</sup> por esta razón la ingeniería estructural se enfoca en el diseño de estructuras que permitan preservar la vida ante la ocurrencia de un sismo, no obstante el costo de la estructura y la importancia de los contenidos, nos hace pensar en emplear las técnicas de control estructural entre ellas el aislamiento de base, donde no solo se cumple con la protección de la vida sino que además se genera una protección adicional a la estructura generando una integridad en el diseño. Esta es la proyección del diseño de estructuras y han de ser los primeros pasos hacia las nuevas técnicas y estudios desarrollados en el campo de la ingeniería sísmica.

---

<sup>2</sup> Información tomada del censo de 2005 realizado por el DANE.

#### 4. LOCALIZACIÓN Y TIPOS DE DISPOSITIVOS.

##### 4.1. LOCALIZACIÓN DE LOS AISLADORES.

La localización de los aisladores puede realizarse directamente sobre la cimentación en el caso de aquellas estructuras que no tienen sótano, si la estructura tiene sótano se puede instalar en la parte superior, media o baja de las columnas. La configuración estructural mas empleada es generar un diafragma inmediatamente sobre los aisladores, esto permite que los desplazamientos en los aisladores sean iguales y que las cargas del sismo se distribuyan de acuerdo a su rigidez.

Es necesario que en el diseño se prevea el espacio suficiente entre el piso de la estructura y la interfaz de aislamiento para permitir el ingreso de personal calificado para la inspección y de ser el caso realizar que el espacio sea apropiado para realizar el reemplazo de algún aislador.

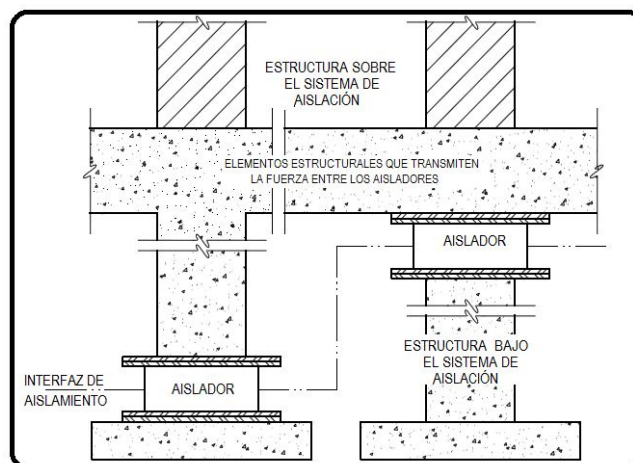


Figura 6: Terminología del sistema de aislación.

Fuente: FEMA 451, NEHRP RECOMMENDED PROVISIONS, DESING EXAMPLES.

La selección del tipo de aislador se tiene que realizar cuidadosamente, teniendo en cuenta que ningún dispositivo de aislación es perfecto de ser así todos los proyectos usarían el mismo aislador; cada aislador tiene sus ventajas y sus defectos las cuales se deben estudiar y ajustar de acuerdo a los requerimientos del proyecto.

## **4.2. AISLADORES ELASTOMÉRICOS**

Los aisladores elastoméricos están compuestos por capas de de goma alternadas con laminas de acero, el propósito de estas laminas de acero es aumentar la rigidez vertical de el apoyo, para controlar las cargas gravitacionales generadas por el peso de la estructura. Los apoyos elastoméricos han probados durante muchos años y han funcionado satisfactoriamente.

### **4.2.1. Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento “low damping bearings”.**

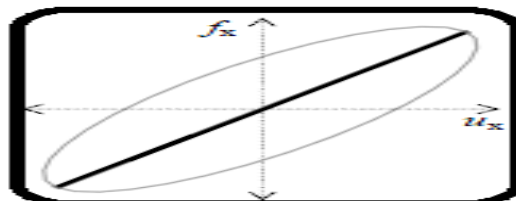
Inicialmente se hacían de goma natural pero con el tiempo se mejoraron sus propiedades incluyendo laminas de acero, generalmente se emplean laminas de 2.5cm de espesor entre capas de goma que varían de 7 a 15 cm, logrando de esta forma un aumento en la rigidez vertical y un mayor control sobre las deformaciones generadas por el peso de la estructura.

Estos aisladores son fáciles de fabricar y su costo es relativamente bajo comparado con otros dispositivos, pero debido a sus propiedades mecánicas y bajo amortiguamiento tienen baja resistencia al desplazamiento bajo cargas de servicio, es por esta razón que se suelen emplear en combinación con otros sistemas de aislación. Este dispositivo se caracteriza por tener un comportamiento lineal lo cual hace más fácil el modelado de este tipo de aislador se puede representar como un resorte y un amortiguador actuando en paralelo (Sismo & Kelly, 1984).



**Figura 7: Aislador elastomérico de bajo amortiguamiento.**  
**Fuente: Seismic protective systems**

Estos dispositivos que se fabrican de goma natural generalmente tienen un coeficiente entre 2% y 3% del amortiguamiento crítico debido a las propiedades de flexibilidad de la goma y al alto rango de deformación elástica por cortante.



**Figura 8: Ciclo fuerza deformación de los aisladores de bajo amortiguamiento.**

#### 4.2.2. Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento “High damping rubber bearings” (HDRB):

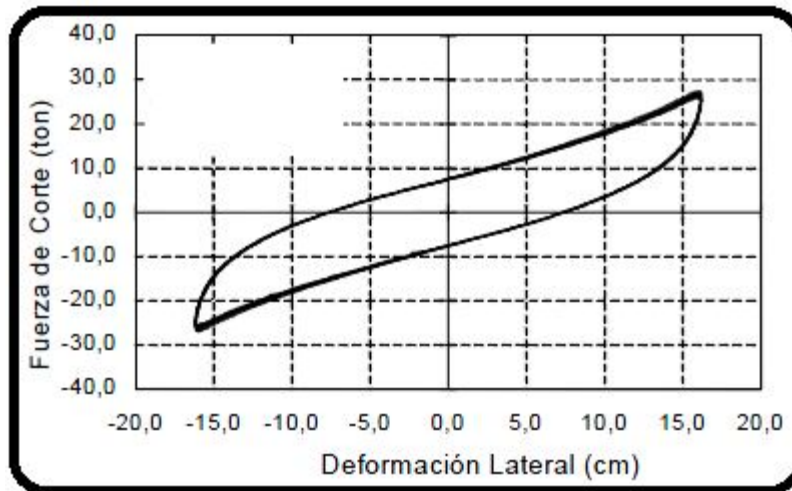
Los aisladores de alto amortiguamiento están hechos de un compuesto especial de goma obtenido con la adición de carbono extra fino, aceite negro, o resinas que permite alcanzar valores más altos de amortiguamiento. Se encuentra compuesta de goma y laminas de acero para aumentar su rigidez vertical y controlar deformaciones debidas a cargas generadas por el peso de la estructura.



Figura 9: Aislador elastomérico de alto amortiguamiento (HDRB).

Fuente: Catalogo ALGA.

Los valores de amortiguamiento varían entre el 10% y el 20% (Naiem & Kelly, 1999), el análisis de estructuras aisladas con estos dispositivos se realiza como un sistema bilineal cuyas propiedades dependen de la razón de amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$  y el modulo de cortante  $G$ , estas propiedades se mostraran con más detalle en el planteamiento de la teoría bilineal.



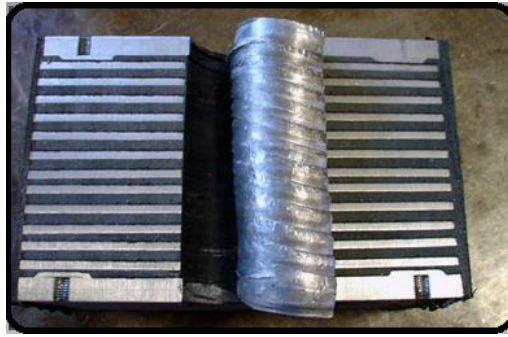
**Figura 10: Ciclo fuerza deformación de los aisladores de alto amortiguamiento.**

**Fuente: Norma Chilena Nch2745-2003.**

La desventaja que se podría presentar eventualmente sería el deterioro presentado por el paso del tiempo y algunos cambios en el clima

#### **4.2.3. Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo “lead rubber bearings” (LRB) - “New Zealand (N-Z):**

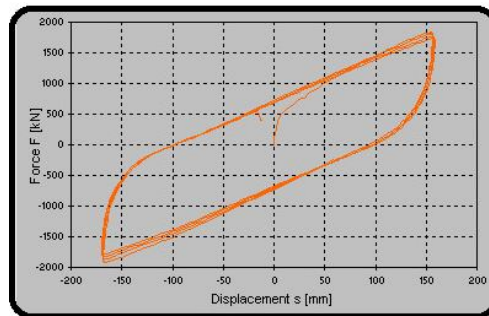
Las desventajas de las gomas de bajo amortiguamiento se pueden superar si se introduce un núcleo de plomo dentro del aislador, proporcionando medios adicionales de disipación de energía y rigidez inicial contra los terremotos de menor importancia y vientos, (Robinson, 1982). Este aislador es ampliamente empleado en Nueva Zelanda de ahí que se refieran en algunas ocasiones y en otros textos a los sistemas N-Z.



**Figura 11: Aislador elastomérico con núcleo de plomo (LRB), (N-Z).**

**Fuente:** [http://www.maurer-soehne.com/structural\\_protection\\_systems/seismic\\_devices/isolators/lead\\_rubber\\_bearings/](http://www.maurer-soehne.com/structural_protection_systems/seismic_devices/isolators/lead_rubber_bearings/).

El comportamiento del aislador depende de la fuerza lateral que se impone, si la fuerza es muy pequeña será asumida por el núcleo de plomo y el sistema tendrá una alta rigidez, cuando al carga lateral se aumente el núcleo de plomo se deforma y empieza a fluir; el comportamiento histerético se genera con la energía disipada por el núcleo de plomo, como consecuencia la rigidez lateral del sistema disminuye. El amortiguamiento generalmente se encuentra entre el 15% y el 35% y se puede realizar el modelado de este aislador empleando la teoría bilineal.



**Figura 12: Ciclo fuerza deformación de los aisladores con núcleo de plomo.**

**Fuente:** [http://www.maurer-soehne.com/structural\\_protection\\_systems/seismic\\_devices/isolators/lead\\_rubber\\_bearings/](http://www.maurer-soehne.com/structural_protection_systems/seismic_devices/isolators/lead_rubber_bearings/).

### 4.3. AISLADORES TIPO FRICCIÓN:

Emplean capas de acero y materiales especiales con coeficientes de fricción definidos, originalmente se componían de láminas que ante las cargas del sismo resistían como producto del coeficiente de fricción y el peso de la estructura, pero poseían una gran desventaja debida a que la estructura después del sismo no podía volver a su posición inicial ya que no contaba con una fuerza restauradora, como consecuencia se podían presentar fallas en los apoyos.

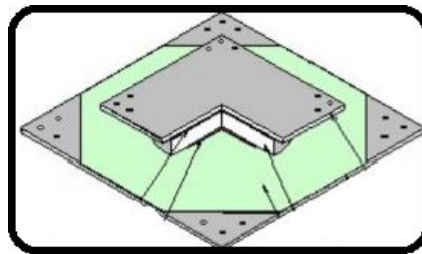


Figura 13: Aisladores planos deslizantes.

Fuente: Seismic protective systems

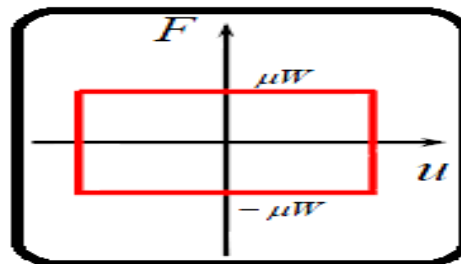


Figura 14: Ciclo fuerza deformación de los aisladores por fricción sin fuerza restauradora.

Fuente: Seismic protective systems

Estos apoyos no incrementan el periodo fundamental de la estructura, por lo cual no cumplen con los principios de los aisladores de base, solamente limitan la cantidad de fuerza que se transmite hacia la estructura, requieren mecanismos adicionales para poder volver a su posición inicial, no son usados comúnmente en estructuras de edificaciones, debido a sus desventajas, pero a partir de estos dispositivos se permitió desarrollar un mecanismo más completo denominado péndulo de fricción simple empleando una superficie esférica, este tipo de apoyo provee la fuerza de restauración necesaria.

#### **4.3.1. Sistema de péndulo de fricción (FPS):**

El concepto de sistemas de deslizamiento se utiliza junto con la noción de una respuesta de tipo péndulo, por medio de un control deslizante articulado en una superficie esférica cóncava (Zayas, 1990); el sistema de péndulo de fricción está compuesto por un deslizador articulado sobre una superficie de acero inoxidable. La parte del apoyo articulado que está en contacto con la superficie esférica, está rodeada por una película de un material compuesto de baja fricción Teflón<sup>3</sup>.

La fuerza impuesta hace que se produzca desplazamiento en las direcciones horizontal y vertical, cuando esta fuerza desaparece se genera la fuerza restauradora generando que el deslizador regrese a el centro de la concavidad, el movimiento para cuando la fricción es igual o más grande que la componente de la carga vertical aplicada.

---

<sup>3</sup> Politetrafluoroetileno (PTFE), o material similar.

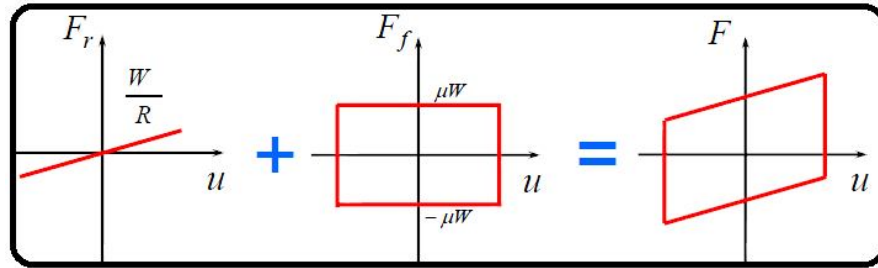


Figura 15: Combinación de fuerza restauradora y fricción en el FPS.

Fuente: Seismic protective systems

La rigidez efectiva del aislador y el periodo de oscilación de la estructura están controlados por el radio de curvatura de la superficie cóncava, los movimientos de torsión de la estructura se reducen al mínimo ya que el centro de la rigidez de los rodamientos de forma automática coincide con el centro de masa de la estructura de apoyo.

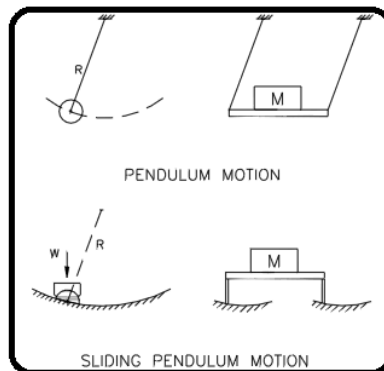


Figura 16: Principios del funcionamiento del péndulo de fricción simple.

Fuente: Earthquake protection systems

Los rangos de amortiguamiento de este sistema se encuentran entre 10% y 40%, por otra parte los coeficientes de fricción están entre 3% y 20% (Earthquake Protection Systems, Inc., 2003)



Figura 17: Péndulo de fricción. Fuente: Seismic protective systems

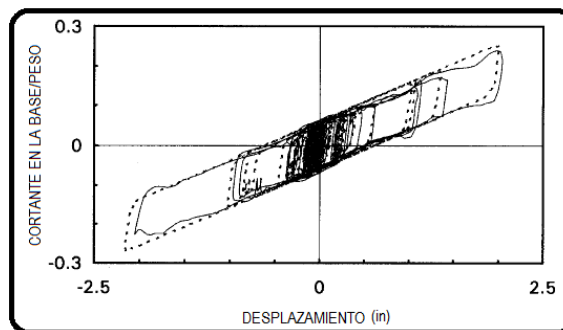


Figura 18: Comportamiento del FPS. Fuente: Earthquake protection systems.

El péndulo de fricción requiere un mantenimiento mínimo ya que la superficie de teflón protege al deslizador de la corrosión, si el deslizamiento solo se produce durante los sismos se puede decir que el recubrimiento de

Teflón funcionara durante la vida útil del diseño; incluso se han desarrollado dispositivos con capacidad de resistir fuerzas a tensión.

Recientemente se han desarrollado péndulos de fricción con dos y tres superficies cóncavas, produciendo el mismo movimiento horizontal y disminuyendo el tamaño del aislador.

## 5. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS AISLADORES DE BASE.

La respuesta de las estructuras aisladas puede ser de dos tipos lineal o no lineal, dependiendo de la configuración estructural, el tipo de suelo en el que se encuentre y la proximidad a las fallas activas.

Teóricamente la no linealidad de una edificación aislada de su base proviene de dos fuentes: Las deformaciones inelásticas en el sistema de resistencia sísmica de la estructura y el sistema de aislación, sin embargo considerando que el sistema de resistencia sísmica es más rígido que el sistema de aislación se espera que las deformaciones inelásticas se encuentren localizadas en los aisladores y la estructura sobre estos presente un comportamiento lineal.

Para hacer un uso seguro de los aisladores las propiedades mecánicas de diferentes tipos de aisladores han sido investigadas intensamente. Para poder representar el comportamiento histerético y visco-elástico de estos mismos, se han elaborado varios tipos de modelos matemáticos como los mostrados en las figuras.

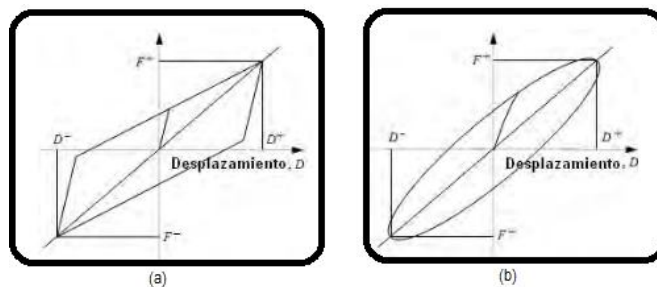


Figura 19: (a) Comportamiento Histerético, (b) Comportamiento visco-elástico. Fuente: SMART STRUCTURES 2008.

Los comportamientos histeréticos muestran que las propiedades de los aisladores son independientes de la velocidad, en este modelo los desplazamientos máximos y mínimos ocurren al cortante máximo y mínimo respectivamente.

Los comportamientos visco-elásticos muestran que las propiedades de los aisladores son dependientes de la velocidad, en este modelo los cortantes máximos y mínimos ocurren antes de los desplazamientos máximos y mínimos respectivamente.

El modelo bilineal ha sido ampliamente aceptado para la investigación y el diseño, esto se debe a que caracteriza las propiedades mecánicas de los aisladores adecuadamente pero también a que es válido tanto para aisladores elastoméricos como para aisladores de fricción.

### **5.1. PARÁMETROS DEL MODELO BILINEAL.**

El modelo bilineal, usado para expresar la relación entre la fuerza cortante y el desplazamiento lateral, puede definirse por tres parámetros básicos:

1. Rigidez Elástica  $k_e$ .
2. Rigidez Post-fluencia  $k_p$ .
3. Fuerza Característica  $Q$ .

La fuerza característica  $Q$  se emplea a menudo para estimar la estabilidad del comportamiento histerético cuando el aislador experimenta muchos ciclos de carga. Estos tres parámetros reflejan adecuadamente las características

mecánicas de los aisladores de una forma simple y suministran una estimación satisfactoria del comportamiento no lineal de un aislador.

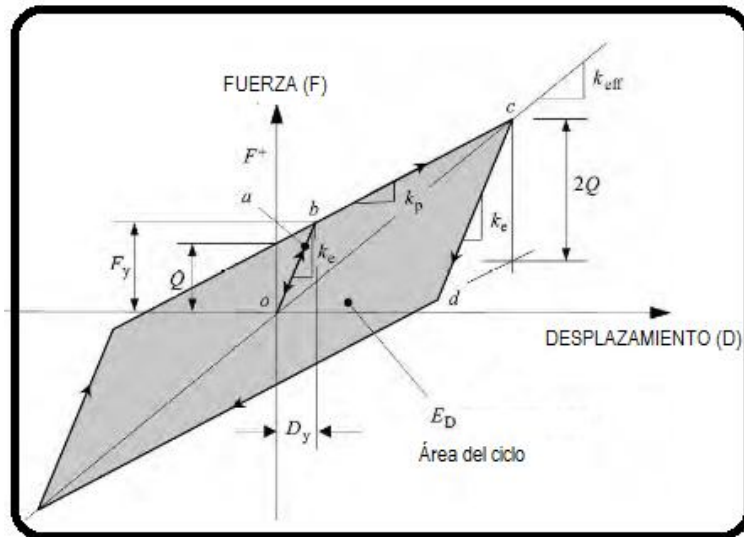


Figura 20: Modelo bilineal del aislador.

Fuente: SMART STRUCTURES 2008.

La figura muestra un modelo bilineal idealizado, cuando una fuerza cortante empieza a aplicarse sobre el aislador existe una relación lineal hasta antes de llegar al punto  $b$ , si la fuerza cortante decrece se espera que la descarga sea lineal. Una vez el cortante aumente hasta el punto  $b$  se produce la fluencia del aislador. Después del punto  $b$  el aislador experimenta grandes desplazamientos con pequeños incrementos de fuerza cortante y su rigidez se define como la rigidez post-fluencia  $k_p$ . Si la descarga se produce en el punto  $c$  la trayectoria de descarga no regresa por el mismo camino, en su lugar regresa por la trayectoria  $cd$ , con la misma rigidez inicial  $k_e$ . Cuando el cortante continúe más allá del punto  $d$ , la trayectoria es paralela a la línea  $bc$  y la rigidez es la rigidez post-fluencia  $k_p$ .

La rigidez efectiva  $k_{eff}$ , en la región de post-fluencia puede ser expresada en términos de la rigidez post-fluencia  $k_p$  y la fuerza característica  $Q$  con el correspondiente desplazamiento  $D$  lateral. De esta manera tenemos:

**Ecuación 1: Rigidez efectiva en un sistema bilineal.**

$$k_{EFF} = k_p + Q/D$$

El desplazamiento de fluencia  $D_y$ , también se deriva de  $k_e$ ,  $k_p$ ,  $Q$ :

**Ecuación 2: Desplazamiento de fluencia en sistema bilineal.**

$$D_y = \frac{Q}{k_e - k_p}$$

La fuerza de fluencia  $F_y$ , en el desplazamiento de fluencia  $D_y$  se determina a través de la siguiente ecuación:

**Ecuación 3: Fuerza de fluencia en un sistema bilineal.**

$$F_y = Q + k_p D_y$$

El amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$  se define como:

**Ecuación 4: Amortiguamiento efectivo en un sistema bilineal.**

$$\beta_{eff} = \frac{E_D}{2\pi k_{eff} D^2}$$

Donde  $ED$  es considerada como el área del ciclo de histéresis y corresponde a la energía disipada por ciclo, limitada por el desplazamiento lateral  $-D$  y  $+D$  en cada ciclo por lo tanto  $ED = 4Q(D - D_y)$ .

**Ecuación 5: Amortiguamiento efectivo en un sistema bilineal.**

$$\beta_{eff} = \frac{4Q(D - D_y)}{2\pi k_{eff} D^2} = \frac{2Q(D - D_y)}{\pi k_{eff} D^2}$$

En el diseño estructural, tanto la rigidez efectiva como el amortiguamiento efectivo se determinan a partir del desplazamiento de diseño ( $DD$ ) y el desplazamiento máximo ( $DM$ ), los cuales se definen para un periodo fundamental del sistema.

## **5.2. MODELO BILINEAL DEL AISLADOR CON NÚCLEO DE PLOMO.**

La fuerza característica " $Q$ " de los aisladores con núcleo de plomo es controlada principalmente por la fuerza cortante del núcleo de plomo. El cortante de fluencia ocurre en el núcleo de plomo a bajos niveles de esfuerzo cortante. Sin embargo, el comportamiento histerético del aislador es bastante estable inclusive cuando éste es sometido a muchos ciclos de carga. La siguiente ecuación muestra la relación que existe entre la fuerza característica " $Q$ " y el producto del esfuerzo de fluencia  $f_y$  del plomo por el área de plomo  $A_1$ , como podemos ver este dato es característico para el aislador con núcleo de plomo:

**Ecuación 6: Fuerza característica para un aislador elastometrico con nucleo de plomo.**

$$Q = A_1 f_{y1}$$

La rigidez post-fluencia  $k_p$ , se define a continuación.

**Ecuación 7: Rigidez plastica para un aislador elastometrico con nucleo de plomo.**

$$k_p = \frac{A_b G f_L}{t}$$

Donde

$A_b$  = es el área de caucho

$t$  = el grosor total del caucho

$f_L = 1.5$

$G$  = modulo de cortante tangente del caucho (se determina a través de pruebas dinámicas de cortante)

La rigidez elástica  $k_e$  no es fácil de calcular pero a través de la siguiente ecuación empírica se puede obtener un valor aproximado, la rigidez elástica se define como un múltiplo de la rigidez post-fluencia, esto se puede escribir como:

**Ecuación 8: Rigidez elastica en un aislador elastometrico con nucleo de plomo.**

$$6.5k_p \leq k_e \leq 10k_p$$

En base a esta condición podemos conocer el desplazamiento de fluencia  $D_y$  sustituyendo los valores encontrados. Obtenemos la siguiente ecuación:

**Ecuación 9: Desplazamiento de fluencia para un aislador elastometrico con nucleo de plomo.**

$$D_y = \frac{Q}{k_e - k_p} \approx \frac{Q}{\kappa k_p - k_p} = \frac{Q}{(\kappa - 1)k_p}$$

Sustituyendo los datos encontrados hasta el momento podemos encontrar el amortiguamiento efectivo para un aislador con núcleo de plomo.

**Ecuación 10: Amortiguamiento efectivo para un aislador elastometrico con nucleo de plomo.**

$$\beta_{eff} = \frac{2Q(D - D_y)}{\pi k_{eff} D^2} = \frac{2Q[(\kappa - 1)k_p D - Q]}{\pi(\kappa - 1)k_p (k_p D + Q)D}$$

El modelo bilineal presentado anteriormente se puede emplear para realizar análisis no lineal de una estructura con aisladores elastoméricos con núcleo de plomo.

### 5.3. MODELO BILINEAL DEL AISLADOR DE ALTO AMORTIGUAMIENTO.

Para generar un modelo bilineal para un aislador elastométrico de alto amortiguamiento se emplean parámetros que son normalmente derivados del modulo de cortante  $G$  y el amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$ . El modulo de cortante tangente  $G$ , es determinado con precisión de una prueba dinámica de

cortante y el amortiguamiento efectivo, determinado de las pruebas a los prototipos de aisladores puede variar entre 10% y 20% del amortiguamiento crítico. La ecuación para calcular la rigidez post-fluencia  $k_p$  para este tipo de aisladores es:

**Ecuación 11: Rigidez plastica para un aislador elastometrico de alto amortiguamiento.**

$$k_p = \frac{A_b G}{t}$$

Donde:

$A_b$  = es el área de caucho

$t$  = el grosor total del caucho

$G$  = modulo de cortante tangente del caucho (se determina a través de pruebas dinámicas de cortante)

La fuerza característica  $Q$  puede ser evaluada por la siguiente ecuación:

**Ecuación 12: Fuerza caracteristica para un aislador elastometrico de alto amortiguamiento.**

$$Q = \frac{\pi \beta_{eff} k_p D_D^2}{(2 - \pi \beta_{eff}) D_D - 2 D_y}$$

Una estimación aproximada de  $D_y$  puede ser expresada en términos del espesor total de la goma,  $t$ :  $D_y = \lambda t$ , donde el coeficiente  $\lambda$  varía entre 0.05 y 0.1.

Una vez son conocidas la rigidez post-fluencia  $k_p$ , el desplazamiento de fluencia  $D_y$  y la fuerza característica  $Q$ , la fuerza de fluencia es fácilmente determinada por la siguiente ecuación.

**Ecuación 13: Fuerza de fluencia para un aislador elastometrico de alto amortiguamiento.**

$$F_y = Q + k_p D_y$$

Luego la rigidez elástica de los aisladores de alto amortiguamiento se convierte en:

**Ecuación 14: Rigidez elastica para un aislador elastometrico de alto amortiguamiento.**

$$k_e = \frac{F_y}{D_y} = k_p + \frac{Q}{D_y} = k_p \left\{ 1 + \frac{\pi \beta_{eff} k_p D_D^2}{\lambda t [(2 - \pi \beta_{eff}) D_D - 2 \lambda t]} \right\}$$

Si finalmente sustituimos  $D_y = \lambda t$ , la rigidez efectiva hasta lograrse el desplazamiento de diseño estará dada por:

**Ecuación 15: Rigidez efectiva para un aislador elastometrico de alto amortiguamiento.**

$$k_{eff} = \frac{2Q(D_D - \lambda t)}{\pi \beta_{eff} k_p D_D^2}$$

#### 5.4. MODELO BILINEAL DEL SISTEMA DE PÉNDULO DE FRICCIÓN.

La fuerza característica  $Q$  de un péndulo de fricción, es expresada como:

**Ecuación 16: Fuerza característica para un aislador tipo pendulo de fricción.**

$$Q = \mu_s P_c$$

Donde:

$P_c$  = Fuerza axial aplicada sobre el aislador, la cual está compuesta por la carga gravitacional  $P_g$  y el efecto de la aceleración vertical del terreno.

Despreciando los efectos de la aceleración vertical la fuerza axial  $P_c = P_g$ .

$\mu_s$  = Coeficiente de fricción que está relacionado a la velocidad de deslizamiento y se calcula empleando la siguiente ecuación.

**Ecuación 17: Coeficiente de fricción dinámico para un aislador tipo pendulo de fricción.**

$$\mu_s = f_{max} - (f_{max} - f_{min})e^{-\xi|\dot{D}|}$$

Donde:

$f_{max}$  y  $f_{min}$  = Son coeficientes de fricción calculados a alta y baja velocidad respectivamente

$\dot{D}$  = Representa la velocidad de movimiento del aislador

$\xi$  = Inversa de la velocidad de deslizamiento característica, este parámetro controla la transición de  $f_{max}$  a  $f_{min}$  y es calculada en base a experimentos, sin embargo algunos autores sugieren un valor aproximado de 2.54 s/in.

La rigidez post-fluencia  $k_p$  para los aisladores que utilizan péndulo de fricción se calcula a través de la siguiente ecuación

**Ecuación 18: Rigidez plastica post-fluencia para un aislador tipo pendulo de fricción.**

$$k_p = \frac{P_c}{R}$$

Donde:

R= Representa el radio de curvatura de la superficie deslizante, los resultados de los experimentos indican que rigidez elástica  $k_e$  con base a muchos experimentos que se han realizado alrededor de este sistema se ha determinado es normalmente al menos 100 veces más grande que la rigidez post-fluencia  $k_p$ . De acuerdo con esto se define al desplazamiento de fluencia como:

**Ecuación 19: Desplazameinto de diseño para un aislador tipo pendulo de fricción.**

$$D_y = \frac{Q}{k_e - k_p} \approx \frac{Q}{100k_p} = \frac{\mu_s P_c}{100(P_c/R)} = \frac{\mu_s P_c}{100}$$

Esta ecuación indica que el desplazamiento de fluencia  $D_y$  es un valor muy pequeño y que se puede aproximar a 0.1in.

La ecuación de la rigidez efectiva apara el sistema de péndulo de fricción la podemos escribir como:

**Ecuación 20: Rigidez efectiva para un aislador tipo pendulo de fricción.**

$$k_{eff} = k_p + \frac{Q}{D} = P_c \left( \frac{1}{R} + \frac{\mu_s}{D_D} \right)$$

Como el desplazamiento de fluencia  $D_y$  es tan pequeño comparándolo con el desplazamiento de diseño  $D_D$ , se puede ignorar para desarrollar la siguiente ecuación del área del ciclo de histéresis

**Ecuación 21: Energía disipada en un ciclo para un aislador tipo pendulo de fricción.**

$$E_D = 4Q(D_D - D_y) \approx 4QD_D = 4\mu_s P_c D$$

Finalmente podemos obtener el amortiguamiento efectivo correspondiente a este dispositivo

**Ecuación 22**

$$\beta_{eff} = \frac{E_D}{2\pi k_{eff} D^2} = \frac{4\mu_s P_c D_D}{2\pi \left( \frac{1}{R} + \mu_s / D_D \right) D_D^2} = \frac{2\mu_s}{\pi \left( \frac{D_D}{R} + \mu_s \right)}$$

## **6. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE ANÁLISIS PARA ESTRUCTURAS CON BASE FIJA DEFINIDOS POR LA NSR-10<sup>4</sup>.**

A continuación se presenta un resumen de los parámetros que contempla el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistente NSR-10 para evaluar las solicitaciones sísmicas y los criterios de las metodologías de análisis empleados en este trabajo de investigación.

Los modelos empleados en este estudio se encuentran en la ciudad de Bucaramanga, localizados sobre un perfil de suelo tipo C, siendo estructuras de carácter indispensable para la comunidad.

De acuerdo con estas características de las estructuras y el Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente podemos definir los siguientes parámetros:

### **CAPITULO A: ZONAS DE AMENAZA SÍSMICA Y MOVIMIENTOS SÍSMICOS DE DISEÑO.**

#### **A.2.2 — MOVIMIENTOS SÍSMICOS DE DISEÑO:**

---

<sup>4</sup> Los parámetros presentados en este trabajo son referencias puntuales a numerales establecidos por el título A de la NSR-10.

Región N°	Valor de $A_a$ o de $A_v$
10	0.50
9	0.45
8	0.40
7	0.35
6	0.30
5	0.25
4	0.20
3	0.15
2	0.10
1	0.05

Tabla 1: Valores de  $A_a$  y de  $A_v$ .<sup>5</sup>

### A.2.3 — ZONAS DE AMENAZA SÍSMICA:

Mayor valor entre $A_a$ y $A_v$	Asociado en mapas de las figuras A.2.3-2 y A.2.3-3 a Región N°	Amenaza Sísmica
0.50	10	Alta
0.45	9	Alta
0.40	8	Alta
0.35	7	Alta
0.30	6	Alta
0.25	5	Alta
0.20	4	Intermedia
0.15	3	Intermedia
0.10	2	Baja
0.05	1	Baja

Tabla 2: Nivel de amenaza sísmica según valores de  $A_a$  y de  $A_v$ .<sup>6</sup>

<sup>5</sup> Tomado del reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, Tabla A.2.2-1

<sup>6</sup> Tomado del reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, Tabla A.2.3-1

#### A.2.4 — EFECTOS LOCALES:

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_a \leq 0.1$	$A_a = 0.2$	$A_a = 0.3$	$A_a = 0.4$	$A_a \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Tabla 3: Valores del coeficiente  $F_a$ , para la zona de periodos cortos del espectro.<sup>7</sup>

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_v \leq 0.1$	$A_v = 0.2$	$A_v = 0.3$	$A_v = 0.4$	$A_v \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Tabla 4: Valores del coeficiente  $F_v$ , para la zona de períodos intermedios del espectro.<sup>8</sup>

#### A.2.5 — COEFICIENTE DE IMPORTANCIA:

Grupo de Uso	Coficiente de Importancia, I
IV	1.50
III	1.25
II	1.10
I	1.00

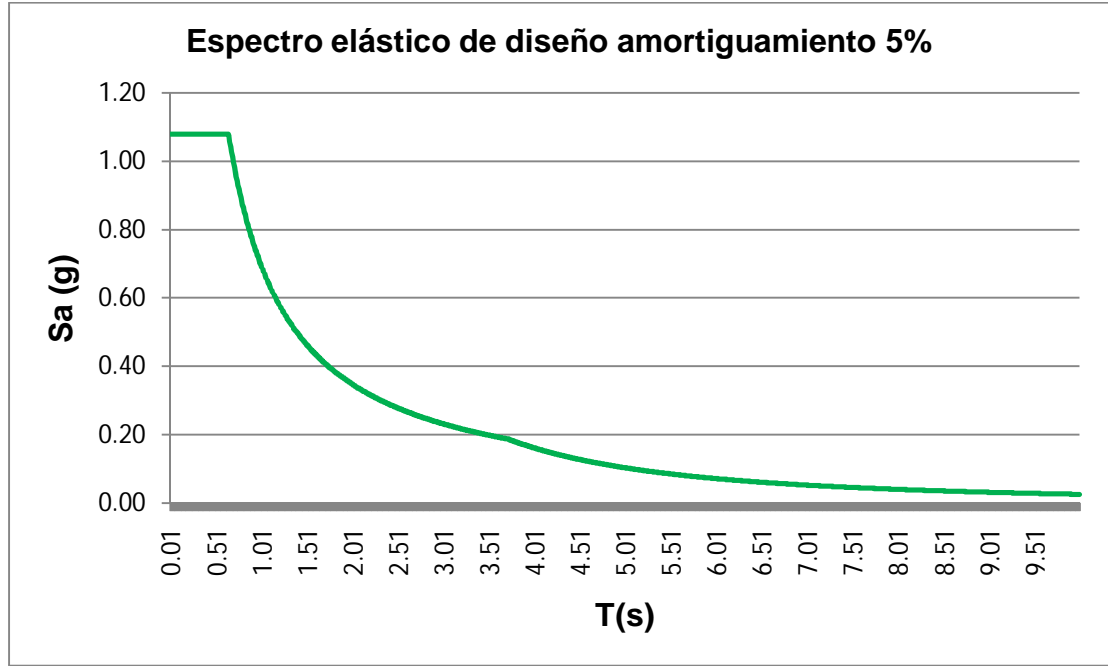
Tabla 5: Valores del coeficiente de importancia I.<sup>9</sup>

<sup>7</sup> Tomado del reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, Tabla A.2.4-3.

<sup>8</sup> Tomado del reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, Tabla A.2.4-4.

<sup>9</sup> Tomado del reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, Tabla A.2.5-1.

## A.2.6 — ESPECTRO DE DISEÑO:

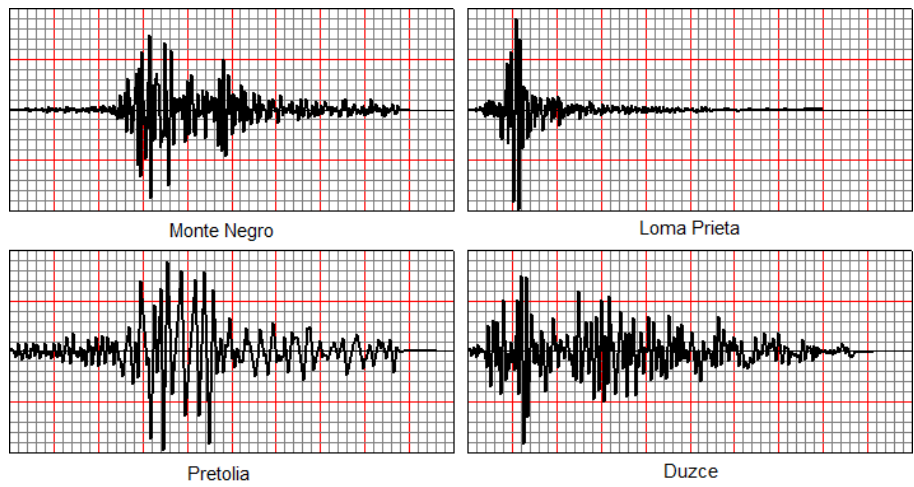


**Figura 21: Espectro Elástico de Aceleraciones de Diseño como fracción de gravedad definido para un amortiguamiento del 5%.<sup>10</sup>**

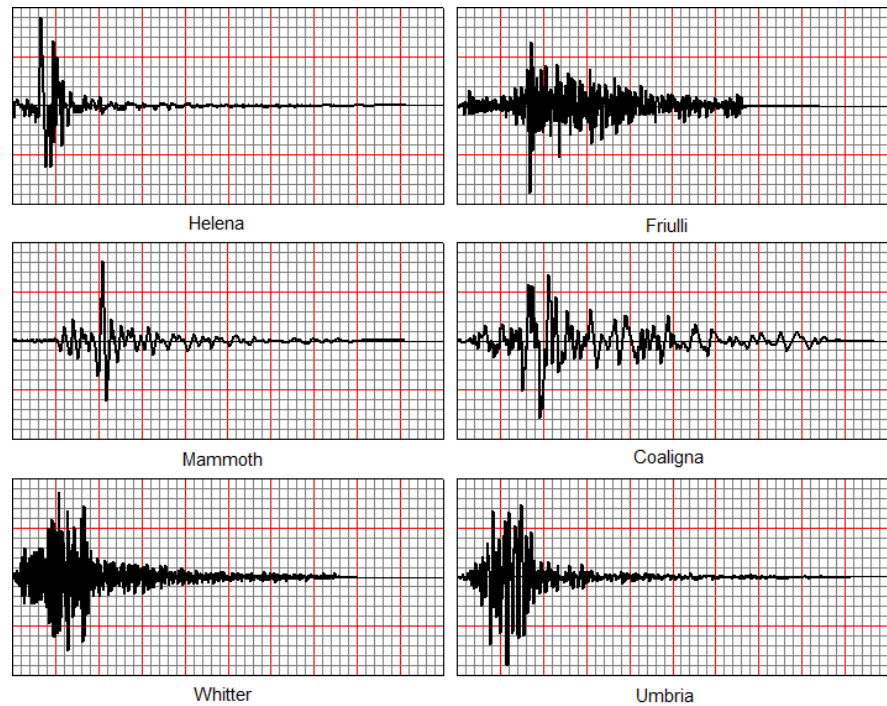
## A.2.7 — FAMILIAS DE ACELEROGRAMAS:

Para el análisis dinámico cronológico se emplearán los acelerogramas correspondientes a la microzonificación sísmica de Bucaramanga, cuatro correspondientes a la falla frontal de los llanos orientales y seis correspondientes a la falla Bucaramanga-Santa Marta, estos registros muestran los datos de la aceleración producida directamente sobre la roca.

<sup>10</sup> Tomado del reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, Figura A.2.6-1



**Figura 22: Acelerogramas correspondientes a la falla frontal de los llanos orientales.**  
**Fuente: Estudio de microzonificación sísmica Bucaramanga**



**Figura 23: Acelerogramas correspondientes a la falla Bucaramanga-Santa Marta.**  
**Fuente: Estudio de microzonificación sísmica Bucaramanga**

#### A.2.8 — COMPONENTE VERTICAL DE LOS MOVIMIENTOS SÍSMICOS.

La componente vertical de los movimientos sísmicos y sus efectos sobre las estructuras no serán evaluadas en el presente estudio.

### CAPÍTULO A.3 REQUISITOS GENERALES DE DISEÑO SISMO RESISTENTE

#### A.3.2 — SISTEMAS ESTRUCTURALES.

Las estructuras del presente estudio se consideran *Sistemas de pórticos espaciales* en concreto reforzado, resistentes a momentos, esencialmente completo, sin diagonales, que resiste todas las cargas verticales y fuerzas horizontales

#### A.3.3 — CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL DE LA EDIFICACIÓN.

En general se considera que las estructuras son regulares en planta y en altura con un grado de redundancia apropiado, es decir que los modelos no serán afectados por coeficientes de reducción, aunque el presente estudio tiene como objetivo en el análisis de estas estructuras y la determinación de la demanda sísmica, no en el correspondiente diseño de los elementos estructurales.

#### A.3.4 — MÉTODOS DE ANÁLISIS

- Estático lineal: Fuerza horizontal equivalente empleando movimientos sísmicos de diseño y movimientos sísmicos correspondientes al umbral de daño.

- Dinámico lineal: Análisis espectral empleando movimientos sísmicos de diseño y movimientos sísmicos correspondientes al umbral de daño y análisis cronológico empleando los sismos correspondientes a la microzonificación sísmica.

#### CAPÍTULO A.4 MÉTODO DE LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE.

Los análisis que emplean el método de la fuerza horizontal equivalente para estructuras con base fija serán desarrollados de acuerdo con lo especificado en este título de la norma.

#### A.4.3 — FUERZAS SÍSMICAS HORIZONTALES EQUIVALENTES

A.4.3.1 — El cortante sísmico en la base  $V_s$ , equivalente a la totalidad de los efectos inerciales horizontales producidos por los movimientos sísmicos de diseño, en la dirección en estudio, se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

**Ecuación 23: Cortante sísmico en la base método fuerza horizontal equivalente.**

$$V_s = S_a g M \quad (A.4.3-1)$$

Donde

$S_a$  Corresponde al valor de la aceleración, como fracción de la gravedad

$g$  Corresponde al valor de la aceleración de la gravedad.

$M$  Peso total de la estructura

## CAPÍTULO A.5 MÉTODO DEL ANÁLISIS DINÁMICO.

### A.5.2 — MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático empleado se realiza suponiendo que las estructuras del presente estudio tienen diafragmas infinitamente rígidos en sus entrepisos.

### A.5.3 — REPRESENTACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS SÍSMICOS.

A.5.3.2 — PROCEDIMIENTOS ESPECTRALES — En los procedimientos espectrales debe utilizarse el espectro de diseño definido en A.2.6.

### A.5.3.3 — PROCEDIMIENTOS CRONOLÓGICOS

En los procedimientos cronológicos deben utilizarse familias de acelerogramas, tal como las define A.2.7.

### A.5.4.5 — AJUSTE DE LOS RESULTADOS.

El valor del cortante dinámico total en la base,  $V_{tj}$ , obtenido después de realizar la combinación modal, para cualquiera de las direcciones de análisis,  $j$ , no puede ser menor que el 80 por ciento para las estructuras regulares, o que el 90 por ciento para estructuras irregulares, del cortante sísmico en la base,  $V_s$ , calculado por el método de la fuerza horizontal equivalente del capítulo A.4. Además, se deben cumplir las siguientes condiciones:

**(a)** Para efectos de calcular este valor de  $V_s$  el período fundamental de la estructura obtenido en el análisis dinámico,  $T$  en segundos no debe exceder  $C_u T_a$ , de acuerdo con los requisitos del capítulo A.4, y cuando se utilicen los procedimientos de interacción suelo-estructura se permite utilizar el valor de  $V_s$  reducido por esta razón.

**(b)** Cuando el valor del cortante dinámico total en la base,  $V_{ij}$ , obtenido después de realizar la combinación modal, para cualquiera de las direcciones de análisis,  $j$ , sea menor que el 80 por ciento para estructuras regulares, o que el 90 por ciento para estructuras irregulares, del cortante sísmico en la base,  $V_s$ , calculado como se indicó en (a), todos los parámetros de la respuesta dinámica, tales como deflexiones, derivas, fuerzas en los pisos, cortantes de piso, cortantes en la base y fuerzas en los elementos de la correspondiente dirección  $j$  deben multiplicarse por el siguiente factor de modificación:

**Ecuación 24: Ajuste de resultados para el análisis dinámico espectral.**

$$0.80 \frac{V_s}{V_{ij}} \text{ Para estructuras regulares} \quad (\text{A.5.4-4})$$

**(c)** Cuando el cortante sísmico en la base,  $V_{ij}$ , obtenido después de realizar la combinación modal, para cualquiera de las direcciones principales, excede los valores prescritos en (a), todos los parámetros de la respuesta dinámica total, tales como deflexiones, derivas, fuerzas en los pisos, cortantes de piso, cortante en la base y fuerzas en los elementos, pueden reducirse proporcionalmente, a juicio del diseñador.

## CAPÍTULO A.6 REQUISITOS DE LA DERIVA

### A.6.4 — LÍMITES DE LA DERIVA

Estructuras de:	Deriva máxima
concreto reforzado, metálicas, de madera, y de mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.2.2	1.0% ( $\Delta_{\max}^i \leq 0.010 h_{pi}$ )
de mampostería que cumplen los requisitos de A.6.4.2.3	0.5% ( $\Delta_{\max}^i \leq 0.005 h_{pi}$ )

Tabla 6: Derivas máximas como porcentaje de  $h_{pi}$

## CAPÍTULO A.12 REQUISITOS ESPECIALES PARA EDIFICACIONES INDISPENSABLES DE LOS GRUPOS DE USO III Y IV

El presente Capítulo contiene los requisitos adicionales, a los contenidos en los capítulos restantes del presente Título, que se deben cumplir en el diseño y construcción sismo resistente de las edificaciones pertenecientes al grupo de uso IV, esenciales para la recuperación de la comunidad con posterioridad a la ocurrencia de una emergencia, incluyendo un sismo, con el fin de garantizar que puedan operar durante y después de la ocurrencia de un temblor.

Municipio	Código Municipio	$A_a$	$A_v$	Zona de Amenaza Sísmica	$A_e$	$A_d$
Bucaramanga	68001	0.25	0.25	Alta	0.15	0.09

Tabla 7 Valores de  $A_a$ ,  $A_v$ ,  $A_e$  y  $A_d$  y definición de la zona de amenaza sísmica de los municipios colombianos.<sup>11</sup>

<sup>11</sup> Tomado del reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, Apéndice A-4.

### A.12.3 — ESPECTRO SÍSMICO PARA EL UMBRAL DE DAÑO.

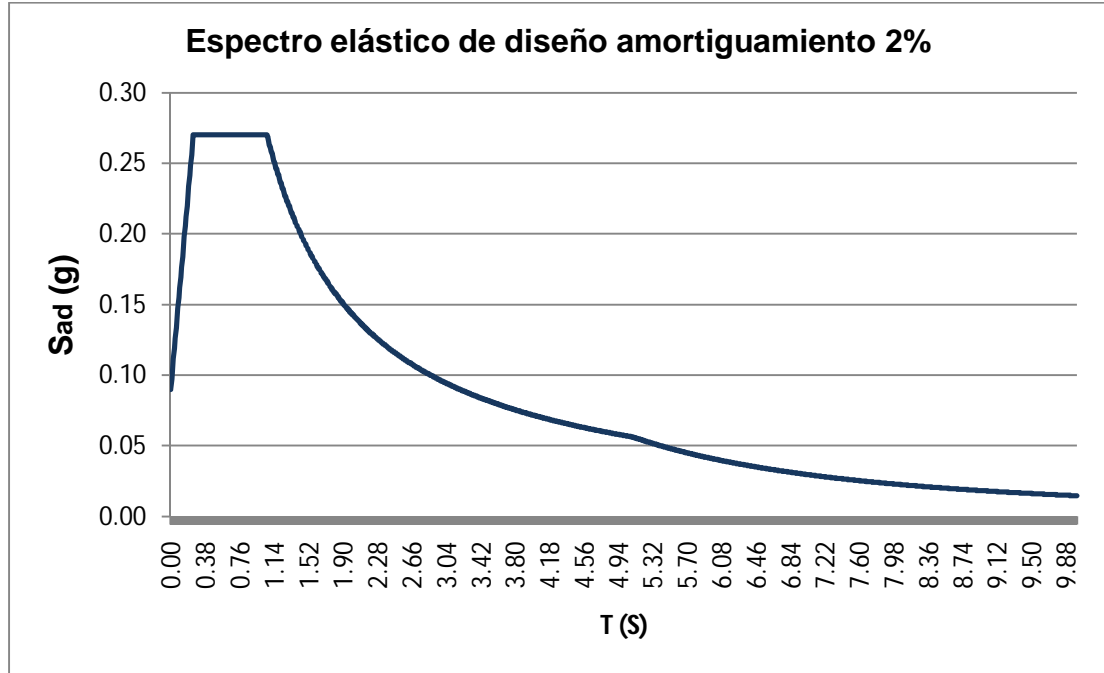


Figura 24: Espectro de aceleraciones horizontales elástico del umbral de daño definido para un amortiguamiento del 2%.<sup>12</sup>

### A.12.4.3 — USO DEL MÉTODO DE LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE EN LA EVALUACIÓN DEL UMBRAL DE DAÑO

Cuando se utilice el método de la fuerza horizontal equivalente en el análisis de la estructura para los movimientos sísmicos del umbral de daño deben tener en cuenta los siguientes aspectos los movimientos sísmicos del umbral de daño y realizar el procedimiento establecido por la norma.

<sup>12</sup> Tomado del reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, Figura A.12.3-1

#### A.12.4.4 USO DEL MÉTODO DE ANÁLISIS DINÁMICO EN LA EVALUACIÓN DEL UMBRAL DE DAÑO.

Cuando se utilice el método del análisis dinámico deben emplearse los movimientos sísmicos correspondientes al umbral de daño en vez de los movimientos sísmicos de diseño y cumplir con los requisitos de la metodología contenidos en este reglamento. El ajuste de los resultados indicado debe hacerse con respecto al valor de  $Vsd$ , obtenido por medio del método de FHE.

#### A.12.5.3 — LÍMITES DE LA DERIVA PARA EL UMBRAL DE DAÑO.

La deriva máxima, para el umbral de daño, evaluada en cualquier punto de la estructura debe ser menor a la deriva máxima expresada como un porcentaje de la altura de piso  $h_{pi}$  presentado a continuación.

Estructuras de:	Deriva máxima
concreto reforzado, metálicas, de madera, y de mampostería que cumplen los requisitos de A.12.5.3.1	0.40% ( $\Delta_{max}^i \leq 0.0040 h_{pi}$ )
de mampostería que cumplen los requisitos de A.12.5.3.2	0.20% ( $\Delta_{max}^i \leq 0.0020 h_{pi}$ )

Tabla 8: Derivas máximas para el umbral de daño como porcentaje de  $h_{pi}$ .<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Tomado del reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, Tabla A.12.5-1.

## 7. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ANÁLISIS PARA LOS MODELOS EMPLEANDO BASE AISLADA.

El Reglamento Colombiano de construcciones sismo resistentes NSR-10 establece las bases para un buen análisis y diseño sísmico, las cuales se pueden aplicar a diferentes tipos de edificios, sin embargo nos e establece ni especifican criterios que puedan utilizarse para analizar y diseñar las estructuras aisladas de su base.

### A.3.8 — ESTRUCTURAS AISLADAS SÍSMICAMENTE EN SU BASE<sup>14</sup>

A.3.8.1 — Se permite el empleo de estructuras aisladas sísmicamente en su base, siempre y cuando se cumplan en su totalidad los requisitos al respecto de uno de los dos documentos siguientes:

- a) “*NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings — Provisions and Commentary*”, 2003 Edition, Federal Emergency Management Agency, FEMA 450, Building Seismic Safety Council, National Institute of Buildings Sciences, Washington, D.C., USA, 2004.

---

<sup>14</sup> Tomado de la NSR-10.

- b) “*Minimum Design Loads for Building and Other Structures*”, ASCE/SEI 7-05, Structural Engineering Institute of the American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA, 2006

Para el análisis de los modelos empleados en este estudio se emplearán las mismas metodologías empleadas para el análisis de base fija, siguiendo con las provisiones del “*NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other structures — Provisions and Commentary*”. (FEMA 450).

De acuerdo con esta norma se presentan las siguientes definiciones:

- Desplazamiento de diseño: Desplazamiento calculado para el sismo de diseño, excluye desplazamientos adicionales por torsión.
- Desplazamiento total de diseño: Desplazamiento calculado para el sismo de diseño aquí se incluyen desplazamientos por torsión.
- Desplazamiento máximo: Desplazamiento calculado para el sismo de diseño aquí se incluyen desplazamientos por torsión.
- Desplazamiento total máximo: El máximo desplazamiento causado por el máximo terremoto posible incluye torsión, requerido para verificación de la estabilidad y la determinación de la separación a las estructuras adyacentes.

- Amortiguamiento efectivo: El valor del amortiguamiento viscoso equivalente correspondiente a la energía disipada durante la respuesta cíclica del sistema de aislamiento.
- Rigidez efectiva: El valor de la fuerza lateral en el sistema de aislamiento dividido entre el desplazamiento lateral correspondiente.
- Interfaz de aislamiento: Es el límite entre la porción superior de la estructura, la cual se encuentra aislada y la porción inferior de la estructura la cual se mueve rígidamente con el terreno.

Requerimientos generales de diseño:

El factor de importancia: Se puede tomar como 1.0 para las estructuras aisladas de su base. Dos razones justifican un valor único del coeficiente de importancia en estructuras aisladas. Primero, se reconoce que existe mayor certeza en relación a estructuras convencionales sobre el verdadero nivel de demanda impuesto sobre la estructura. Segundo, como el objetivo de desempeño del diseño es siempre lograr funcionalidad luego del sismo, no tiene sentido diferenciar por concepto de uso entre estructuras<sup>15</sup>.

Espectro de diseño: Se debe generar de acuerdo al tipo de suelo donde se encuentre la edificación empleando el procedimiento general, salvo cuando se encuentre en un perfil de suelo tipo F donde se requieren estudios geotécnicos específicos. El espectro de diseño para el sismo máximo

---

<sup>15</sup> Según los comentarios de la norma chilena para análisis y diseño de edificios con aislación sísmica.

posible no debe ser tomado menor que 1.5 veces el espectro de diseño para el sismo de diseño.

## **7.1. PROCEDIMIENTO FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE**

La fuerza horizontal equivalente es un método que emplea ecuaciones simples para determinar la respuesta de una estructura aislada. Las ecuaciones se basan en los movimientos del terreno que corresponden a un periodo de un segundo. A pesar de ser un método lineal de análisis las ecuaciones incorporan los valores del amortiguamiento para implícitamente contar con las propiedades no lineales del aislador, asumiendo a la súper estructura rígida y los desplazamientos principales ocurren en el plano de aislación.

### **7.1.1. Características de deformación del sistema de aislación.**

El mínimo sismo lateral para el diseño de desplazamientos y fuerzas en estructuras sísmicamente aisladas puede ser basado en las características de deformación del sistema aislado. Las características de deformación del sistema del aislamiento pueden explícitamente incluir los efectos de las restricciones producidas por el viento si se usa un sistema para conocer los requerimientos de diseño de estas provisiones.

### 7.1.2. Desplazamientos mínimos laterales:

$$D_D = \frac{S_a}{\omega_b^2 B_D} = \frac{1}{B_D} \left( \frac{T_D}{2\pi} \right)^2 \frac{S_{D1}}{T_D} g = \frac{g S_{D1} T_D}{4\pi^2 B_D}$$

Dónde:

$g$  = Aceleración de la gravedad.

$S_{D1}$  = Aceleración espectral de diseño correspondiente a un amortiguamiento del cinco por ciento y un periodo de un segundo.

$T_D$  = Periodo efectivo de una estructura sísmicamente aislada, en el desplazamiento de diseño en la dirección de consideración.

$B_D$  = Coeficiente numérico relacionado con el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento para el desplazamiento de diseño.

Amortiguamiento Efectivo $\beta_D$ o $\beta_M$ (porcentaje crítico) <sup>a,b</sup>	Factor $\beta_D$ o $\beta_M$
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

a. El coeficiente de amortiguamiento puede basarse en el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento.

b. El coeficiente de amortiguamiento puede basarse en una interpolación lineal para valores de amortiguamiento efectivo diferentes a los dados.

**Tabla 9: Coeficiente de amortiguamiento relacionado con el sistema de aislamiento.**<sup>16</sup>

<sup>16</sup> Tomado de "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other structures — Provisions and Commentary". (FEMA 450).

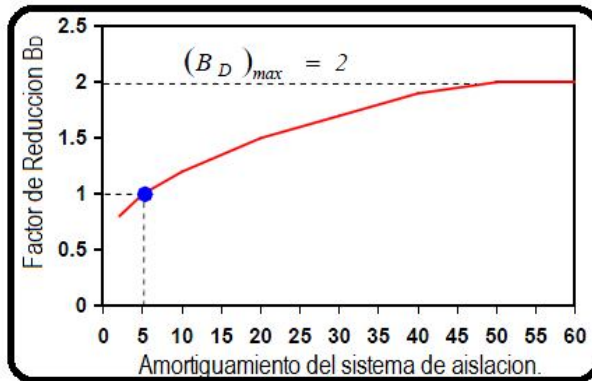


Figura 25: Factor de reducción por amortiguamiento. Fuente: Seismic protective systems

### 7.1.3. Periodo efectivo para el desplazamiento de diseño:

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{D \min} g}}$$

Dónde:

$g$  = Aceleración de la gravedad.

$k_{D \min}$  = Rigidez mínima efectiva del sistema de aislamiento para el desplazamiento de diseño en dirección horizontal.

$W$  = Peso sísmico sobre el sistema de aislación.

#### 7.1.4. Desplazamiento máximo:

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

Dónde:

$g$  = Aceleración de la gravedad.

$S_{M1}$  = Aceleración espectral máxima correspondiente a un amortiguamiento del cinco por ciento y un periodo de un segundo.

$T_M$  = Periodo efectivo de una estructura sísmicamente aislada, en el desplazamiento máximo en la dirección de consideración.

$B_M$  = Coeficiente numérico relacionado con el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento para el desplazamiento máximo.

#### 7.1.5. Periodo efectivo para el desplazamiento máximo:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_M \min g}}$$

Dónde:

$g$  = Aceleración de la gravedad.

$k_{D\ min}$  = Rigidez mínima efectiva del sistema de aislamiento para el desplazamiento máximo en dirección horizontal.

W = Peso sísmico sobre el sistema de aislación.

#### 7.1.6. Desplazamiento total de diseño:

$$D_{TD} = D_D \left[ 1 + \frac{12e}{b^2 + d^2} y \right]$$

Dónde:

$D_D$  = Desplazamientos de diseño en el centro de rigidez del sistema de aislación en dirección bajo consideración.

y = Distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento seleccionado, medido perpendicularmente a la dirección en la que fue cargado el sismo que se está considerando.

e = Excentricidad horizontal entre el centro de masa de la estructura y su centro de rigidez del sistema de aislación, más la excentricidad accidental, tomada como el 5% de la dimensión más larga de la estructura perpendicular a la dirección en que está considerando la fuerza.

b = Dimensión más pequeña de la estructura medid perpendicular a d.

d = Dimensión más larga de la estructura.

### 7.1.7. Desplazamiento total máximo:

$$D_{TM} = D_M \left[ 1 + \frac{12e}{b^2 + d^2} y \right]$$

Dónde:

$D_M$  = Desplazamiento máximo en el centro de rigidez del sistema de aislación en dirección bajo consideración.

$y$  = Distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento seleccionado, medido perpendicularmente a la dirección en la que fue cargado el sismo que se está considerando.

$e$  = Excentricidad horizontal entre el centro de masa de la estructura y su centro de rigidez del sistema de aislación, más la excentricidad accidental, tomada como el 5% de la dimensión más larga de la estructura perpendicular a la dirección en que está considerando la fuerza.

$b$  = Dimensión más pequeña de la estructura mediad perpendicular a  $d$ .

$d$  = Dimensión más larga de la estructura.

Los valores correspondientes al desplazamiento total de diseño  $D_{TD}$  y desplazamiento máximo de diseño  $D_{TM}$ , pueden ser tomados menores a los establecidos en las ecuaciones anteriores pero nunca menores a 1.1 veces cada desplazamiento respectivamente, si se

demuestra que el sistema de aislación puede resistir la torsión adecuadamente  $D_{TM}$

#### 7.1.8. Elementos estructurales bajo el sistema de aislación.

$$V_b = k_{D \max} D_D$$

Dónde:

$D_D$  = Desplazamiento de diseño en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración.

$k_{D \max}$  = Máxima rigidez efectiva en el centro de rigidez del sistema de aislación para el sismo de diseño en la dirección bajo consideración.

#### 7.1.9. Elementos estructurales sobre el sistema de aislación.

$$V_s = \frac{k_{D \max} D_D}{R_I}$$

Dónde:

$D_D$  = Desplazamiento de diseño en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración.

$k_{D\ max}$  = Rigidez máxima efectiva en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración.

$R_I$  = Coeficiente numérico relacionado con el tipo de sistema de resistencia sísmica sobre el sistema de aislación.

El coeficiente  $R_I$  será calculado de acuerdo con la siguiente expresión, asegurando que esencialmente la respuesta de la estructura es elástica:

$$R_I = \frac{3}{8} * R \quad 1 < \frac{R}{2.67} \leq 2$$

Dónde  $R$  es el coeficiente de capacidad de disipación de energía.

#### **7.1.10. Distribución vertical de las fuerzas**

La fuerza total puede ser distribuida en la altura de la estructura sobre el sistema de aislación de acuerdo con:

$$F_x = V_s \frac{w_x h_x}{\sum_i^n w_i * h_i}$$

Dónde:

$V_s$  = Fuerza lateral total de diseño en elementos sobre el sistema de aislación.

$w_x$  = Peso correspondiente al nivel x.

$h_x$  = Altura sobre el nivel de la base.

$w_i$  = Peso correspondiente al nivel i.

$h_i$  = Altura sobre hasta el nivel i.

Dado que el desplazamiento lateral de la estructura está dominado por el desplazamiento del sistema de aislación, la distribución actual de la fuerza lateral en el modo de respuesta aislado puede ser uniforme en la altura. Sin embargo se requiere una distribución triangular invertida de la fuerza lateral para estimar los posibles efectos de los modos superiores que se pueden haber omitido al no modelar la flexibilidad de la estructura.

Los límites para las derivas no deben exceder  $0.015 h_{sx}$  cuando se emplean el método de la fuerza horizontal equivalente y el procedimiento de espectro de respuesta y  $0.02h_{sx}$  empleando el procedimiento de respuesta en el tiempo.

## **7.2. PROCEDIMIENTOS DINÁMICOS.**

Los procedimientos de espectros de respuesta, análisis dinámicos lineales de respuesta en el tiempo y análisis dinámicos no lineales deben ser

desarrollados de acuerdo con los criterios establecidos para estructuras con base fija y emplear las siguientes consideraciones.

Procedimiento para espectro de respuesta:

Se puede desarrollar usando un valor de amortiguamiento modal, para los modos principales en la dirección de estudio, no mayor que el amortiguamiento del sistema o 30% del amortiguamiento crítico.

Cuando se empleen los espectros de respuesta para determinar el desplazamiento total de diseño y el desplazamiento máximo de diseño se puede incluir simultáneamente 100% de la acción sísmica en la dirección de estudio y 30% en la dirección perpendicular, el máximo desplazamiento se debe calcular como la suma vectorial de las dos componentes.

Desplazamientos y fuerzas laterales mínimas:

Los elementos que conforman el sistema de aislamiento, las cimentaciones y los elementos estructurales bajo el sistema de aislamiento deben ser diseñados y construidos usando los requerimientos para una estructura no aislada; la fuerza no debe ser tomada menor al 90% de  $V_b$  determinado de acuerdo con el procedimiento de fuerza horizontal equivalente. Los límites mínimos para las fuerzas de diseño de elementos sobre el sistema de aislamiento en el caso de estructuras regulares se tomarán como 80% de  $V_s$  empleando el método de espectro de respuesta y 60%  $V_s$  empleando el análisis cronológico; para las estructuras irregulares se debe tomar el 100% en el

caso de analisis empleando el espectro de respuesta y 80% empleando el analisis cronologico.

El desplazamiento total de diseño no se puede ser menor al 90% de  $D_{TD}$ .

El desplazamiento maximo de diseño de el sistema de aislacion no debe ser tomado menor al 80% de  $D_{TM}$ . Cuando se calculen  $D'_D$  y  $D'_M$  se puede permitir emplear estos valores en lugar de  $D_D, D_M$  para calcular los desplazamientos maximos.

$$D'_D = \frac{D_D}{\sqrt{1 + (T/T_D)^2}}$$

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + (T/T_M)^2}}$$

Donde:

$D_D$  = Desplazamiento de diseño en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración.

$D_M$  = Desplazamiento máximo en el centro de rigidez del sistema de aislación en dirección bajo consideración.

$T_D$  = Periodo efectivo de una estructura sísmicamente aislada, para el desplazamiento de diseño máximo en la dirección de consideración.

$T_M$  = Periodo efectivo de una estructura sísmicamente aislada, para el desplazamiento máximo en la dirección de consideración.

$T$  = Periodo elástico con base fija de la estructura sobre el sistema de aislación.

$$D_{TD} = \frac{D_D}{\sqrt{1 + (T/T_D)^2}} \left[ 1 + \frac{12e}{b^2 + d^2} y \right]$$

$$D_{TM} = \frac{D_M}{\sqrt{1 + (T/T_M)^2}} \left[ 1 + \frac{12e}{b^2 + d^2} y \right]$$

Dónde:

$D_D$  = Desplazamiento de diseño en el centro de rigidez del sistema de aislación en dirección bajo consideración.

$D_M$  = Desplazamiento máximo en el centro de rigidez del sistema de aislación en dirección bajo consideración.

$y$  = Distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento seleccionado, medido perpendicularmente a la dirección en la que fue cargado el sismo que se está considerando.

$e$  = Excentricidad horizontal entre el centro de masa de la estructura y su centro de rigidez del sistema de aislación, más la excentricidad accidental, tomada como el 5% de la dimensión más larga de la estructura perpendicular a la dirección en que está considerando la fuerza.

$b$  = Dimensión más pequeña de la estructura medid perpendicular a  $d$ .

$d$  = Dimensión más larga de la estructura.

## **8. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA Y LAS CARGAS PARA LOS MODELOS.**

Para definir geoméricamente el sistema de resistencia sísmica de cada modelo se empleo una distribución real de ejes estructurales y se modificaron las secciones en los elementos estructurales de los pórticos para lograr cumplir con los requisitos de derivas para los movimientos sísmicos de diseño y se realizo el chequeo de derivas correspondiente a los movimientos sísmicos para el umbral de daño empleando diferentes metodologías.

El modelo 1 corresponde a una estructura aporticada en concreto reforzado, Las dimensiones entre ejes estructurales de cada modelo se encuentran en los anexos de este trabajo.

### **8.1. MODELO 1 BASE FIJA:**

A continuación se presenta la evaluación de cargas muertas correspondiente a los elementos estructurales en la placa, los acabados y las instalaciones necesarias en el análisis de este modelo de acuerdo con el Título B de la NSR-10. Sin embargo se decidió que la evaluación de las cargas generadas por el peso propio de los pórticos de la estructura se considerara por el programa SAP2000 automáticamente para facilitar el chequeo de derivas de la estructura, no obstante se realizo la comparación de estos resultados con lo obtenido en hojas de cálculo y se encontró que el porcentaje de error es mínimo.

<b>CARGAS DEL MODELO 1</b>					
	Espesor o altura	Base	Longitud	KN/m3	KN/m2
Losa superior	0.06	1	1	24	1.44
Losa inferior	0.04	1	1	23	0.92
Viguetas	0.50	0.1	1	24	1.2
Casetón	-	-	-	-	0.3
Muros Divisorios	-	-	-	-	2
Acabado de pisos	-	-	-	-	1.1
Cielo raso	-	-	-	-	0.5
Ductos Mecánicos	-	-	-	-	0.2
					<b>7.66 KN/m2</b>

Carga Muerta sobre placa entrepiso	<b>7.66</b>	<b>KN/m2</b>
Carga Muerta sobre cubierta	<b>5.66</b>	<b>KN/m2</b>

**Tabla 10: Evaluación de cargas del modelo 1.<sup>17</sup>**

El área y los momentos de inercia se han determinado empleando la información de las plantas estructurales. Estos datos son fundamentales para el proceso de modelado y análisis de la estructura.

**Ecuación 25: Momento polar de inercia.**

$$J = \frac{(I_x + I_y) * m}{A}$$

<b>PRIMER PISO</b>		<b>SEGUNDO PISO</b>		<b>3 Y 4 PISO</b>		<b>CUBIERTA</b>	
Área (m <sup>2</sup> )	596.81	Área (m <sup>2</sup> )	533.62	Área (m <sup>2</sup> )	531.64	Área (m <sup>2</sup> )	503.03
I <sub>x</sub> (m <sup>4</sup> )	41802.11	I <sub>x</sub> (m <sup>4</sup> )	35944.89	I <sub>x</sub> (m <sup>4</sup> )	36682.48	I <sub>x</sub> (m <sup>4</sup> )	28920.33
I <sub>y</sub> (m <sup>4</sup> )	22390.04	I <sub>y</sub> (m <sup>4</sup> )	22341.31	I <sub>y</sub> (m <sup>4</sup> )	23655.3	I <sub>y</sub> (m <sup>4</sup> )	20805.78
masa (KN)	4571.55	masa (KN)	4087.5327	masa (KN)	4072.4253	masa (KN)	2847.1563
J (KN*m <sup>2</sup> )	491711.63	J (KN*m <sup>2</sup> )	446795.763	J (KN*m <sup>2</sup> )	462187.45	J (KN*m <sup>2</sup> )	281456.94

**Tabla 11: Propiedades y cargas correspondientes a los entrepisos modelo 1 base fija.**

<sup>17</sup> Las cargas definidas para los entrepisos con base fija y base aislada se han considerado iguales.

## 8.2. MODELO 1 BASE AISLADA:

La evaluación de cargas para el modelo en base aislada se realiza de igual forma que en el modelo de base fija obteniendo la misma carga por unidad de área, no obstante se han tenido en cuenta unos nuevos aspectos generados al reducir las secciones de los elementos estructurales y se ha generado un nuevo entrepiso considerado como un diafragma rígido en el sótano de características similares al primer piso.

SÓTANO Y PRIMER PISO		SEGUNDO PISO		3 Y 4 PISO		CUBIERTA	
Área (m <sup>2</sup> )	596.81	Área (m <sup>2</sup> )	533.62	Área (m <sup>2</sup> )	531.64	Área (m <sup>2</sup> )	503.03
Ix (m <sup>4</sup> )	41802.11	Ix (m <sup>4</sup> )	35944.89	Ix (m <sup>4</sup> )	36682.48	Ix (m <sup>4</sup> )	28920.33
Iy (m <sup>4</sup> )	22390.04	Iy (m <sup>4</sup> )	22341.31	Iy (m <sup>4</sup> )	23655.3	Iy (m <sup>4</sup> )	20805.78
masa (KN)	4571.55	masa (KN)	4087.5327	masa (KN)	4072.4253	masa (KN)	2847.1563
J (KN*m <sup>2</sup> )	491711.63	J (KN*m <sup>2</sup> )	446795.763	J (KN*m <sup>2</sup> )	462187.45	J (KN*m <sup>2</sup> )	281456.94

**Tabla 12: Propiedades y cargas correspondientes a los entrepisos modelo 1 base aislada.**

## 8.3. MODELO 2 BASE FIJA:

A continuación se presenta la evaluación de cargas muertas correspondiente a los elementos estructurales en la placa, los acabados y las instalaciones necesarias en el análisis de este modelo de acuerdo con el Título B de la NSR-10. Sin embargo se decidió que la evaluación de las cargas generadas por el peso propio de los pórticos de la estructura se considerara por el programa SAP2000 automáticamente para facilitar el chequeo de derivas de la estructura, no obstante se realizó la comparación de estos resultados con lo

obtenido en hojas de cálculo y se encontró que el porcentaje de error es mínimo.

CALCULO DE CARGAS					
	Espesor o altura	Base	Longitud	KN/m3	KN/m2
Losa superior	0.06	1	1	24	1.44
Losa inferior	0.04	1	1	23	0.92
Viguetas	0.35	0.1	1	24	0.84
Casetón	-	-	-	-	0.3
Muros Divisorios	-	-	-	-	2
Acabado de pisos	-	-	-	-	1.5
Cielo raso	-	-	-	-	0.5
Ductos Mecánicos	-	-	-	-	0.2
Cubierta Liviana	-	-	-	-	0.7
					<b>7.70KN/m2</b>

Carga Muerta sobre placa entrepiso	<b>7.70</b>	<b>KN/m2</b>
Carga Muerta sobre cubierta	<b>6.90</b>	<b>KN/m2</b>

**Tabla 13: Evaluación de cargas del modelo 2.<sup>18</sup>**

SEGUNDO PISO		TERCER PISO		CUBIERTA	
Área (m <sup>2</sup> )	1260	Área (m <sup>2</sup> )	1260	Área (m <sup>2</sup> )	1260
Ix (m <sup>4</sup> )	94500	Ix (m <sup>4</sup> )	94500	Ix (m <sup>4</sup> )	94500
Iy (m <sup>4</sup> )	185220	Iy (m <sup>4</sup> )	185220	Iy (m <sup>4</sup> )	185220
masa (KN)	9676.8	masa (KN)	9676.8	masa (KN)	8756.8
J (KN*m <sup>2</sup> )	2148249.6	J (KN*m <sup>2</sup> )	2148249.6	J (KN*m <sup>2</sup> )	1904049.6

**Tabla 14: Propiedades y cargas correspondientes a los entrepisos modelo 2 base fija.**

<sup>18</sup> Las cargas definidas para los entrepisos con base fija y base aislada se han considerado iguales.

#### 8.4. MODELO 2 BASE AISLADA:

La evaluación de cargas para el modelo en base aislada se realiza de igual forma que en el modelo de base fija obteniendo la misma carga por unidad de área, no obstante se han tenido en cuenta unos nuevos aspectos generados al reducir las secciones de los elementos estructurales y se ha generado un nuevo entrepiso considerado como un diafragma rígido en el primer piso de características similares a los entrepisos.

PRIMER /SEGUNDO PISO		TERCER PISO		CUBIERTA	
Área (m <sup>2</sup> )	1260	Área (m <sup>2</sup> )	1260	Área (m <sup>2</sup> )	1260
Ix (m <sup>4</sup> )	94500	Ix (m <sup>4</sup> )	94500	Ix (m <sup>4</sup> )	94500
Iy (m <sup>4</sup> )	185220	Iy (m <sup>4</sup> )	185220	Iy (m <sup>4</sup> )	185220
masa (KN)	9676.8	masa (KN)	9676.8	masa (KN)	8756.8
J (KN*m <sup>2</sup> )	2148249.6	J (KN*m <sup>2</sup> )	2148249.6	J (KN*m <sup>2</sup> )	1904049.6

**Tabla 15: Propiedades y cargas correspondientes a los entrepisos modelo 2 base fija.**

## **9. DEFINICION DE LOS CARACTERISTICAS MECANICAS DE LOS AISLADORES DE BASE EMPLEADOS.**

Empleando los fundamentos de la teoría bilineal descrita anteriormente y procesos iterativos podemos definir las propiedades mecánicas para los aisladores tipo elastoméricos con núcleo de plomo LRB, elastoméricos de alto amortiguamiento HDRB y sistema de péndulo de fricción FPS.

### **9.1. AISLADORES DE BASE EMPLEADOS EN MODELO 1.**

#### **9.1.1. Aislador elastomérico de alto amortiguamiento. “HDRB”.**

De acuerdo con los datos de la estructura, empleando un periodo objetivo es decir definiendo un periodo al que queremos llevar a nuestra estructura y definiendo el amortiguamiento efectivo del sistema, obtendremos las propiedades mecánicas del aislador para realizar un análisis no lineal, se logra mediante un procedimiento iterativo y realizando ajustes a las dimensiones del aislador, debido a que se requieren datos como el área del aislador, el modulo de cortante, el espesor entre otras propiedades para poder determinar las características mecánicas. De acuerdo con este concepto en general los valores determinados inicialmente pueden cambiar en un pequeño porcentaje como consecuencia de ajustar las dimensiones teóricas a unas mas practicas.

DATOS DE LA ESTRUCTURA		
W ESTRUCTURA	34829.228	KN
GRAVEDAD	9.810	m/s <sup>2</sup>
PERIODO BASE FIJA	0.615	s
b dimensión corta en planta	23.600	m
d dimensión larga en planta	30.150	m
y distancia al elemento de estudio	15.075	m
Excentricidad (5%)	1.508	m
DATOS DEL SISTEMA DE AISLACION SISMO DE DISEÑO		
PERIODO DESPLAZAMIENTO DISEÑO (TD)	2.500	s
RIGIDEZ SISTEMA AISLACION (KDmin)	22426.142	KN/m
NUMERO DE AISLADORES	23.000	UND
RIGIDEZ EFECTIVA (KDmin) POR AISLADOR	975.050	KN/m
RIGIDEZ VERTICAL POR AISLADOR	487524.818	KN/m
RIGIDEZ EFECTIVA (KDMAX) POR AISLADOR	1267.565	KN/m
AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO	0.100	% amort. critico
FACTOR BD	1.200	
ACELERACION ESPECTRAL T=1S SD1	0.465	Fracción de g
DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO DD	0.241	m
DESPLAZAMIENTO TOTAL DE DISEÑO DTD	0.286	m

Tabla 16: Propiedades del HDRB. Para análisis lineal del sistema de aislación.

PREDIMENSIONAMIENTO DEL AISLADOR		
MAXIMA DEFORMACION POR CORTANTE $\gamma$	1.5	
MODULO DE CORTANTE G	600	KN/m <sup>2</sup>
ESPESOR DEL CAUCHO $t_r$ (CALCULADO)	0.16	m
ESPESOR ESTIMADO (EMPLEADO)	0.25	m
AREA DE CAUCHO (CALCULADA)	0.261	m <sup>2</sup>
DIAMETRO (CALCULADO)	0.576	m
DIAMETRO (EMPLEADO)	0.65	m
AREA (EMPLEADA)	0.332	m <sup>2</sup>

Tabla 17: Datos empleados para definir las propiedades del aislador.<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Estos datos son el resultado de procesos iterativos. Ver en los anexos los lineamientos para el proceso iterativo.

PROPIEDADES DEL HDRB MODELO BILINEAL		
RIGIDEZ EN RANGO PLASTICO (Kp)	796.934	KN/m
DESPLAZAMIENTO DE FLUENCIA (Dy)	0.025	m
FUERZA CARACTERISTICA (Q)	40.746	KN
FUERZA DE FLUENCIA (Fy)	60.656	KN
RIGIDEZ EN RANGO ELSTICO (Ke)	2426.23	KN/m
RIGIDEZ EFECTIVA* (Keff)	965.657	KN/m
AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO	0.10	% amor. critico
RELACION (kp/Ke)	0.328	

Tabla 18: Propiedades del HDRB. Para el análisis no lineal del sistema de aislación.

### 9.1.2. Aislador elastomérico con núcleo de plomo. “LRB”.

Las propiedades del LRB se calculan empleando la teoría bilineal y procesos iterativos.

DATOS DE LA ESTRUCTURA		
W ESTRUCTURA	34829.228	KN
GRAVEDAD	9.810	m/s <sup>2</sup>
PERIODO BASE FIJA	0.615	s
b dimensión corta en planta	23.600	m
d dimensión larga en planta	30.150	m
y distancia al elemento de estudio	15.075	m
Excentricidad (5%)	1.508	m
DATOS DEL SISTEMA DE AISLACION SISMO DE DISEÑO		
PERIODO DESPLAZAMIENTO DISEÑO (TD)	2.500	s
RIGIDEZ SISTEMA AISLACION (KDMIN)	22426.142	KN/m
NUMERO DE AISLADORES	23.000	UND
RIGIDEZ EFECTIVA (KDMIN) POR AISLADOR	975.050	KN/m
RIGIDEZ VERTICAL POR AISLADOR	390019.854	KN/m
RIGIDEZ EFECTIVA (KDMAX) POR AISLADOR	1267.565	KN/m
AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO	0.15	% amort.critico
FACTOR BD	1.35	
ACELERACION ESPECTRAL T=1S SD1	0.465	Fracción de g
DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO DD	0.214	m
DESPLAZAMIENTO TOTAL DE DISEÑO DTD	0.254	m

Tabla 19: Propiedades del LRB empleado. Para análisis lineal del sistema de aislación.

PROPIEDADES DEL LRB MODELO BILINEAL		
WD	42.076	KN*m
FUERZA CARACTERISTICA Q	50.992	KN
RIGIDEZ EN RANGO PLASTICO Kp	736.744	KN/m
RIGIDEZ EN RANGO ELASTICO Ke	7367.444	KN/m
DESPLAZAMIENTO DE FLUENCIA Dy	0.008	m
AMORTIGUAMIENTO DEL SISTEMA	0.150	% amor. critico
RELACION (Ke/Kp)	0.100	

Tabla 20: Propiedades del LRB empleado. Para análisis no lineal del sistema de aislación.

### 9.1.3. Sistema de péndulo de fricción. “FPS”.

Las propiedades del LRB se calculan empleando la teoría bilineal y procesos iterativos.

DATOS DE LA ESTRUCTURA		
W ESTRUCTURA	34829.228	KN
GRAVEDAD	9.810	m/s <sup>2</sup>
PERIODO BASE FIJA	0.615	S
b dimensión corta en planta	19.400	m
d dimensión larga en planta	30.150	m
y distancia al elemento de estudio	15.075	m
Excentricidad (5%)	1.508	m
DATOS DEL SISTEMA DE AISLACION FPS SISMO DE DISEÑO		
PERIODO DESPLAZAMIENTO DISEÑO (TD)	2.500	S
RIGIDEZ SISTEMA AISLACION (KDmin)	22426.142	KN/m
NUMERO DE AISLADORES	23	UND
RIGIDEZ EFECTIVA (KDmin) POR AISLADOR	975.050	KN/m
RIGIDEZ VERTICAL POR AISLADOR	390019.854	KN/m
RIGIDEZ EFECTIVA (KDmax) POR AISLADOR	1267.565	KN/m
AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO	20	% amort. Critico
FACTOR BD	1.5	
ACELERACION ESPECTRAL T=1S SD1	0.465	Fracción de g
DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO DD	0.193	m
DESPLAZAMIENTO TOTAL DE DISEÑO DTD	0.233	m

Tabla 21: Propiedades del FPS empleado. Para análisis lineal del sistema de aislación.

AISLADOR	RADIO	FRICCION		a	$\mu$ max*W	Kp	Ke
		$\mu$ min	$\mu$ max				
TIPO	m			s/m	KN	KN/m	KN/m
FPS 1	1.5494	0.04	0.06	100	63.5946	684.077707	68407.7707
FPS 2	1.5494	0.04	0.06	100	38.59728	415.185233	41518.5233
FPS 3	1.5494	0.04	0.06	100	81.72402	879.093197	87909.3197
FPS 4	1.5494	0.04	0.06	100	78.34134	842.706209	84270.6209
FPS 5	1.5494	0.04	0.06	100	111.64848	1200.98619	120098.619
FPS 6	1.5494	0.04	0.06	100	108.57018	1167.87337	116787.337
FPS 7	1.5494	0.04	0.06	100	106.87296	1149.61663	114961.663
FPS 8	1.5494	0.04	0.06	100	79.52418	855.429844	85542.9844
FPS 9	1.5494	0.04	0.06	100	144.0291	1549.29973	154929.973
FPS 10	1.5494	0.04	0.06	100	106.3182	1143.64915	114364.915
FPS 11	1.5494	0.04	0.06	100	108.40434	1166.08945	116608.945
FPS 12	1.5494	0.04	0.06	100	101.25234	1089.15645	108915.645
FPS 13	1.5494	0.04	0.06	100	14.46366	155.583452	15558.3452
FPS 14	1.5494	0.04	0.06	100	101.337	1090.06712	109006.712
FPS 15	1.5494	0.04	0.06	100	114.852	1235.44598	123544.598
FPS 16	1.5494	0.04	0.06	100	90.89982	977.795921	97779.5921
FPS 17	1.5494	0.04	0.06	100	106.79922	1148.82342	114882.342
FPS 18	1.5494	0.04	0.06	100	59.28744	637.746224	63774.6224
FPS 19	1.5494	0.04	0.06	100	78.7356	846.947205	84694.7205
FPS 20	1.5494	0.04	0.06	100	82.51896	887.644249	88764.4249
FPS 21	1.5494	0.04	0.06	100	81.73242	879.183555	87918.3555
FPS 22	1.5494	0.04	0.06	100	103.65054	1114.95353	111495.353
FPS 23	1.5494	0.04	0.06	100	51.18798	550.621531	55062.1531

Tabla 22: Propiedades del FPS empleado. Para análisis no lineal del sistema de aislación.<sup>20</sup>

<sup>20</sup> Radio tomado del manual TECHNICAL CHARACTERISTICS OF FRICTION PENDULUM BEARINGS del Earthquake Protection Systems de acuerdo a diámetros comerciales.™

## 9.2. AISLADORES DE BASE EMPLEADOS EN MODELO 2.

### 9.2.1. Aislador elastomérico de alto amortiguamiento. “HDRB”.

DATOS DE LA ESTRUCTURA		
W ESTRUCTURA	53951.878	KN
GRAVEDAD	9.81	m/s <sup>2</sup>
PERIODO BASE FIJA	0.42	S
b dimensión corta en planta	30	m
d dimensión larga en planta	42	m
y distancia al elemento de estudio	21	m
Excentricidad (5%)	2.1	m
DATOS DEL SISTEMA DE AISLACION SISMO DE DISEÑO		
PERIODO DESPLAZAMIENTO DISEÑO (TD)	2.5	S
RIGIDEZ SISTEMA AISLACION (KDmin)	34738.9973	KN/m
NUMERO DE AISLADORES	48	UND
RIGIDEZ EFECTIVA (KDmin) POR AISLADOR	723.72911	KN/m
RIGIDEZ VERTICAL POR AISLADOR	289491.644	KN/m
RIGIDEZ EFECTIVA (KDmax) POR AISLADOR	940.847843	KN/m
AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO	0.1	% amort. Critico
FACTOR BD	1.2	
ACELERACION ESPECTRAL T=1S SD1	0.465	Fracción de g
DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO DD	0.24072488	m
DESPLAZAMIENTO TOTAL DE DISEÑO DTD	0.28854456	m

Tabla 23: Propiedades del HDRB. Para análisis lineal del sistema de aislación.

PREDIMENSIONAMIENTO DEL AISLADOR		
MAXIMA DEFORMACION POR CORTANTE $\gamma$	1.5	
MODULO DE CORTANTE G	600	KN/m <sup>2</sup>
ESPESOR DEL CAUCHO $t_r$ (CALCULADO)	0.1604	m
ESPESOR ESTIMADO (EMPLEADO)	0.20	m
AREA DE CAUCHO (CALCULADA)	0.1935	m <sup>2</sup>
DIAMETRO (CALCULADO)	0.4964	m
DIAMETRO (EMPLEADO)	0.5	m
AREA (EMPLEADA)	0.196	m <sup>2</sup>

Tabla 24: Datos empleados para definir las propiedades del aislador

PROPIEDADES DEL HDRB MODELO BILINEAL		
RIGIDEZ EN RANGO PLASTICO (Kp)	589.04	KN/m
DESPLAZAMIENTO DE FLUENCIA (Dy)	0.02	m
FUERZA CARACTERISTICA (Q)	29.31	KN
FUERZA DE FLUENCIA (Fy)	41.09	KN
RIGIDEZ EN RANGO ELSTICO (Ke)	2054.73	KN/m
RIGIDEZ EFECTIVA* (Keff)	710.82	KN/m
AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO	0.10	% amor. critico
RELACION (kp/Ke)	0.286	

Tabla 25: Propiedades del HDRB. Para el análisis no lineal del sistema de aislación.

### 9.2.2. Aislador elastomérico con núcleo de plomo. “LRB”.

DATOS DE LA ESTRUCTURA		
W ESTRUCTURA	53951.878	KN
GRAVEDAD	9.81	m/s <sup>2</sup>
PERIODO BASE FIJA	0.42	S
b dimensión corta en planta	30	m
d dimensión larga en planta	42	m
y distancia al elemento de estudio	21	m
Excentricidad (5%)	2.1	m
DATOS DEL SISTEMA DE AISLACION SISMO DE DISEÑO		
PERIODO DESPLAZAMIENTO DISEÑO (TD)	2.5	S
RIGIDEZ SISTEMA AISLACION (KDmin)	34738.99	KN/m
NUMERO DE AISLADORES	48	UND
RIGIDEZ EFECTIVA (KDmin) POR AISLADOR	723.729	KN/m
RIGIDEZ VERTICAL POR AISLADOR	289491.64	KN/m
RIGIDEZ EFECTIVA (KDmax) POR AISLADOR	940.84	KN/m
AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO	0.15	% amorti. Critico
FACTOR BD	1.35	
ACELERACION ESPECTRAL T=1S SD1	0.465	Fracción de g
DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO DD	0.213	m
DESPLAZAMIENTO TOTAL DE DISEÑO DTD	0.256	m

Tabla 26: Propiedades del LRB empleado. Para análisis lineal del sistema de aislación

PROPIEDADES DEL LRB MODELO BILINEAL		
WD	31.23	KN*m
FUERZA CARACTERISTICA Q	37.84	KN
RIGIDEZ EN RANGO PLASTICO Kp	546.84	KN/m
RIGIDEZ EN RANGO ELASTICO Ke	5468.47	KN/m
DESPLAZAMIENTO DE FLUENCIA Dy	0.007	m
AMORTIGUAMIENTO DEL SISTEMA	0.15	% amor. critico
RELACION (Ke/Kp)	0.100	

Tabla 27: Propiedades del LRB empleado. Para análisis no lineal del sistema de aislación.

### 9.2.3. Sistema de péndulo de fricción. “FPS”.

DATOS DE LA ESTRUCTURA		
W ESTRUCTURA	53951.878	KN
GRAVEDAD	9.81	m/s <sup>2</sup>
PERIODO BASE FIJA	0.42	S
b dimensión corta en planta	30	m
d dimensión larga en planta	42	m
y distancia al elemento de estudio	21	m
Excentricidad (5%)	2.1	m
DATOS DEL SISTEMA DE AISLACION FPS SISMO DE DISEÑO		
PERIODO DESPLAZAMIENTO DISEÑO (TD)	2.5	S
RIGIDEZ SISTEMA AISLACION (KDmin)	34739.00	KN/m
NUMERO DE AISLADORES	48	UND
RIGIDEZ EFECTIVA (KDmin) POR AISLADOR	723.73	KN/m
RIGIDEZ VERTICAL POR AISLADOR	289491.64	KN/m
RIGIDEZ EFECTIVA (KDmax) POR AISLADOR	940.85	KN/m
AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO	20	% amort. Critico
FACTOR BD	1.5	
ACELERACION ESPECTRAL T=1S SD1	0.465	Fracción de g
DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO DD	0.193	m
DESPLAZAMIENTO TOTAL DE DISEÑO DTD	0.233	m

Tabla 28: Propiedades del FPS empleado. Para análisis lineal del sistema de aislación.

AISLADOR	RADIO	Fricción		a	$\mu$ max*W	Kp	Ke
		$\mu$ min	$\mu$ max				
<b>Tipo</b>	m			s/m	KN	KN/m	KN/m
<b>FPS 1</b>	1.5494	0.04	0.06	100	4.60	49.47	4946.78
<b>FPS 2</b>	1.5494	0.04	0.06	100	135.79	1460.68	146067.88
<b>FPS 3</b>	1.5494	0.04	0.06	100	127.68	1373.42	137342.30
<b>FPS 4</b>	1.5494	0.04	0.06	100	4.35	46.75	4675.05
<b>FPS 5</b>	1.5494	0.04	0.06	100	4.94	53.16	5316.35
<b>FPS 6</b>	1.5494	0.04	0.06	100	144.53	1554.74	155473.56
<b>FPS 8</b>	1.5494	0.04	0.06	100	118.35	1273.11	127311.42
<b>FPS 7</b>	1.5494	0.04	0.06	100	135.57	1458.31	145830.54

**Tabla 29: Propiedades del FPS empleado. Para análisis no lineal del sistema de aislación**

## 10. MODELADO DE LOS SISTEMAS EN SAP2000.

A continuación se presentan los pasos realizados para modelar las estructuras con base fija y con aislamiento de base, sin embargo es importante mencionar para el caso de las estructuras aisladas de su base que características deben ser definidas en SAP2000 y las ecuaciones empleadas por el programa para dar solución a la estructura modelada.

### 10.1. MODELADO DE LOS SISTEMAS DE AISLACION.

Las propiedades de los aisladores serán introducidas al programa SAP2000, es importante establecer una relación entre el modelo empleado para evaluar las propiedades y el modelo que emplea el software para la solución.<sup>21</sup>

#### 10.1.1. Aisladores elastoméricos.

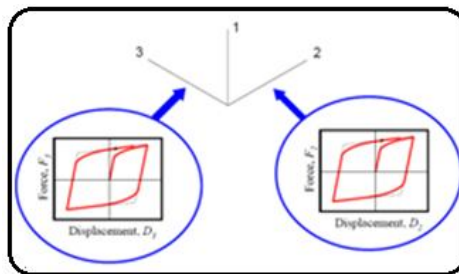


Figura 26: Comportamiento de los aisladores elastoméricos SAP 2000.

Fuente: Seismic protective systems

<sup>21</sup> Basado en el CSI Analysis Reference Manual For SAP2000, ETABS, and SAFE

El modelo de plasticidad está basado en el comportamiento histerético propuesto por Wen (1976), y Park, Wen y Ang (1986), y el análisis recomendado por Nagarajaiah, Reinhorn and Constantinou (1991).

Para cada grado de libertad se debe especificar el comportamiento lineal y no lineal.

Si dos grados de libertad son no lineales, la respuesta acoplada correspondiente a la relación fuerza deformación está dada por:

$$F_2 = \beta_2 k_2 D_2 + (1 - \beta_2) F_{y2} Z_2$$

$$F_3 = \beta_3 k_3 D_3 + (1 - \beta_3) F_{y3} Z_3$$

Donde:

$F_2, F_3 =$  Fuerzas cortantes en el eje 2 y 3.

$k_2, k_3 =$  Son las rigideces elásticas en la dirección 2 y 3.

$F_{y2}, F_{y3} =$  Son las fuerzas de fluencia en la dirección 2 y 3.

$\beta_2, \beta_3 =$  Son las relaciones entre la rigidez post-fluencia y al elástica.

$Z_3, Z_2 =$  Son variables histeréticas internas.

Estas variables tienen un rango de  $\sqrt{Z_2^2 + Z_3^2} \leq 1$ , con la superficie de fluencia representada por  $\sqrt{Z_2^2 + Z_3^2} = 1$ , los valores iniciales de  $Z_2$  y  $Z_3$  son cero y evolucionan relacionadas de la siguiente forma:

$$\begin{Bmatrix} \dot{Z}_2 \\ \dot{Z}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-a_2Z_2^2 & -a_3Z_2Z_3 \\ -a_2Z_2Z_3 & 1-a_3Z_3^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{k_2}{F_{y2}} \dot{D}_2 \\ \frac{k_3}{F_{y3}} \dot{D}_3 \end{Bmatrix}$$

Donde:

$$a_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } D_2Z_2 > 0 \\ 0 & \text{otros casos} \end{cases}$$

$$a_3 = \begin{cases} 1 & \text{si } D_3Z_3 > 0 \\ 0 & \text{otros casos} \end{cases}$$

### 10.1.2. Péndulo de fricción.

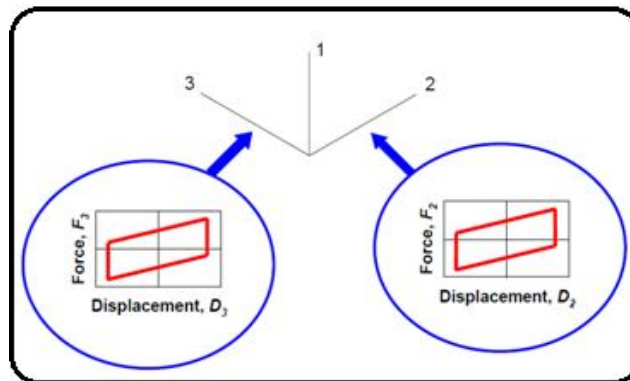


Figura 27: Comportamiento de péndulo de fricción SAP2000.

Fuente: Seismic protective systems

SAP2000 emplea un péndulo de fricción biaxial que tiene propiedades de fricción acopladas para las dos deformaciones. El modelo de fricción está

basado en el comportamiento histerético propuesto por Wen (1976), y Park, Wen y Ang (1986), y el análisis recomendado por Nagarajaiah, Reinhorn and Constantinou (1991). El comportamiento del péndulo es definido según lo recomendado por Zayas and Low (1990).

Las fuerzas de fricción y las fuerzas en el péndulo son directamente proporcionales a la compresión axial en el elemento, el elemento no puede desarrollar tensión axial.

La fuerza axial  $F_1$  es siempre no lineal y está dada por:

$$F_1 = P = \begin{cases} k_1 D_1 & \text{si } D_1 < 0 \\ 0 & \text{otros casos} \end{cases}$$

Para cada grado de libertad se debe especificar independientemente los parámetros lineales y no lineales. (Para aislador FPS  $R_2 = R_3$ )

Si los dos grados de libertad son no lineales, la fricción y los efectos del péndulo se toman en paralelo.

$$F_2 = \frac{P}{R_2} D_2 + P \mu_2 Z_2$$

$$F_3 = \frac{P}{R_3} D_3 + P \mu_3 Z_3$$

Donde  $\mu_2$ ,  $\mu_3$  son los coeficientes de fricción y  $Z_3$ ,  $Z_2$  son variables histeréticas internas.

Los coeficientes de fricción son dependientes de la velocidad de acuerdo con:

$$\mu_2 = \mu_{\max 2} - (\mu_{\max 2} - \mu_{\min 2}) e^{-rv}$$

$$\mu_3 = \mu_{\max 3} - (\mu_{\max 3} - \mu_{\min 3}) e^{-rv}$$

Donde  $\mu_{\min 2}$ ,  $\mu_{\min 3}$  son los coeficientes de fricción estáticos y  $\mu_{\max 2}$ ,  $\mu_{\max 3}$  son los coeficientes de fricción a altas velocidades y  $v$  es la velocidad resultante del deslizamiento,  $r$  es el inverso efectivo de la velocidad.

$$v = \sqrt{\dot{D}_2^2 + \dot{D}_3^2}$$

$$r = \frac{r_2 \dot{D}_2^2 + r_3 \dot{D}_3^2}{v^2}$$

$r_2, r_3$  son los inversos de las velocidades características, para una superficie Teflon-acero los coeficientes de fricción normalmente incrementan con la velocidad del deslizamiento. (Nagarajaiah, Reinhorn y Constantinou, 1991).

Las variables histeréticas internas tienen un rango de  $\sqrt{Z_2^2 + Z_3^2} \leq 1$ , con la superficie de fluencia representada por  $\sqrt{Z_2^2 + Z_3^2} = 1$ , los valores iniciales de  $Z_2$  y  $Z_3$  son cero y evolucionan relacionadas de la siguiente forma:

$$\begin{Bmatrix} \dot{Z}_2 \\ \dot{Z}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-a_2Z_2^2 & -a_3Z_2Z_3 \\ -a_2Z_2Z_3 & 1-a_3Z_3^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{k_2}{F_{y2}} \dot{D}_2 \\ \frac{k_3}{F_{y3}} \dot{D}_3 \end{Bmatrix}$$

Donde  $k_2, k_3$  son las rigideces elásticas a cortante en ausencia de desplazamiento y  $a_2, a_3$  se definen como:

$$a_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } D_2Z_2 > 0 \\ 0 & \text{otros casos} \end{cases}$$

$$a_3 = \begin{cases} 1 & \text{si } D_3Z_3 > 0 \\ 0 & \text{otros casos} \end{cases}$$

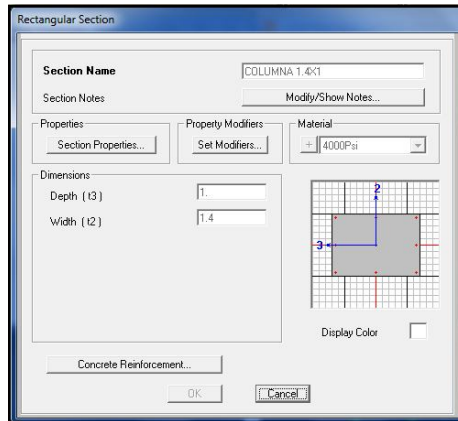
## 10.2. ESTRUCTURA CON BASE FIJA.

El procedimiento realizado para modelar una estructura con base fija en el programa SAP2000 es el que se presenta a continuación:

- Debemos definir las separaciones de los ejes estructurales y los niveles de los entresijos de acuerdo con los planos, dibujando las grillas correspondientes o importando una distribución geométrica desde AutoCad.
- Se deben establecer las propiedades de los materiales empleados en los elementos estructurales.

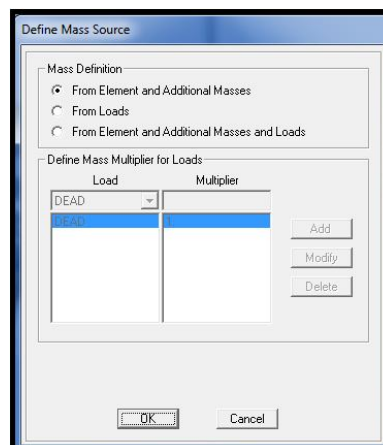
**Figura 28: Cuadro para la definición de materiales en SAP200.**

- Se definen las secciones que serán empleadas en los elementos estructurales como vigas y columnas.



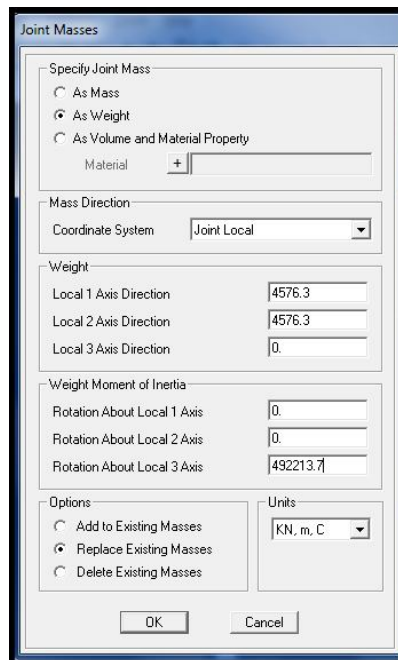
**Figura 29: Definición de secciones en SAP2000.**

- Se dibujan los elementos de acuerdo con los ejes y niveles establecidos.
- Se debe especificar la fuente de masas que tendrá en cuenta el programa, en este caso esta fuente de masa corresponde a las cargas muertas entre ellas muros divisorios, acabados, el peso de la placa; la fuente de masa se definirá como la primera opción de elementos y masas adicionales, de esta forma el tendrá en cuenta las columnas y vigas (elementos) y las masas adicionales que se ubican en el centro de masa.



**Figura 30: Definición de la fuente de masas.**

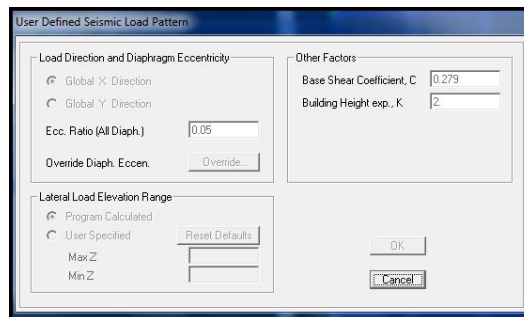
- Se definen los diafragmas rígidos de acuerdo con las plantas de la estructura con el fin de reducir los grados de libertad y simplificar el análisis.
- Se localiza en cada planta el centro de masa y se asignan las masas traslacionales y rotacionales (dado que se considera diafragma rígido no se especifican en la todas las direcciones solo en aquellas correspondientes a los grados de libertad no restringidos por el diafragma), se especificara que la masa está definida como pesos, y se introducen de acuerdo con la evaluación de cargas realizada.



**Figura 31: Cuadro empleado para asignar masas al modelo.**

- Se asignan los diafragmas correspondientes a cada nivel.
- Se aplican las restricciones correspondientes a la base.

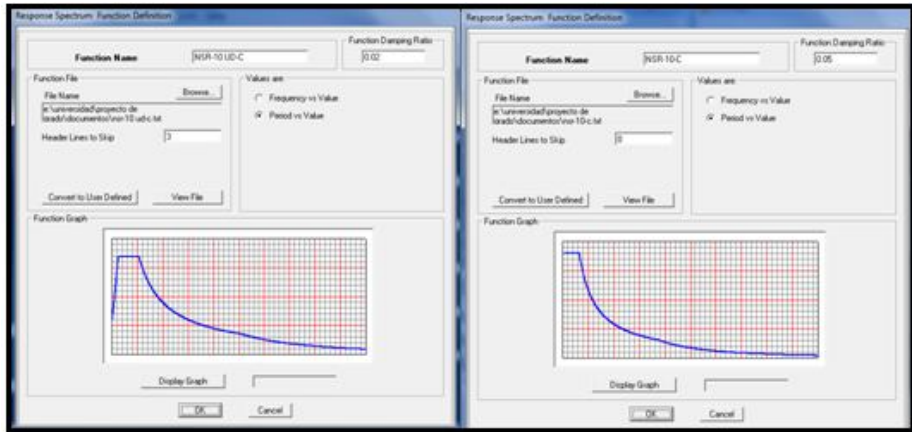
- Se define el caso de análisis modal definiendo el número de modos y el tipo de modos se define como vectores Ritz recomendados en el manual de análisis de SAP2000 para obtener resultados más precisos.<sup>22</sup>
- Se definen los tipos de carga, para el análisis por el método fuerza horizontal equivalente se ha empleado la función de coeficientes definidos por el usuario "User coefficient" generando la distribución en altura del cortante de acuerdo con las masas asignadas, la aceleración espectral, el coeficiente relacionado con el periodo efectivo y las excentricidades.



**Figura 32: de las fuerzas en SAP200 para el análisis por FHE**

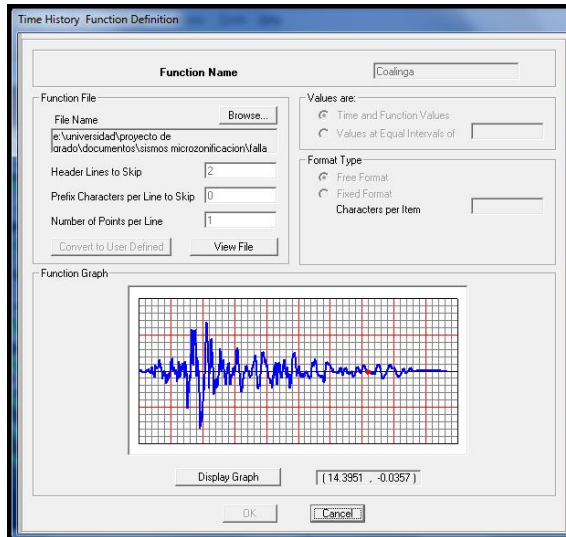
- Se introducen en el programa las funciones correspondientes a los espectros de respuesta para los movimientos de diseño y los movimientos de umbral de daño, definiendo el amortiguamiento de cada función (5% para los movimientos de diseño y 2% para el umbral de daño)

<sup>22</sup> COMPUTERS AND STRUCTURES, CSI Analysis and reference manual for SAP2000, ETABS, and SAFE, Berkeley, Computers and structures, 2005 pag 347.



**Figura 33: Definir las funciones de espectros en SAP2000.**

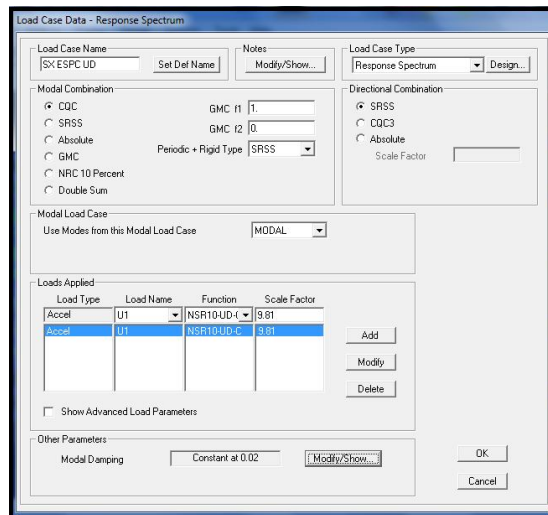
- Se introducen en el programa las funciones correspondientes a los acelerogramas.



**Figura 34: Definir las funciones de acelerogramas en SAP2000.**

- Se definen los casos de carga para las cargas estáticas.

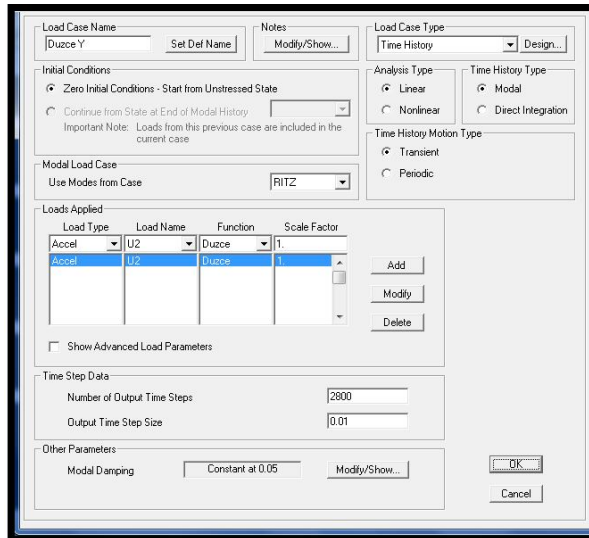
- Se definen los casos de carga para los espectros de respuesta empleando combinación cuadrática completa (CQC) para los modos y para la combinación direccional se emplea la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS), como factor de escala<sup>23</sup> se tomara la aceleración de la gravedad 9.81 m/s<sup>2</sup>.



**Figura 35: Definición del caso de carga para el espectro de respuesta.**

- Se definen los casos de carga para el análisis cronológico, definiendo la dirección de estudio, la función del sismo, el tipo de análisis a emplear en este caso será lineal por integración directa.

<sup>23</sup> Se debe realizar el ajuste de resultados recomendado por la NSR-10.



**Figura 36: Definición de caso de carga empleando análisis dinámico lineal.**

### **10.3. ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE CON BASE AISLADA.**

El procedimiento de modelado es similar a una estructura con base fija, se diferencian en las restricciones de su base ya que no se emplea un empotramiento sino un aislador de base. Se puede generar diferencias en cuanto al tipo de analisis a emplear, ya que los analisis lineales emplearan la rigidez efectiva y el amortiguamiento de cada dispositivo, mientras el analisis no lineal tendra en cuenta las propiedades determinadas con procedimientos iterativos.

Definiremos los tres tipos de aisladores empleados como LRB, HDRB y FPS. Cada aislador tiene propiedades para realizar el analisis lineal y el no lineal, sin embargo si se emplea un analisis lineal la respuesta que se obtendra sera controlada por los coeficientes de amotiguamiento empleado en cada dispositivo.

Se empleara un analisis lineal en el caso de la fuerza horizontal equivalente y espectro de respuestas, pero se realizara una comparacion de los dispositivos de aislamiento esto requiere hacer un analisis dinamico no lineal con las propiedades de casa aislador.

Cada aislador tiene propiedades mecánicas diferentes en el rango no lineal que son establecidas empleando la teoría bilineal, para lograr un grado de detalle mayor en al respuesta del aislador.

Para definir un aislador en el programa SAP2000 se usa la herramienta “link support” donde encontramos los diferentes tipos de amortiguadores y aisladores con que cuenta el programa.

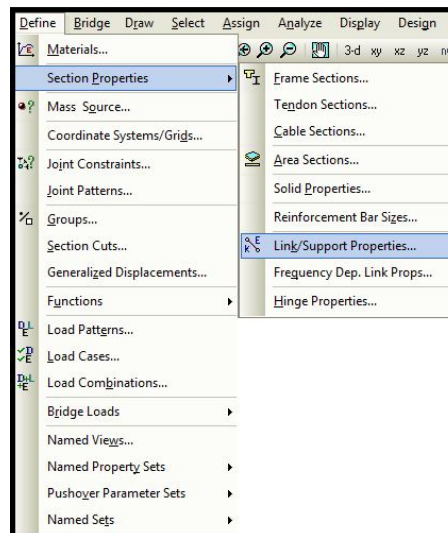


Figura 37: Herramienta de SAP2000 para definir aisladores de base.

Dentro de los aisladores de base encontramos varias opciones, pero para nuestro estudio tomaremos las opciones “Rubber Isolator” para especificar el aislador tipo LRB y HDRB se selecciona la opción “Rubber Isolator”, “friction isolator”.

### 10.3.1. Definir las propiedades en SAP2000 para los aisladores elastometricos.

Los parametros bilineales ya se encuentran definidos ahora los introduciremos en el programa.

El programa requiere especificar para los grados de libertad u2, u3 la rigidez efectiva y amortiguamiento empleados en casos lineales; para casos no lineales el programa requiere definir la rigidez en el rango elastico, la fuerza de fluencia, la relacion entre la rigidez plastica y la elastica. Para el grado de libertad u1 requiere la rigidez vertical en general consideramos que es quinientas veces mayor que la rigidez horizontal.

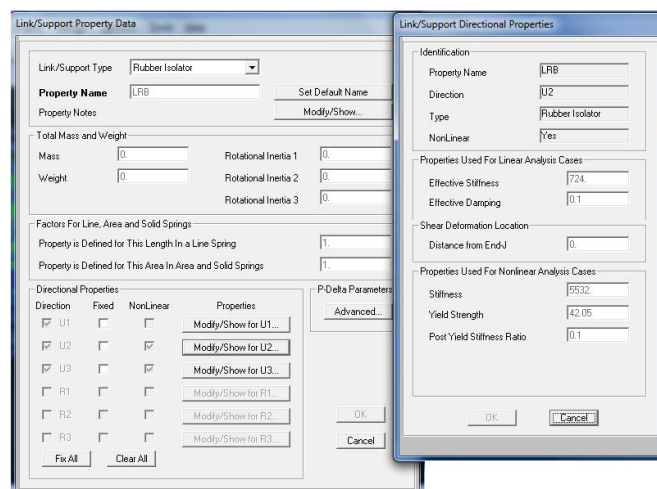


Figura 38: Definición de las propiedades del aislador en SAP2000.

### 10.3.2. Definir las propiedades en SAP2000 para los aisladores friccionales.

Los parametros bilineales ya se encuentran definidos ahora los introduciremos en el programa.

En el caso del este aislador se introducirán valores correspondientes a todos los grados de libertad es decir se considerara la rigidez rotacional de los aisladores debido a las propiedades particulares de este sistema.

El programa requiere especificar para los grados de libertad u2, u3 la rigidez efectiva y amortiguamiento empleados en casos lineales; para casos no lineales el programa requiere definir los coeficientes de fricción para las altas y bajas velocidades, el parametro para controlar el cambio entre los valores de fricción y el radio de la superficie. Para el grado de libertad u1 requiere la rigidez vertical en general este tipo de dispositivos tiene una rigidez vertical mas alta que los elementos elastometricos y se encuentra siempre en el rango no lineal.

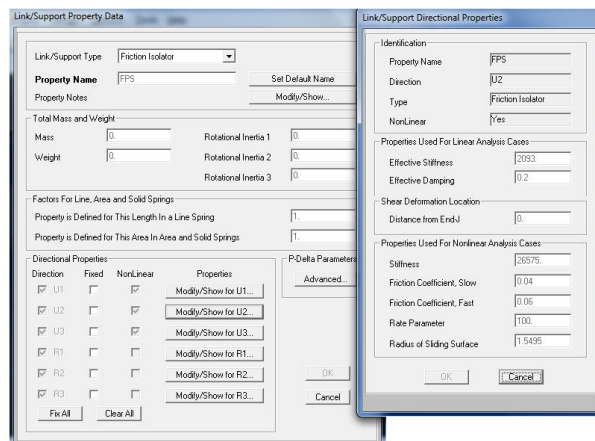
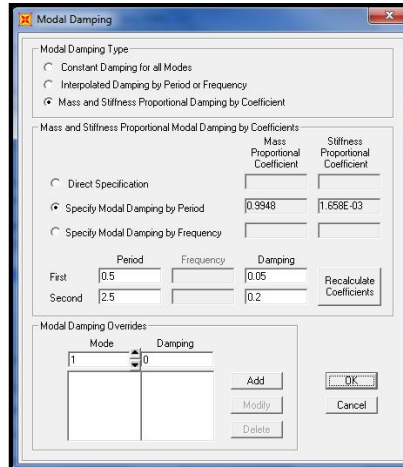


Figura 39: Definición de las propiedades del aislador en SAP2000.

Como el análisis empleado será no lineal es necesario definir los casos de carga como no lineales, se debe ajustar el amortiguamiento que corresponde a cada modo de vibración ya que los modos superiores no tendrán el amortiguamiento correspondiente del sistema de aislación.



**Figura 40: Definición del amortiguamiento para los modos de vibración.**

Se debe cargar la estructura con las fuerzas correspondientes para lograr generar la resultante en su base para que así SAP2000 pueda realizar los cálculos del sistema de péndulo de fricción.

Se genera un nueva función tipo rampa para los casos de carga gravitacionales esto es de gran importancia para poder analizar el péndulo de fricción, porque el emplea las componentes axiales sobre los aisladores, de otra forma el sistema de aislación no consideraría fuerza axial sobre el aislador.

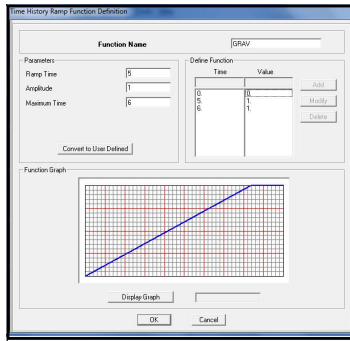


Figura 41: Función rampa empleada para cargas gravitacionales.

El caso generado para las fuerzas gravitacionales debe ser no lineal, y contemplar el peso muerto de toda la estructura, en este caso es importante emplear un amortiguamiento alto 0.99 para evitar problemas de convergencia.

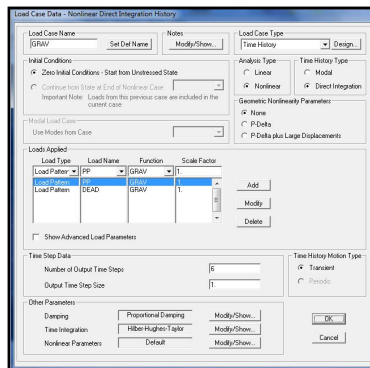
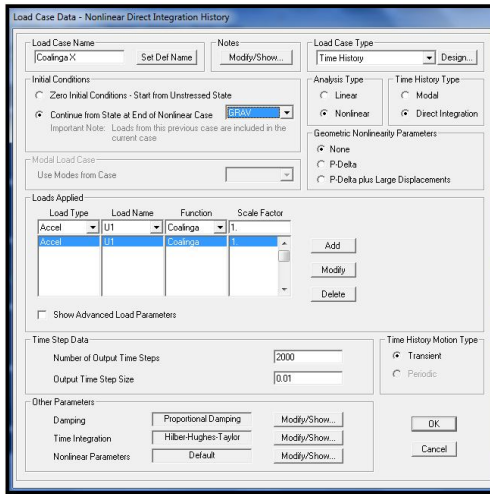


Figura 42: Definición de los casos de carga gravitacionales en SAP2000.

De esta forma se procede a generar los casos de carga no lineales para los sismos teniendo en cuenta especificar que este análisis tome en cuenta el caso de cargas gravitacionales para poder tener el valor de las resultantes en los aisladores en el caso del sistema péndulo de fricción



**Figura 43: Definición de los casos de carga no lineales para los sismos en SAP2000.**

## 11.RESULTADOS.

### 11.1. RESULTADOS PARA BASE FIJA MODELO 1.

#### 11.1.1. Análisis modal.

Se presentan los resultados obtenidos del análisis modal para la estructura con base fija, el valor del periodo fundamental será empleado para determinar la aceleración correspondiente en el espectro de respuesta para movimientos sísmicos de diseño y umbral de daño empleados en el análisis de fuerza horizontal equivalente.

Participación de masa.						
Caso de estudio	Modo de vibración	Periodo	% Participación de masa en X	% Participación de masa en Y	Sumatoria de Participación de masa en X.	Sumatoria de Participación de masa en Y.
		S				
MODAL	1	0.61544	0.73168	0.00023	0.73168	0.00023
MODAL	2	0.591798	0.00031	0.6728	0.73199	0.67303
MODAL	3	0.495133	0.00001414	0.06083	0.73201	0.73386
MODAL	4	0.17113	0.1315	0.01018	0.86351	0.74404
MODAL	5	0.165783	0.01529	0.12169	0.8788	0.86573
MODAL	6	0.12274	0.00048	0.00673	0.87928	0.87246
MODAL	7	0.116309	0.000005448	1.987E-07	0.87929	0.87246
MODAL	8	0.082107	0.02061	0.01753	0.89989	0.88999
MODAL	9	0.058568	0.00021	0.0051	0.90011	0.89509
MODAL	10	0.045168	0.0006	0.00378	0.90071	0.89887
MODAL	11	0.031324	0.00026	0.00234	0.90097	0.90121
MODAL	12	0.013773	0.0009	0.00769	0.90187	0.9089

Tabla 30: Periodos de vibración y porcentajes de participación de masa modelo 1 base fija.

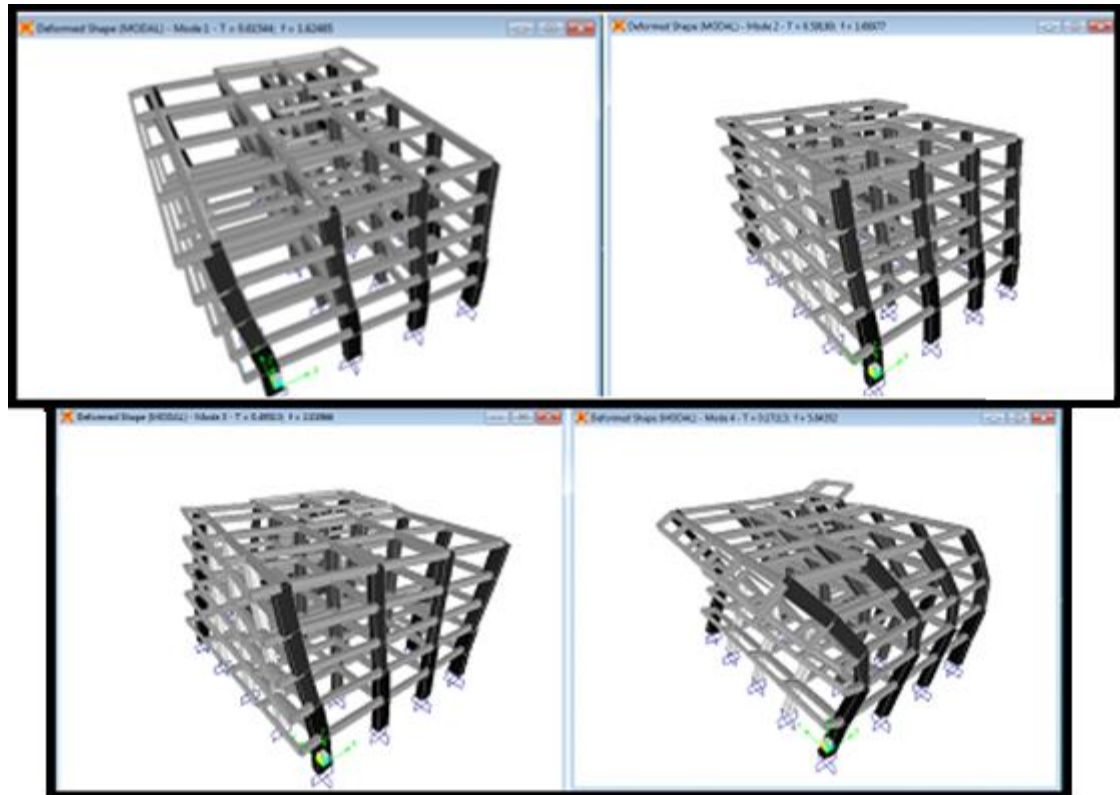


Figura 44: Modos de vibración modelo 1 base fija.

### 11.1.2. Análisis estático lineal (fuerza horizontal equivalente).

Se presentan los resúmenes de cortantes para los análisis estáticos lineales en base fija en cada dirección de estudio se ha empleado el periodo fundamental del resultado del análisis modal para calcular las aceleraciones espectrales correspondientes, además se realizó el chequeo de las derivas para el umbral de daño como lo indica la NSR-10 para el caso de las estructuras indispensables para la comunidad cumpliendo con los límites de derivas contemplados para este análisis.

Tabla cortante empleando FHE.						
CASO	Dir	Excentricidad	Sa	K	W	CORTANTE EN LA BASE
					KN	KN
SX UMBRAL	X	0.05	0.27	1.0575	33540.239	9055.865
SY UMBRAL	Y	0.05	0.27	1.0575	33540.239	9055.865
SY	Y	0.05	1.078	1.0575	33540.239	36156.378
SX	X	0.05	1.078	1.0575	33540.239	36156.378

Tabla 31: Cortantes basales obtenidos para el análisis estático lineal.

### 11.1.3. Análisis dinámico lineal (Espectro de respuesta).

Reacciones en la base.							
Caso de estudio		Fx	Fy	Fz	MX	MY	MZ
		KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m
SY ESPECTRO	Max	1186.45	28942.37	1420.9	338507.3	17399.04	238308.6
SX ESPECTRO	Max	28925.1	1267.56	466.66	7289.52	337890.4	387036.6
SX ESPECTRO UD	Max	7239.66	208.997	49.783	1085.254	85234.88	96977.7
SY ESPECTRO UD	Max	203.507	7244.49	148.14	85259.1	2066.519	59763.52

Tabla 32: Cortantes basales obtenidos para el análisis dinámico lineal empleando el espectro de respuesta.

### 11.1.4. Análisis dinámico lineal (Análisis cronológico).

A continuación se presenta la tabla resumen correspondiente a los cortantes máximos en cada dirección de estudio calculados, por SAP2000.

Este tipo de análisis cronológico permite generar graficas de la variación en el tiempo de las cargas generadas por el sismo en la estructura así como los diferentes parámetros de la respuesta de la estructura ante las cargas inducidas.

Reacciones en la base.				
Caso de carga	Tipo de caso	Max/Min	FX	FY
		Text	KN	KN
Coalinga X	LinModHist	Max	6102.31	61.47
Coalinga X	LinModHist	Min	-5898.71	-77.47
Coalinga Y	LinModHist	Max	61.47	5661.61
Coalinga Y	LinModHist	Min	-77.47	-5088.73
Duzce X	LinModHist	Max	6516.96	65.45
Duzce X	LinModHist	Min	-5346.87	-67.31
Duzce Y	LinModHist	Max	65.45	7217.42
Duzce Y	LinModHist	Min	-67.31	-5489.66
Friuli X	LinModHist	Max	2060.45	202.40
Friuli X	LinModHist	Min	-2535.98	-180.58
Friuli Y	LinModHist	Max	202.40	1940.35
Friuli Y	LinModHist	Min	-180.58	-2437.00
Helena X	LinModHist	Max	4303.31	72.18
Helena X	LinModHist	Min	-6285.37	-63.51
Helena Y	LinModHist	Max	72.18	4357.28
Helena Y	LinModHist	Min	-63.51	-6333.56
Lomapieta X	LinModHist	Max	4217.01	111.83
Lomapieta X	LinModHist	Min	-5024.19	-127.15
Lomapieta Y	LinModHist	Max	111.83	5061.41
Lomapieta Y	LinModHist	Min	-127.15	-7004.84
Mammoth X	LinModHist	Max	7037.35	100.34
Mammoth X	LinModHist	Min	-7286.20	-106.36
Mammoth Y	LinModHist	Max	100.34	8098.03
Mammoth Y	LinModHist	Min	-106.36	-8444.53
Pretolia X	LinModHist	Max	20106.71	178.17
Pretolia X	LinModHist	Min	-19114.89	-184.20
Pretolia Y	LinModHist	Max	178.17	20390.78
Pretolia Y	LinModHist	Min	-184.20	-20542.78
Umbria X	LinModHist	Max	2847.14	101.78
Umbria X	LinModHist	Min	-3106.54	-109.94
Umbria Y	LinModHist	Max	101.78	3086.06
Umbria Y	LinModHist	Min	-109.94	-2842.41
Whittier X	LinModHist	Max	1721.14	241.74
Whittier X	LinModHist	Min	-1950.92	-245.22
Whittier Y	LinModHist	Max	241.73	1829.25
Whittier Y	LinModHist	Min	-245.22	-1836.59
Montenegro X	LinModHist	Max	12969.19	133.12
Montenegro X	LinModHist	Min	-13188.62	-127.87
Montenegro Y	LinModHist	Max	133.12	10874.11
Montenegro Y	LinModHist	Min	-127.87	-12393.63

Tabla 33: Cortantes basales para el análisis dinámico lineal empleando acelerogramas.

Las graficas de la variación del cortante, aceleraciones, desplazamientos y derivas para cada sismo se emplearan en el análisis de resultados para compararlos con la respuesta de una estructura aislada.

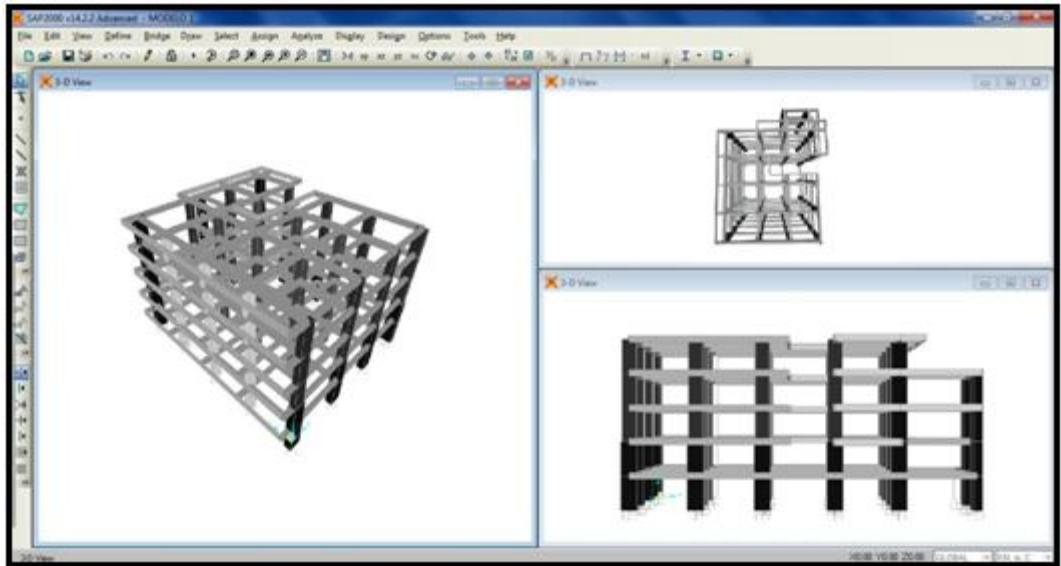


Figura 45: Modelado Final de la estructura correspondiente al modelo 1.

## 11.2. RESULTADOS PARA BASE AISLADA MODELO 1.

### 11.2.1. Análisis modal.

Se presentan los resultados obtenidos del análisis modal para la estructura con base aislada, el valor del periodo fundamental será empleado para determinar la aceleración correspondiente en el espectro de respuesta para movimientos sísmicos de diseño empleado en el análisis de fuerza horizontal equivalente.

Participación de masa.						
Caso de estudio	Modo de vibración	Periodo	% Participación de masa en X	% Participación de masa en Y	Sumatoria de Participación de masa en X.	Sumatoria de Participación de masa en Y.
		S				
MODAL	1	2.60744	0.32629	0.60833	0.32629	0.60833
MODAL	2	2.578662	0.63723	0.35916	0.96352	0.96749
MODAL	3	2.267475	0.03507	0.0308	0.9986	0.99829
MODAL	4	0.445052	6.184E-08	0.00162	0.9986	0.99991
MODAL	5	0.423812	0.00134	4.844E-08	0.99994	0.99991
MODAL	6	0.378822	0.000006947	0.00001533	0.99995	0.99992
MODAL	7	0.212099	2.865E-09	0.00006492	0.99995	0.99999
MODAL	8	0.196231	0.00004651	1.207E-08	0.99999	0.99999
MODAL	9	0.180955	2.288E-07	5.639E-07	0.99999	0.99999
MODAL	10	0.13944	3.681E-09	0.000009602	0.99999	1
MODAL	11	0.125702	0.000005518	1.826E-08	1	1
MODAL	12	0.117914	3.887E-07	3.09E-08	1	1

Tabla 34: Periodos de vibración y porcentajes de participación de masa modelo 1 base aislada.

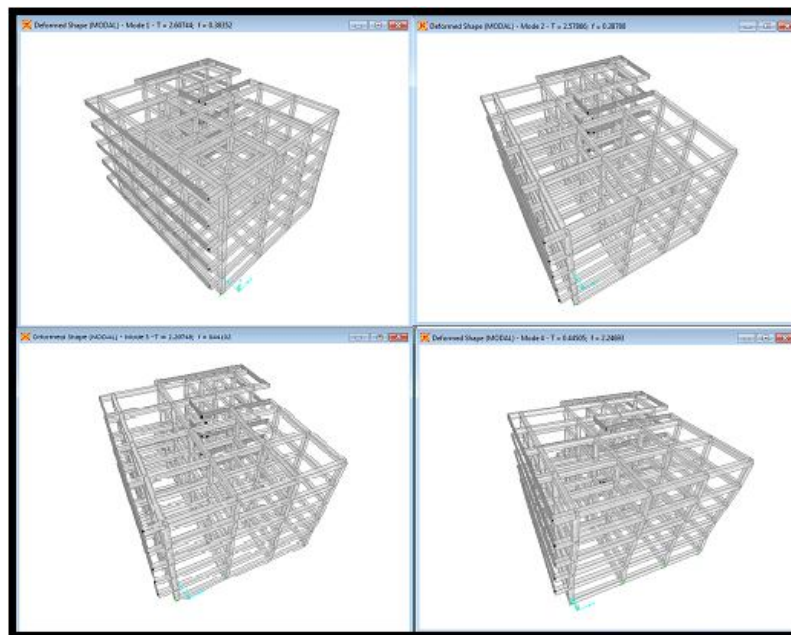


Figura 46: Modos de vibración modelo 2 base aislada.

### 11.2.2. Análisis estático lineal (fuerza horizontal equivalente).

Tabla cortante empleando FHE.						
CASO	Dir	Excentricidad	Sa	K	W	CORTANTE EN LA BASE
					KN	KN
SY DIS	X	0.05	0.155	2	34829.228	5398.53
SX DIS	Y	0.05	0.155	2	34829.228	5398.53
SX MAX	Y	0.05	0.2325	2	34829.228	8097.795
SY MAX	X	0.05	0.2325	2	34829.228	8097.795

Tabla 35: Cortantes basales obtenidos para el análisis estático lineal.

### 11.2.3. Análisis dinámico lineal (Espectro de respuesta).

Reacciones en la base.							
Caso de estudio		Fx	Fy	Fz	MX	MY	MZ
		KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m
SY ESPECTRO	Max	4860.01	60.153	3.722	480.4632	39428.68	65314.7
SX ESPECTRO	Max	160.377	5256.33	3.284	42510.11	1261.253	49108.8

Tabla 36: Cortantes basales obtenidos para el análisis dinámico lineal empleando el espectro de respuesta.

### 11.2.4. Análisis dinámico no lineal (Análisis cronológico).

A continuación se presenta la tabla resumen correspondiente a los cortantes máximos en cada dirección de estudio, se diferenciarán según el tipo de aislador de base empleado.

Reacciones en la base empleando HDRB.				
Caso de carga	Tipo de caso	Max/Min	FX	FY
		Text	KN	KN
Coalinga X	NonModHist	Max	1304.402	42.74
Coalinga X	NonModHist	Min	-1455.21	-42.697
Coalinga Y	NonModHist	Max	41.4	1297.652
Coalinga Y	NonModHist	Min	-41.142	-1454.03
Duzce X	NonModHist	Max	1356.799	38.42
Duzce X	NonModHist	Min	-1440.81	-39.099
Duzce Y	NonModHist	Max	37.844	1363.061
Duzce Y	NonModHist	Min	-36.289	-1446.57
Friuli X	NonModHist	Max	281.456	14.665
Friuli X	NonModHist	Min	-251.233	-14.688
Friuli Y	NonModHist	Max	14.63	277.006
Friuli Y	NonModHist	Min	-14.658	-251.409
Helena X	NonModHist	Max	1604.115	44.19
Helena X	NonModHist	Min	-1682.04	-44.342
Helena Y	NonModHist	Max	43.014	1600.913
Helena Y	NonModHist	Min	-43.082	-1674.14
Lomaprieta X	NonModHist	Max	1914.968	38.294
Lomaprieta X	NonModHist	Min	-1423.68	-37.867
Lomaprieta Y	NonModHist	Max	41.449	1914.36
Lomaprieta Y	NonModHist	Min	-41.159	-1420.04
Mammoth X	NonModHist	Max	956.663	39.125
Mammoth X	NonModHist	Min	-1128.41	-39.648
Mammoth Y	NonModHist	Max	39.671	970.042
Mammoth Y	NonModHist	Min	-40.264	-1116.77
Pretolia X	NonModHist	Max	1989.382	59.751
Pretolia X	NonModHist	Min	-2486.83	-60.518
Pretolia Y	NonModHist	Max	56.018	2003.281
Pretolia Y	NonModHist	Min	-56.439	-2483.66
Umbria X	NonModHist	Max	329.993	6.633
Umbria X	NonModHist	Min	-331.718	-6.706
Umbria Y	NonModHist	Max	6.618	327.666
Umbria Y	NonModHist	Min	-6.695	-331.335
Whittier X	NonModHist	Max	162.679	4.552
Whittier X	NonModHist	Min	-174.141	-4.683
Whittier Y	NonModHist	Max	4.556	163.978
Whittier Y	NonModHist	Min	-4.686	-175.611
Montenegro X	NonModHist	Max	1134.662	41.448
Montenegro X	NonModHist	Min	-1158.18	-40.967
Montenegro Y	NonModHist	Max	41.712	1146.033
Montenegro Y	NonModHist	Min	-40.514	-1180.15

Tabla 37: Cortantes basales para el análisis dinámico no lineal empleando HDRB.

Reacciones en la base empleando LRB.				
Caso de carga	Tipo de caso	Max/Min	FX	FY
		Text	KN	KN
Coalinga X	NonModHist	Max	1815.658	31.482
Coalinga X	NonModHist	Min	-1638.557	-30.925
Coalinga Y	NonModHist	Max	27.912	1803.347
Coalinga Y	NonModHist	Min	-29.122	-1644.263
Duzce X	NonModHist	Max	1521.138	26.699
Duzce X	NonModHist	Min	-1484.064	-25.947
Duzce Y	NonModHist	Max	23.28	1481.789
Duzce Y	NonModHist	Min	-24.854	-1494.126
Friuli X	NonModHist	Max	587.63	11.517
Friuli X	NonModHist	Min	-554.596	-11.795
Friuli Y	NonModHist	Max	11.935	541.809
Friuli Y	NonModHist	Min	-12.337	-541.541
Helena X	NonModHist	Max	1751.55	33.173
Helena X	NonModHist	Min	-1753.493	-33.753
Helena Y	NonModHist	Max	31.062	1750.088
Helena Y	NonModHist	Min	-30.16	-1757.517
Lomapieta X	NonModHist	Max	1942.629	20.934
Lomapieta X	NonModHist	Min	-1554.843	-20.834
Lomapieta Y	NonModHist	Max	29.252	1944.476
Lomapieta Y	NonModHist	Min	-28.241	-1541.338
Mammoth X	NonModHist	Max	1277.355	28.155
Mammoth X	NonModHist	Min	-1333.846	-28.454
Mammoth Y	NonModHist	Max	43.733	1322.193
Mammoth Y	NonModHist	Min	-43.937	-1373.308
Pretolia X	NonModHist	Max	2073.933	34.195
Pretolia X	NonModHist	Min	-2320.682	-32.893
Pretolia Y	NonModHist	Max	26.533	2042.109
Pretolia Y	NonModHist	Min	-29.31	-2306.126
Umbria X	NonModHist	Max	1071.164	11.747
Umbria X	NonModHist	Min	-992.602	-11.122
Umbria Y	NonModHist	Max	10.481	1039.591
Umbria Y	NonModHist	Min	-10.966	-949.674
Whittier X	NonModHist	Max	437.408	8.267
Whittier X	NonModHist	Min	-533.554	-7.881
Whittier Y	NonModHist	Max	8.411	416.809
Whittier Y	NonModHist	Min	-8.059	-495.373
Montenegro X	NonModHist	Max	1483.729	23.912
Montenegro X	NonModHist	Min	-1529.394	-23.839
Montenegro Y	NonModHist	Max	31.022	1502.124
Montenegro Y	NonModHist	Min	-31.679	-1526.07

Tabla 38: Cortantes basales para el análisis dinámico no lineal empleando LRB.

Reacciones en la base empleando FPS.				
Caso de carga	Tipo de caso	Max/Min	FX	FY
		Text	KN	KN
Coalinga X	NonModHist	Max	2320.3	25.133
Coalinga X	NonModHist	Min	-2664.994	-24.227
Coalinga Y	NonModHist	Max	17.767	2341.057
Coalinga Y	NonModHist	Min	-23.765	-2651.229
Duzce X	NonModHist	Max	2212.935	33.769
Duzce X	NonModHist	Min	-2031.972	-28.171
Duzce Y	NonModHist	Max	19.607	2257.308
Duzce Y	NonModHist	Min	-19.145	-2019.19
Friuli X	NonModHist	Max	1637.766	23.553
Friuli X	NonModHist	Min	-1307.551	-21.625
Friuli Y	NonModHist	Max	27.284	1601.123
Friuli Y	NonModHist	Min	-25.06	-1327.756
Helena X	NonModHist	Max	2346.744	16.158
Helena X	NonModHist	Min	-2504.293	-21.44
Helena Y	NonModHist	Max	13.168	2406.937
Helena Y	NonModHist	Min	-16.125	-2416.654
Lomapieta X	NonModHist	Max	2180.251	28.114
Lomapieta X	NonModHist	Min	-1986.088	-19.795
Lomapieta Y	NonModHist	Max	38.082	2204.284
Lomapieta Y	NonModHist	Min	-25.559	-1993.707
Mammoth X	NonModHist	Max	1979.41	37.792
Mammoth X	NonModHist	Min	-1469.971	-47.818
Mammoth Y	NonModHist	Max	18.581	2106.067
Mammoth Y	NonModHist	Min	-14.127	-1584.866
Pretolia X	NonModHist	Max	2856.177	49.254
Pretolia X	NonModHist	Min	-2785.245	-51.213
Pretolia Y	NonModHist	Max	21.206	2979.504
Pretolia Y	NonModHist	Min	-21.22	-2734.055
Umbria X	NonModHist	Max	1526.811	18.429
Umbria X	NonModHist	Min	-1248.159	-14.628
Umbria Y	NonModHist	Max	17.479	1524.674
Umbria Y	NonModHist	Min	-21.317	-1186.967
Whittier X	NonModHist	Max	1491.707	36.216
Whittier X	NonModHist	Min	-1176.276	-36.367
Whittier Y	NonModHist	Max	53.364	1457.477
Whittier Y	NonModHist	Min	-54.269	-1189.231
Montenegro X	NonModHist	Max	2244.351	44.172
Montenegro X	NonModHist	Min	-2176.529	-33.122
Montenegro Y	NonModHist	Max	39.202	2265.491
Montenegro Y	NonModHist	Min	-30.789	-2217.136

Tabla 39: Cortantes basales para el análisis dinámico no lineal empleando FPS.

Las graficas de la variación del cortante, aceleraciones, desplazamientos y derivas para cada sismo se emplearan en el análisis de resultados para compararlos con la respuesta de una estructura aislada.

### 11.3. RESULTADOS PARA BASE FIJA MODELO 2.

#### 11.3.1. Análisis modal.

Se presentan los resultados obtenidos del análisis modal para la estructura con base fija, el valor del periodo fundamental será empleado para determinar la aceleración correspondiente en el espectro de respuesta para movimientos sísmicos de diseño y umbral de daño empleados en el análisis de fuerza horizontal equivalente.

Participación de masa.						
Caso de estudio	Modo de vibración	Periodo	% Participación de masa en X	% Participación de masa en Y	Sumatoria de Participación de masa en X.	Sumatoria de Participación de masa en Y.
		S				
MODAL	1	0.419782	0.73737	0	0.73737	0
MODAL	2	0.333456	0	0.72978	0.73737	0.72978
MODAL	3	0.315513	0	0	0.73737	0.72978
MODAL	4	0.083943	0.20693	0	0.9443	0.72978
MODAL	5	0.063159	0	0.21629	0.9443	0.94607
MODAL	6	0.062677	0	0	0.9443	0.94607
MODAL	7	0.035057	0.0557	0	1	0.94607
MODAL	8	0.026837	0	0.05393	1	1
MODAL	9	0.026757	0	3.195E-20	1	1
MODAL	10	0.018699	2.44E-14	4.439E-14	1	1
MODAL	11	0.01869	5.963E-13	1.397E-14	1	1
MODAL	12	0.018682	1.635E-14	1.449E-12	1	1

Tabla 40: Periodos de vibración y porcentajes de participación de masa modelo 2 base fija.

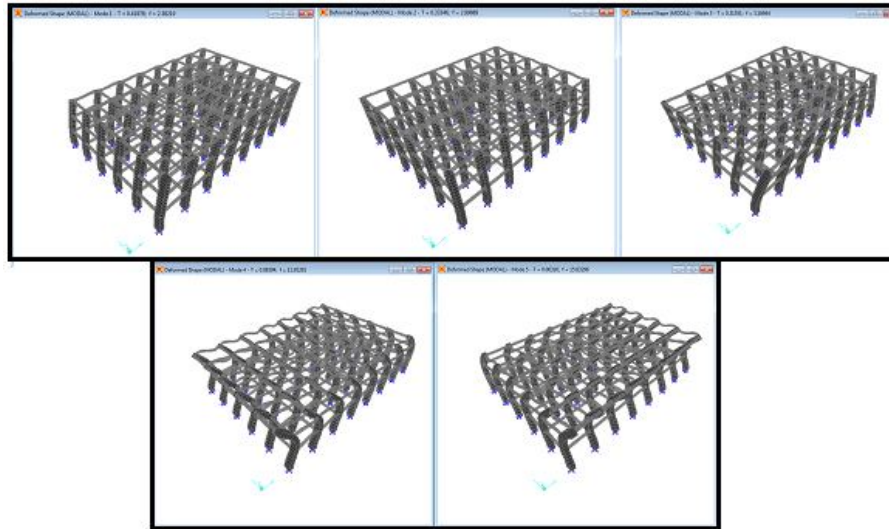


Figura 47: Modos de vibración modelo 2 base fija.

### 11.3.2. Análisis estático lineal (fuerza horizontal equivalente).

Se presentan los resúmenes de cortantes para los análisis estáticos lineales en base fija en cada dirección de estudio se ha empleado el periodo fundamental del resultado del análisis modal para calcular las aceleraciones espectrales correspondientes, además se realizó el chequeo de las derivas para el umbral de daño como lo indica la NSR-10 para el caso de las estructuras indispensables para la comunidad cumpliendo con los límites de derivas contemplados para este análisis.

Tabla cortante empleando FHE.						
CASO	Dir	Excentricidad	Sa	K	W	CORTANTE EN LA BASE
					KN	KN
SX	X	0.05	1.078	1	51471.821	55486.623
SY	Y	0.05	1.078	1	51471.821	55486.623
SY UMBRAL	Y	0.05	0.27	1	51471.821	13897.392
SX UMBRAL	X	0.05	0.27	1	51471.821	13897.392

Tabla 41: Cortantes basales obtenidos para el análisis estático lineal.

### 11.3.3. Análisis dinámico lineal (Espectro de respuesta).

Reacciones en la base.							
Caso de estudio		Fx	Fy	Fz	MX	MY	MZ
		KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m
<b>SY ESPECTRO</b>	Max	9E-06	46455.2	0.022	386130.6	0.5829	1254289
<b>SX ESPECTRO</b>	Max	44530.7	7.3E-06	0.0039	0.2051	370017.4	667959.8
<b>SX ESPC UD</b>	Max	9806.65	1.6E-06	0.0004	0.0197	83691.55	147099.8
<b>SY ESPC UD</b>	Max	1.9E-06	9693.95	0.0036	83143.12	0.1215	261736.7

Tabla 42: Cortantes basales obtenidos para el análisis dinámico lineal empleando el espectro de respuesta.

### 11.3.4. Análisis dinámico lineal (Análisis cronológico).

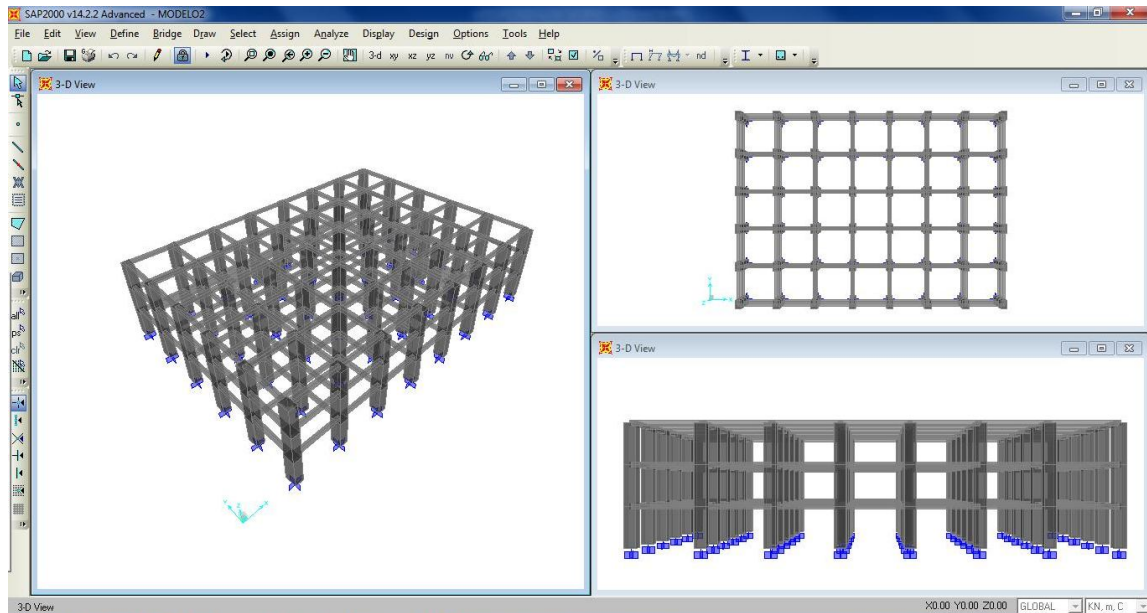
A continuación se presenta la tabla resumen correspondiente a los cortantes máximos en cada dirección de estudio calculados, por SAP2000.

Este tipo de análisis cronológico permite generar graficas de la variación en el tiempo de las cargas generadas por el sismo en la estructura así como los diferentes parámetros de la respuesta de la estructura ante las cargas inducidas.

Las graficas de la variación del cortante, aceleraciones, desplazamientos y derivas para cada sismo se emplearan en el análisis de resultados para compararlos con la respuesta de una estructura aislada.

Reacciones en la base.				
Caso de carga	Tipo de caso	Max/Min	FX	FY
		Text	KN	KN
Coalinga X	LinModHist	Max	6773.194	4.43E-16
Coalinga X	LinModHist	Min	-9649.26	-3.5E-16
Coalinga Y	LinModHist	Max	1.32E-15	8074.349
Coalinga Y	LinModHist	Min	-1E-15	-9905.47
Duzce X	LinModHist	Max	25708.2	5.67E-16
Duzce X	LinModHist	Min	-24257.6	-5E-16
Duzce Y	LinModHist	Max	4.77E-15	32255.24
Duzce Y	LinModHist	Min	-4.8E-15	-33395.8
Friuli X	LinModHist	Max	6303.228	3.38E-15
Friuli X	LinModHist	Min	-6377.43	-3.4E-15
Friuli Y	LinModHist	Max	2.97E-15	7821.169
Friuli Y	LinModHist	Min	-3E-15	-7498.13
Helena X	LinModHist	Max	16376.08	3.72E-16
Helena X	LinModHist	Min	-15175.8	-4.9E-16
Helena Y	LinModHist	Max	2.89E-15	14500.06
Helena Y	LinModHist	Min	-2.8E-15	-12491.8
Lomaprieta X	LinModHist	Max	39194.47	2.01E-15
Lomaprieta X	LinModHist	Min	-37497.3	-1.8E-15
Lomaprieta Y	LinModHist	Max	6.27E-15	29924.55
Lomaprieta Y	LinModHist	Min	-6.9E-15	-28821.6
Mammoth X	LinModHist	Max	13208.66	4.74E-16
Mammoth X	LinModHist	Min	-15073.8	-5.5E-16
Mammoth Y	LinModHist	Max	1.94E-15	13899.01
Mammoth Y	LinModHist	Min	-2.2E-15	-15572
Pretolia X	LinModHist	Max	26956.8	8.3E-16
Pretolia X	LinModHist	Min	-18754.7	-8.3E-16
Pretolia Y	LinModHist	Max	2.41E-15	26573.11
Pretolia Y	LinModHist	Min	-3.1E-15	-16429.4
Umbria X	LinModHist	Max	12521.35	3.97E-16
Umbria X	LinModHist	Min	-12061	-4E-16
Umbria Y	LinModHist	Max	1.95E-15	8012.654
Umbria Y	LinModHist	Min	-2E-15	-7703.92
Whittier X	LinModHist	Max	4870.018	4.43E-16
Whittier X	LinModHist	Min	-5006.27	-4.3E-16
Whittier Y	LinModHist	Max	1.19E-15	4787.187
Whittier Y	LinModHist	Min	-1.2E-15	-5318.91
Montenegro X	LinModHist	Max	24098.61	7.21E-16
Montenegro X	LinModHist	Min	-22566.3	-5.8E-16
Montenegro Y	LinModHist	Max	3.99E-15	29136.85
Montenegro Y	LinModHist	Min	-4.2E-15	-29778.3

Tabla 43: Cortantes basales para el análisis dinámico lineal empleando acelerogramas



**Figura 48: Modelado Final de la estructura correspondiente al modelo 2.**

## **11.4. RESULTADOS PARA BASE AISLADA MODELO 2.**

### **11.4.1. Análisis modal.**

Se presentan los resultados obtenidos del análisis modal para la estructura con base aislada, el valor del periodo fundamental será empleado para determinar la aceleración correspondiente en el espectro de respuesta para movimientos sísmicos de diseño empleado en el análisis de fuerza horizontal equivalente.

Participación de masa.						
Caso de estudio	Modo de vibración	Periodo	% Participación de masa en X	% Participación de masa en Y	Sumatoria de Participación de masa en X.	Sumatoria de Participación de masa en Y.
		S				
MODAL	1	2.585744	0	0.99787	0	0.99787
MODAL	2	2.581712	0.99806	0	0.99806	0.99787
MODAL	3	2.312879	0	0	0.99806	0.99787
MODAL	4	0.456476	0	0.00211	0.99806	0.99998
MODAL	5	0.446262	0.00192	0	0.99998	0.99998
MODAL	6	0.393377	0	0	0.99998	0.99998
MODAL	7	0.161251	0	0.00001856	0.99998	1
MODAL	8	0.159484	0.00001775	0	1	1
MODAL	9	0.07559	0	2.095E-07	1	1
MODAL	10	0.075331	2.079E-07	0	1	1
MODAL	11	0.064556	9.448E-17	3.78E-20	1	1
MODAL	12	0.063901	6.222E-12	1.437E-15	1	1

Tabla 44: Periodos de vibración y porcentajes de participación de masa modelo 1 base aislada.

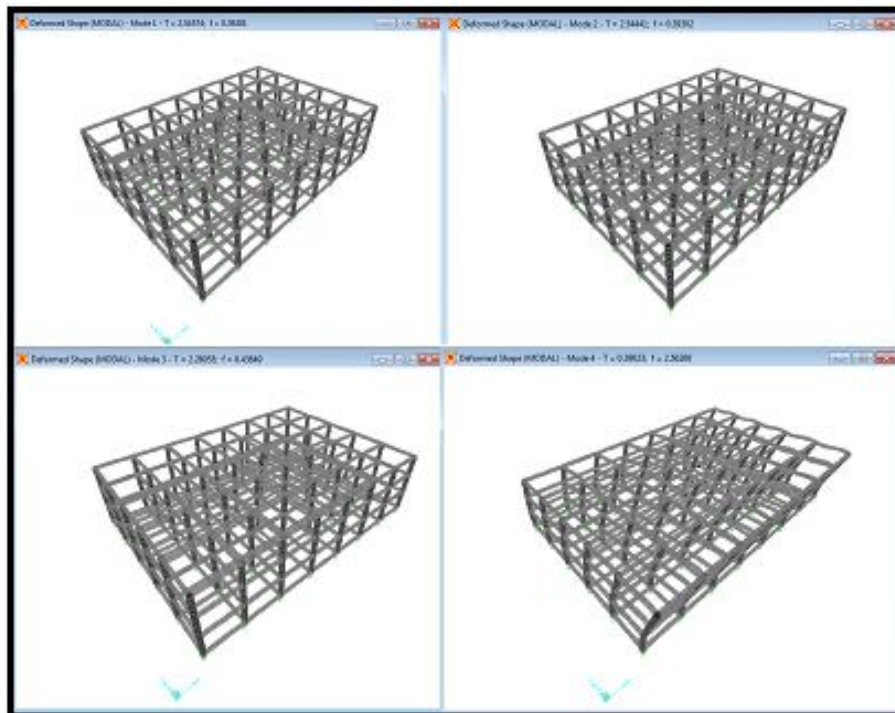


Figura 49: Modos de vibración modelo 2 base aislada.

#### 11.4.2. Análisis estático lineal (fuerza horizontal equivalente).

Tabla cortante empleando FHE.						
CASO	Dir	Excentricidad	Sa	K	W	CORTANTE EN LA BASE
					KN	KN
SY DIS	X	0.05	0.155	2	53951.878	8362.541
SX DIS	Y	0.05	0.155	2	53951.878	8362.541
SX MAX	Y	0.05	0.2325	2	53951.878	12543.812
SY MAX	X	0.05	0.2325	2	53951.878	12543.812

Tabla 45: Cortantes basales obtenidos para el análisis estático lineal.

#### 11.4.3. Análisis dinámico lineal (Espectro de respuesta).

Reacciones en la base.							
Caso de estudio		Fx	Fy	Fz	MX	MY	MZ
		KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m
SY ESPECTRO	Max	1.5E-09	8022.09	2E-08	44312.49	5.63E-07	216596.5
SX ESPECTRO	Max	8023.47	1.5E-09	4E-08	7.09E-07	44228.97	120352.1

Tabla 46: Cortantes basales obtenidos para el análisis dinámico lineal empleando el espectro de respuesta

#### 11.4.4. Análisis dinámico no lineal (Análisis cronológico).

A continuación se presenta la tabla resumen correspondiente a los cortantes máximos en cada dirección de estudio, se diferenciarán según el tipo de aislador de base empleado.

Reacciones en la base HDRB.				
Caso de carga	Tipo de caso	Max/Min	FX	FY
		Text	KN	KN
Coalinga X	NonModHist	Max	2042.173	2.37E-12
Coalinga X	NonModHist	Min	-2163.21	-2.6E-12
Coalinga Y	NonModHist	Max	2.34E-12	2029.029
Coalinga Y	NonModHist	Min	-2.5E-12	-2146.35
Duzce X	NonModHist	Max	1944.754	2.76E-12
Duzce X	NonModHist	Min	-2189.98	-3.4E-12
Duzce Y	NonModHist	Max	2.52E-12	1918.842
Duzce Y	NonModHist	Min	-2.8E-12	-2169.25
Friuli X	NonModHist	Max	441.243	9.62E-13
Friuli X	NonModHist	Min	-489.96	-1.1E-12
Friuli Y	NonModHist	Max	9.48E-13	443.387
Friuli Y	NonModHist	Min	-1E-12	-487.761
Helena X	NonModHist	Max	2480.93	2.97E-12
Helena X	NonModHist	Min	-2412.56	-2.7E-12
Helena Y	NonModHist	Max	2.55E-12	2458.948
Helena Y	NonModHist	Min	-2.3E-12	-2413.55
Lomaprieta X	NonModHist	Max	2728.935	4.91E-12
Lomaprieta X	NonModHist	Min	-2193.8	-4.4E-12
Lomaprieta Y	NonModHist	Max	3.36E-12	2726.44
Lomaprieta Y	NonModHist	Min	-3.5E-12	-2181.32
Mammoth X	NonModHist	Max	1545.459	2.87E-12
Mammoth X	NonModHist	Min	-1722.58	-2.3E-12
Mammoth Y	NonModHist	Max	2.24E-12	1492.204
Mammoth Y	NonModHist	Min	-2.3E-12	-1728.92
Pretolia X	NonModHist	Max	3012.361	3.64E-12
Pretolia X	NonModHist	Min	-3539.41	-2.9E-12
Pretolia Y	NonModHist	Max	2.47E-12	2991.181
Pretolia Y	NonModHist	Min	-2.8E-12	-3552.72
Umbria X	NonModHist	Max	568.148	1.96E-12
Umbria X	NonModHist	Min	-593.783	-1.6E-12
Umbria Y	NonModHist	Max	1.49E-12	570.546
Umbria Y	NonModHist	Min	-1.2E-12	-588.001
Whittier X	NonModHist	Max	249.906	4.26E-13
Whittier X	NonModHist	Min	-278.448	-4E-13
Whittier Y	NonModHist	Max	5.97E-13	260.017
Whittier Y	NonModHist	Min	-5.9E-13	-327.775
Montenegro X	NonModHist	Max	1582.418	3.24E-12
Montenegro X	NonModHist	Min	-1886.31	-3E-12
Montenegro Y	NonModHist	Max	2.91E-12	1557.067
Montenegro Y	NonModHist	Min	-2.4E-12	-1857.66

Tabla 47: Cortantes basales para el análisis dinámico no lineal empleando HDRB.

Reacciones en la base LRB.				
Caso de carga	Tipo de caso	Max/Min	FX	FY
		Text	KN	KN
Coalinga X	NonModHist	Max	2737.605	1.25E-11
Coalinga X	NonModHist	Min	-2337.363	-1.21E-11
Coalinga Y	NonModHist	Max	1E-11	3801.871
Coalinga Y	NonModHist	Min	-9.83E-12	-3808.168
Duzce X	NonModHist	Max	2170.902	1.33E-11
Duzce X	NonModHist	Min	-2170.451	-1.34E-11
Duzce Y	NonModHist	Max	1.25E-11	2561.994
Duzce Y	NonModHist	Min	-1.28E-11	-2432.763
Friuli X	NonModHist	Max	846.311	4.45E-12
Friuli X	NonModHist	Min	-900.544	-4.96E-12
Friuli Y	NonModHist	Max	4.37E-12	897.278
Friuli Y	NonModHist	Min	-4.81E-12	-937.715
Helena X	NonModHist	Max	2639.508	8.48E-12
Helena X	NonModHist	Min	-2393.886	-8.88E-12
Helena Y	NonModHist	Max	6.97E-12	3403.797
Helena Y	NonModHist	Min	-6.93E-12	-3988.837
Lomaprieta X	NonModHist	Max	2714.918	1.79E-11
Lomaprieta X	NonModHist	Min	-2246.39	-1.73E-11
Lomaprieta Y	NonModHist	Max	1.54E-11	4019.201
Lomaprieta Y	NonModHist	Min	-1.73E-11	-3455.166
Mammoth X	NonModHist	Max	2042.044	9.19E-12
Mammoth X	NonModHist	Min	-1937.903	-9.19E-12
Mammoth Y	NonModHist	Max	9.2E-12	2188.432
Mammoth Y	NonModHist	Min	-9.35E-12	-2092.41
Pretolia X	NonModHist	Max	3102.881	1.44E-11
Pretolia X	NonModHist	Min	-3147.277	-1.31E-11
Pretolia Y	NonModHist	Max	1.39E-11	4379.448
Pretolia Y	NonModHist	Min	-1.25E-11	-5753.292
Umbria X	NonModHist	Max	1133.815	1.1E-11
Umbria X	NonModHist	Min	-1304.878	-9.86E-12
Umbria Y	NonModHist	Max	1.01E-11	1352.291
Umbria Y	NonModHist	Min	-9.08E-12	-1424.772
Whittier X	NonModHist	Max	749.425	4.32E-12
Whittier X	NonModHist	Min	-899.552	-4.34E-12
Whittier Y	NonModHist	Max	4.35E-12	753.1
Whittier Y	NonModHist	Min	-4.35E-12	-920.295
Montenegro X	NonModHist	Max	2121.636	1.6E-11
Montenegro X	NonModHist	Min	-2295.855	-1.34E-11
Montenegro Y	NonModHist	Max	1.49E-11	2496.719
Montenegro Y	NonModHist	Min	-1.22E-11	-2733.239

Tabla 48: Cortantes basales para el análisis dinámico no lineal empleando LRB.

Reacciones en la base FPS.				
Caso de carga	Tipo de caso	Max/Min	FX	FY
		Text	KN	KN
Coalinga X	NonModHist	Max	2361.523	0.004941
Coalinga X	NonModHist	Min	-2157.438	-0.007631
Coalinga Y	NonModHist	Max	0.001342	2362.423
Coalinga Y	NonModHist	Min	-0.008636	-2156.532
Duzce X	NonModHist	Max	2160.094	0.000115
Duzce X	NonModHist	Min	-1960.595	-0.001345
Duzce Y	NonModHist	Max	0.000755	2158.008
Duzce Y	NonModHist	Min	-0.001087	-1942.414
Friuli X	NonModHist	Max	1305.365	6.42E-05
Friuli X	NonModHist	Min	-1228.454	-6.6E-05
Friuli Y	NonModHist	Max	0.000151	1336.314
Friuli Y	NonModHist	Min	-0.000144	-1268.311
Helena X	NonModHist	Max	2394.792	0.00018
Helena X	NonModHist	Min	-1985.515	-7.33E-05
Helena Y	NonModHist	Max	0.000333	2382.099
Helena Y	NonModHist	Min	-0.003251	-2009.129
Lomapieta X	NonModHist	Max	2248.561	0.000991
Lomapieta X	NonModHist	Min	-1991.291	-7.88E-05
Lomapieta Y	NonModHist	Max	0.000204	2255.993
Lomapieta Y	NonModHist	Min	-0.00018	-1988.243
Mammoth X	NonModHist	Max	2018.112	9.16E-05
Mammoth X	NonModHist	Min	-1873.427	-0.002976
Mammoth Y	NonModHist	Max	0.000547	2004.636
Mammoth Y	NonModHist	Min	-0.000176	-1867.972
Pretolia X	NonModHist	Max	2798.263	0.00467
Pretolia X	NonModHist	Min	-2634.576	-0.005811
Pretolia Y	NonModHist	Max	0.01	2785.677
Pretolia Y	NonModHist	Min	-0.00503	-2700.548
Umbria X	NonModHist	Max	1309.672	8.78E-05
Umbria X	NonModHist	Min	-1408.336	-6.41E-05
Umbria Y	NonModHist	Max	0.000202	1308.327
Umbria Y	NonModHist	Min	-0.000149	-1405.633
Whittier X	NonModHist	Max	1021.573	8.83E-05
Whittier X	NonModHist	Min	-924.796	-7.01E-05
Whittier Y	NonModHist	Max	0.000203	1044.862
Whittier Y	NonModHist	Min	-0.000168	-937.789
Montenegro X	NonModHist	Max	1906.955	0.006063
Montenegro X	NonModHist	Min	-2248.483	-0.002999
Montenegro Y	NonModHist	Max	0.001576	1910.621
Montenegro Y	NonModHist	Min	-0.002956	-2242.986

Tabla 49: Cortantes basales para el análisis dinámico no lineal empleando FPS.

## 12. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

### 12.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS MODELO 1.

Reacciones en la base y reducciones empleando diferentes tipos de aisladores.											
Caso de carga	BASE FIJA		HDRB		% HDRB	LRB		% LRB	FPS		% FPS
	FX	FY	FX	FY		FX	FY		FX	FY	
Coalinga X	6102.3	61.5	1304.4	42.7	78.62%	1815.7	31.5	70.25%	2320.3	25.1	61.98%
Coalinga Y	61.5	5661.6	41.4	1297.7	77.08%	27.9	1803.3	68.15%	17.8	2341.1	58.65%
Duzce X	6517.0	65.4	1356.8	38.4	79.18%	1521.1	26.7	76.66%	2212.9	33.8	66.04%
Duzce Y	65.4	7217.4	37.8	1363.1	81.11%	23.3	1481.8	79.47%	19.6	2257.3	68.72%
Friuli X	2060.5	202.4	281.5	14.7	86.34%	587.6	11.5	71.48%	1637.8	23.6	20.51%
Friuli Y	202.4	1940.3	14.6	277.0	85.72%	11.9	541.8	72.08%	27.3	1601.1	17.48%
Helena X	4303.3	72.2	1604.1	44.2	62.72%	1751.6	33.2	59.30%	2346.7	16.2	45.47%
Helena Y	72.2	4357.3	43.0	1600.9	63.26%	31.1	1750.1	59.84%	13.2	2406.9	44.76%
Lomapieta X	4217.0	111.8	1915.0	38.3	54.59%	1942.6	20.9	53.93%	2180.3	28.1	48.30%
Lomapieta Y	111.8	5061.4	41.4	1914.4	62.18%	29.3	1944.5	61.58%	38.1	2204.3	56.45%
Mammoth X	7037.3	100.3	956.7	39.1	86.41%	1277.4	28.2	81.85%	1979.4	37.8	71.87%
Mammoth Y	100.3	8098.0	39.7	970.0	88.02%	43.7	1322.2	83.67%	18.6	2106.1	73.99%
Pretolia X	20106.7	178.2	1989.4	59.8	90.11%	2073.9	34.2	89.69%	2856.2	49.3	85.79%
Pretolia Y	178.2	20390.8	56.0	2003.3	90.18%	26.5	2042.1	89.99%	21.2	2979.5	85.39%
Umbria X	2847.1	101.8	330.0	6.6	88.41%	1071.2	11.7	62.38%	1526.8	18.4	46.37%
Umbria Y	101.8	3086.1	6.6	327.7	89.38%	10.5	1039.6	66.31%	17.5	1524.7	50.59%
Whittier X	1721.1	241.7	162.7	4.6	90.55%	437.4	8.3	74.59%	1491.7	36.2	13.33%
Whittier Y	241.7	1829.3	4.6	164.0	91.04%	8.4	416.8	77.21%	53.4	1457.5	20.32%
Montenegro X	12969.2	133.1	1134.7	41.4	91.25%	1483.7	23.9	88.56%	2244.4	44.2	82.69%
Montenegro Y	133.1	10874.1	41.7	1146.0	89.46%	31.0	1502.1	86.19%	39.2	2265.5	79.17%

**Tabla 50: Resumen de reducciones para los cortantes basales empleando aisladores.**

De acuerdo con los análisis empleados, se analizarán los resultados de las fuerzas cortantes en la base, los desplazamientos, las aceleraciones y la relación fuerza-desplazamiento para los aisladores empleados. Comparando los resultados del sistema aislado con los de un sistema con base fija, se evidencia una disminución de la fuerza cortante en la base para todos los aisladores empleados.

### 12.1.1. Graficas cortante basal Vs tiempo.

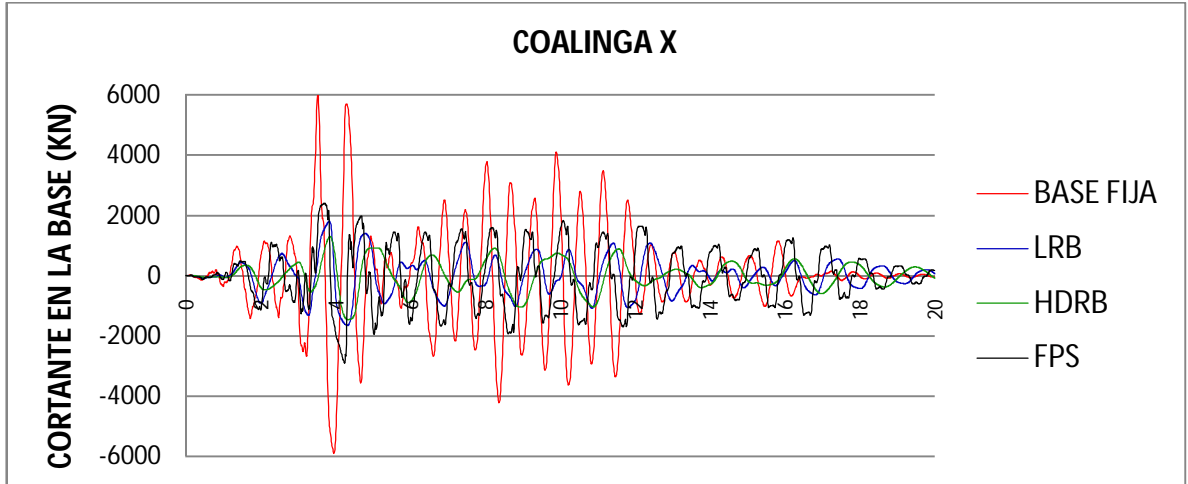


Figura 50: Cortante Basal Coalinga X Vs tiempo

Se puede observar en la grafica que el cortante basal para una estructura con base fija es mayor que para una estructura aislada de su base, también las diferencias entre los aisladores son evidentes y serán el motivo de análisis.

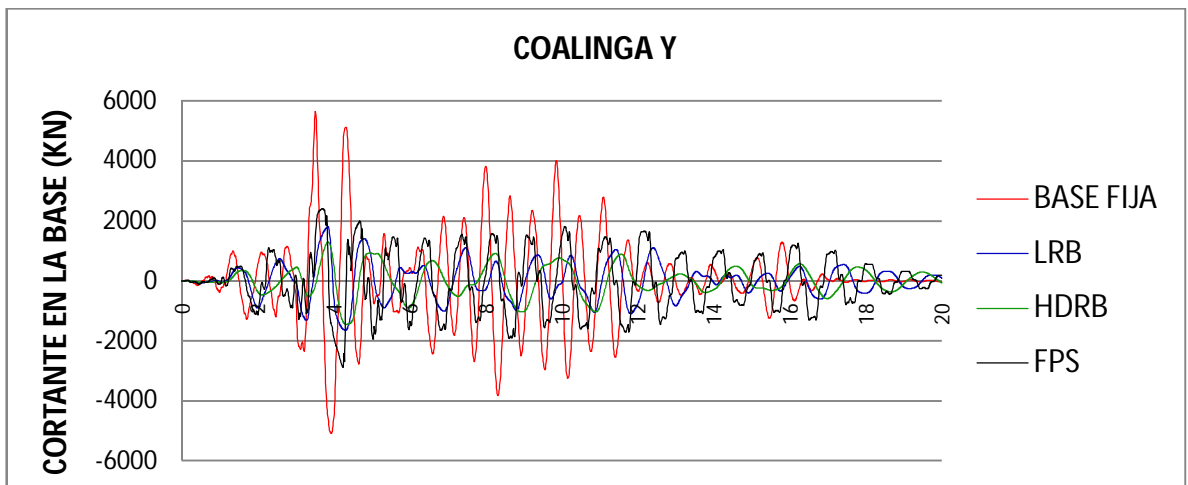


Figura 51: Cortante Basal Coalinga Y Vs tiempo

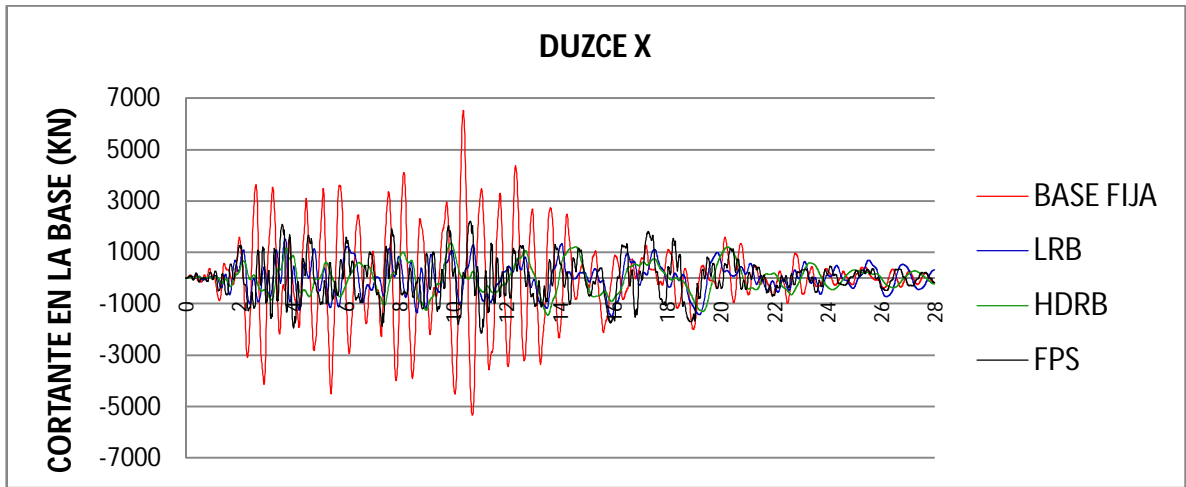


Figura 52: Cortante Basal Duzce X Vs tiempo

El comportamiento de los aisladores para este sismo es similar, sin embargo el sistema de fricción tiene valores mayores de fuerza cortante comparándolo con los aisladores elastoméricos HDRB, LRB, no obstante las reducciones son superiores al 50% comparándola con la fuerza cortante para la estructura base fija.

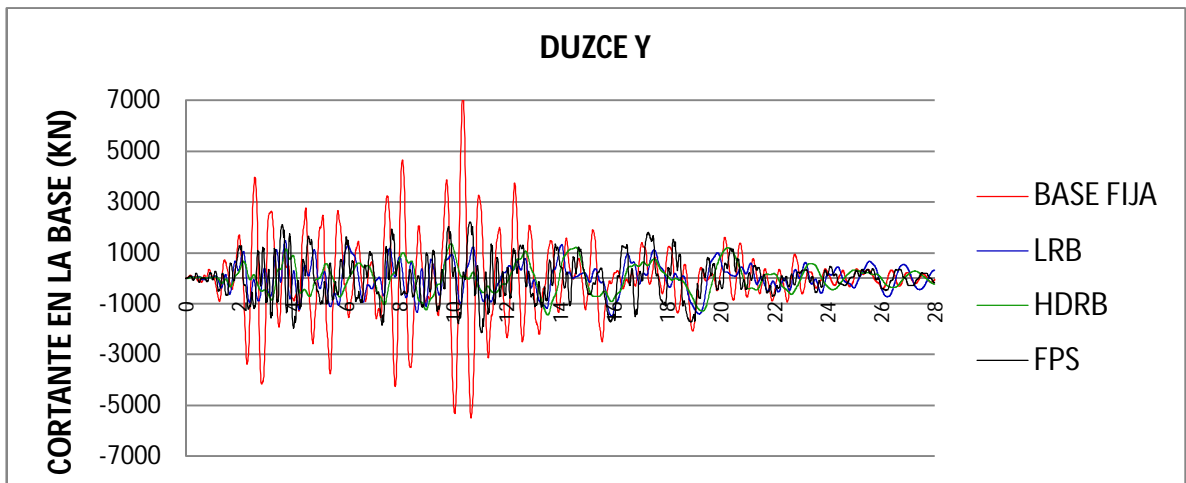


Figura 53: Cortante Basal Duzce Y Vs tiempo

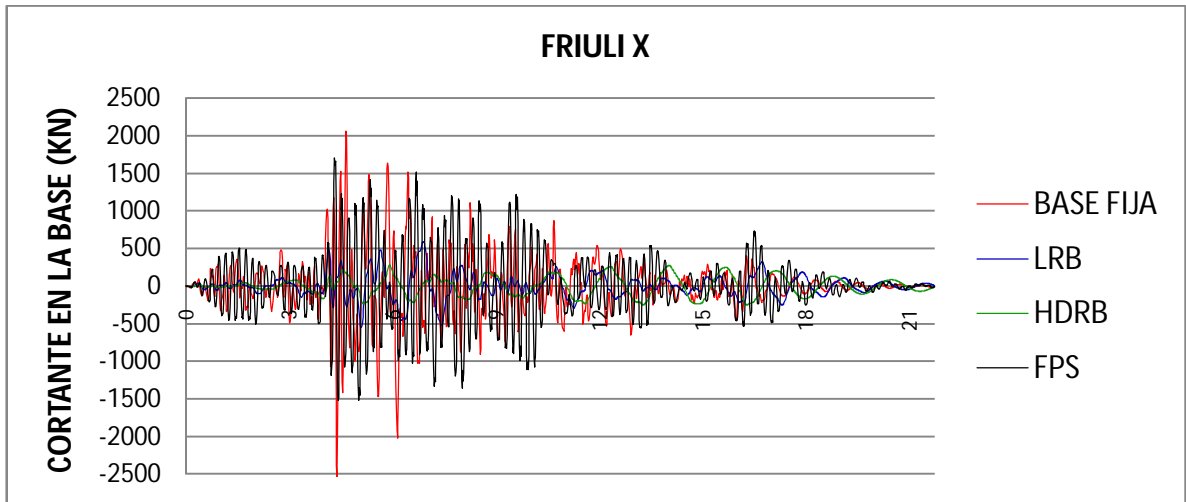


Figura 54: Cortante Basal Friuli X Vs tiempo

Se observa una respuesta similar para el sistema con base fija y con aislador FPS, esto se debe a que para la fuerza cortante el aislador no alcanza su rango post-fluencia, el comportamiento lo define la rigidez elástica.

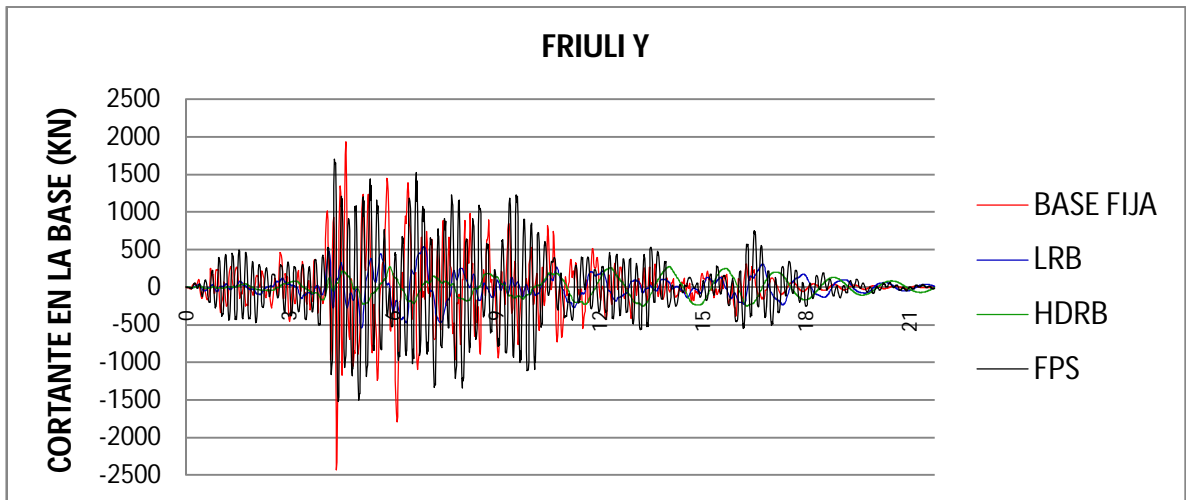


Figura 55: Cortante Basal Friuli Y Vs tiempo

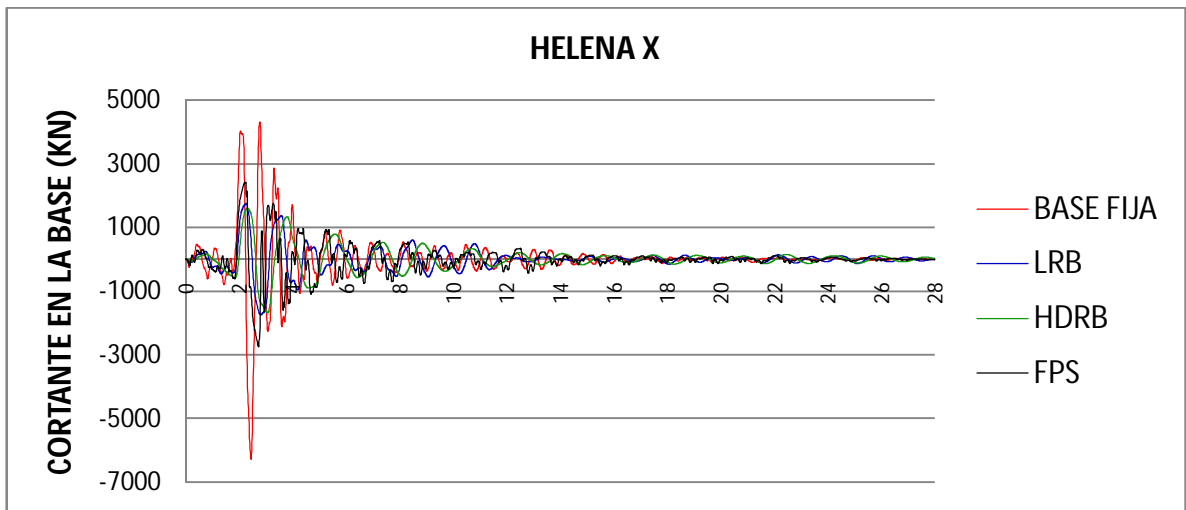


Figura 56: Cortante Basal Helena X Vs tiempo

En general los dispositivos reducen la fuerza cortante en valores similares, dado que los dispositivos se alcanzan a comportar en el rango inelástico para el cortante máximo.

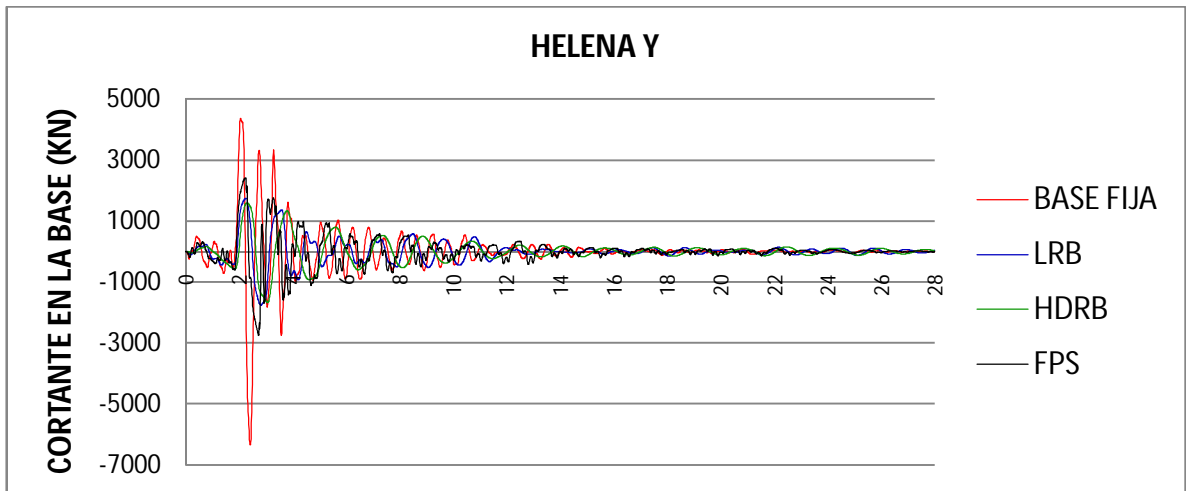


Figura 57: Cortante Basal Helena Y Vs tiempo

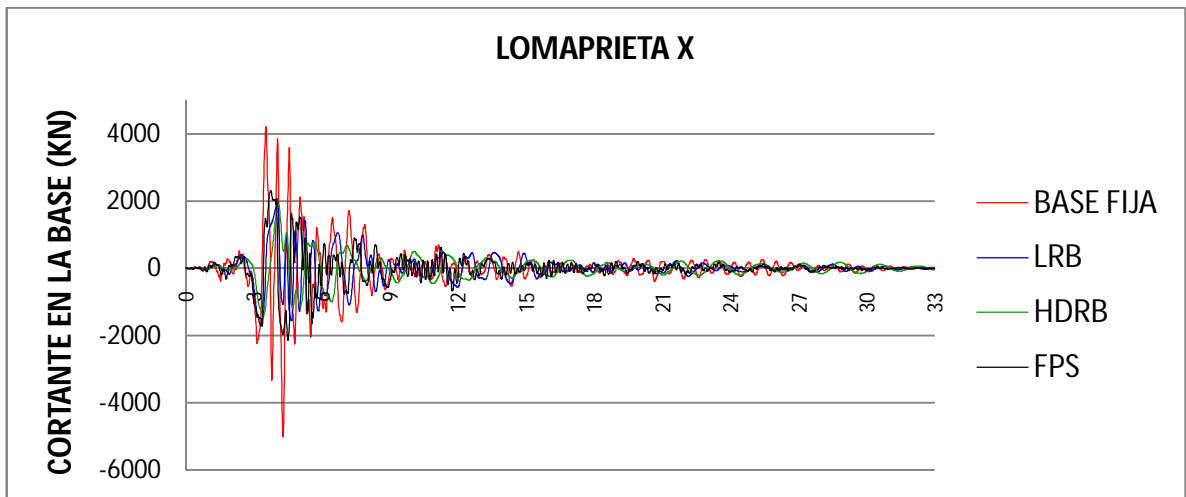


Figura 58: Cortante Basal Loma prieta X Vs tiempo

La fuerza cortante se reduce en un alto porcentaje por todos los dispositivos.

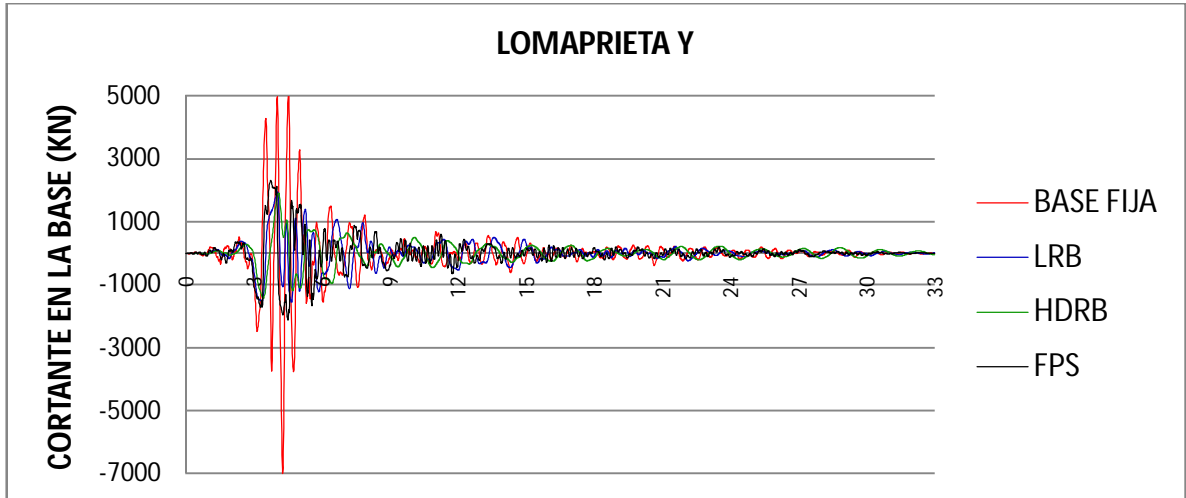


Figura 59: Cortante Basal Loma prieta Y Vs tiempo

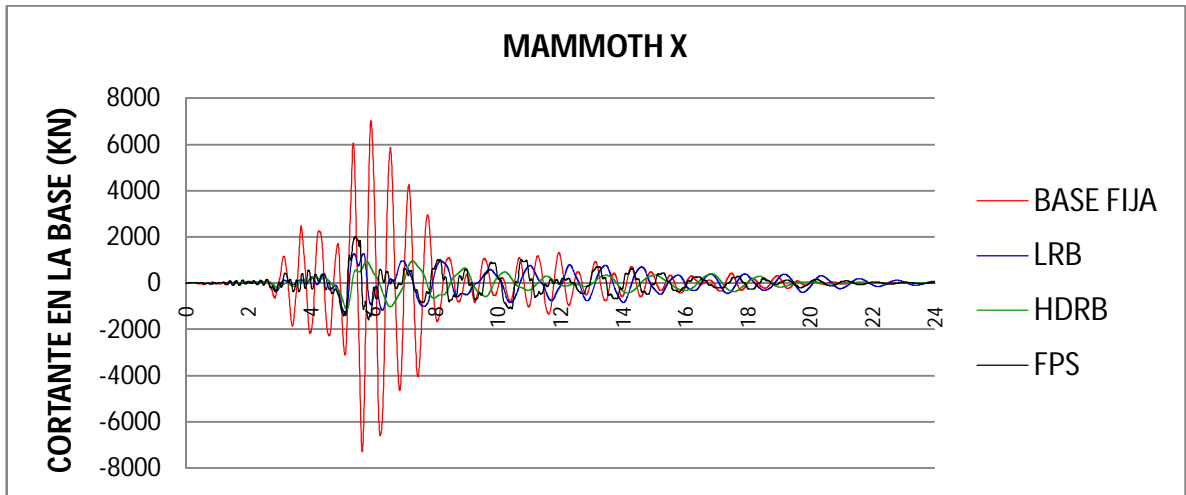


Figura 60: Cortante Basal Mammoth X Vs tiempo

La reducción se hace evidente ya que la respuesta para este sismo está controlada por la rigidez post-fluencia en todos los aisladores, alcanzada por la magnitud de la fuerza cortante al rededor de los 6 segundos; también se observa después de 12 segundos una respuesta similar de los sistemas a una base fija.

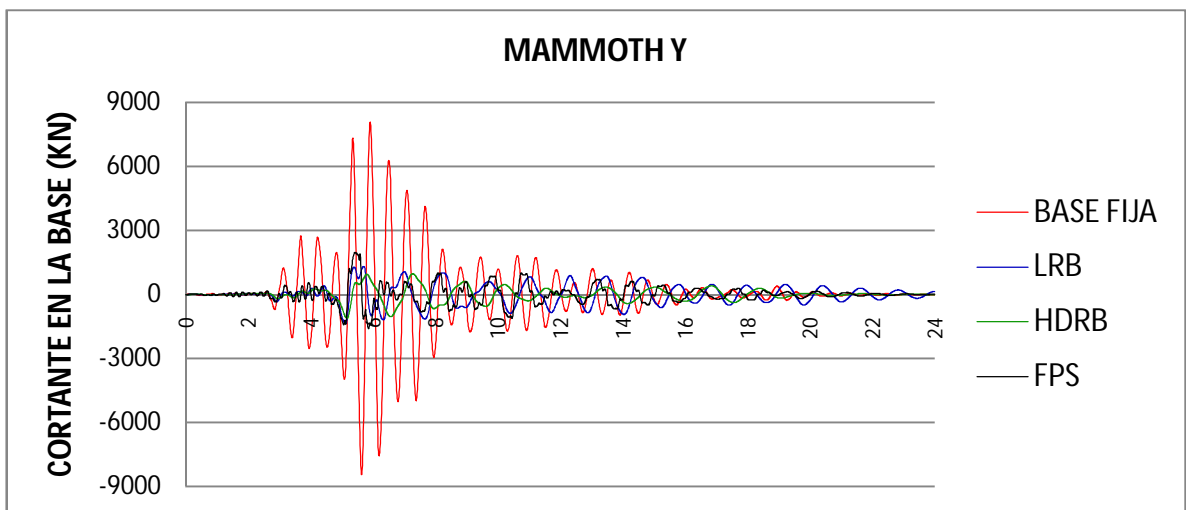


Figura 61: Cortante Basal Mammoth Y Vs tiempo

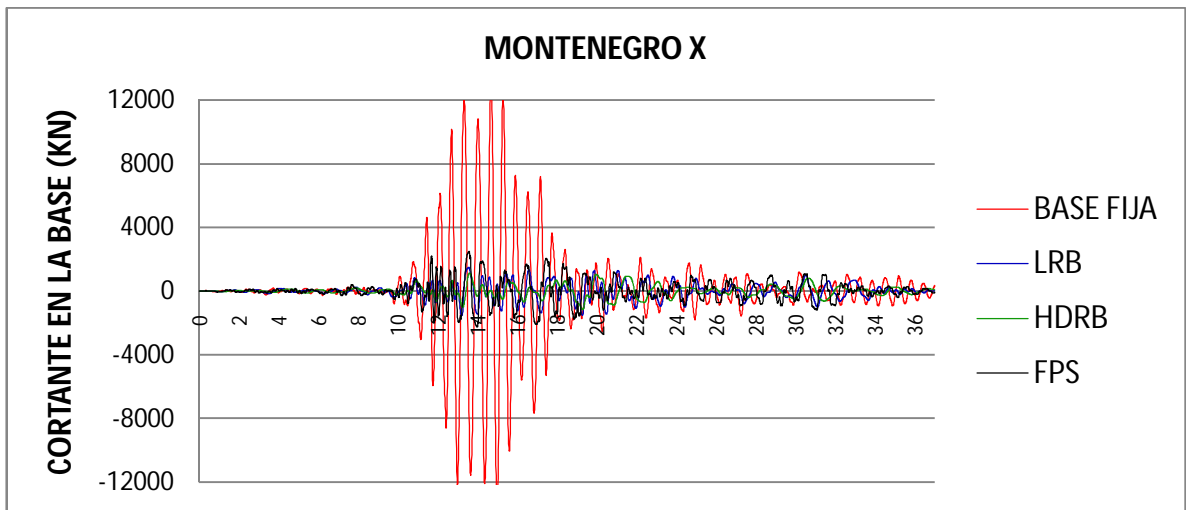


Figura 62: Cortante Basal Montenegro X Vs tiempo

Se presenta otro caso más que permite evidenciar que la respuesta sísmica está controlada por la rigidez post-fluencia de cada aislador cuando se alcanzan grandes magnitudes de fuerzas cortantes.

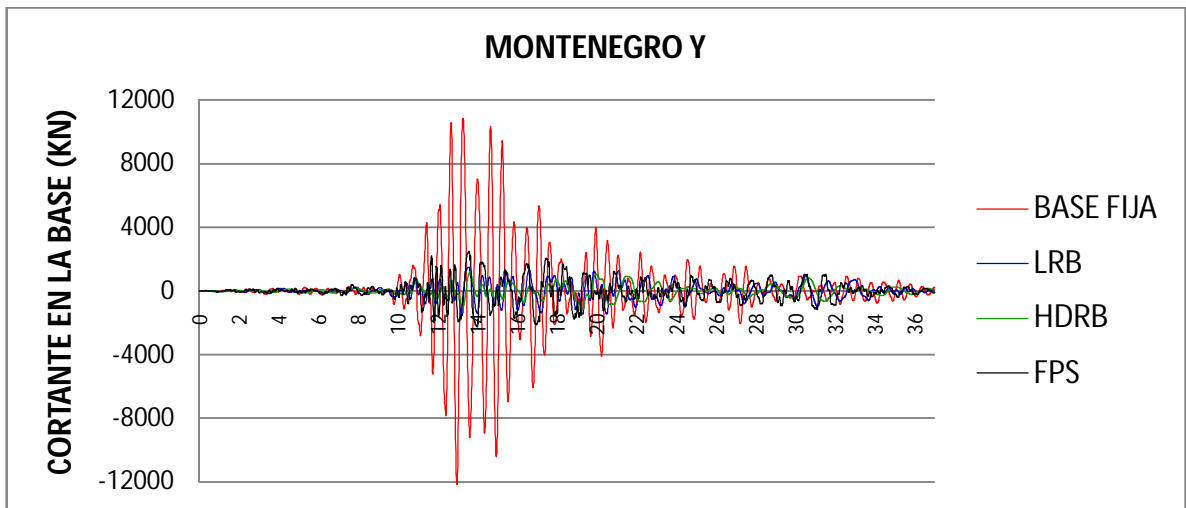


Figura 63: Cortante Basal Montenegro Y Vs tiempo

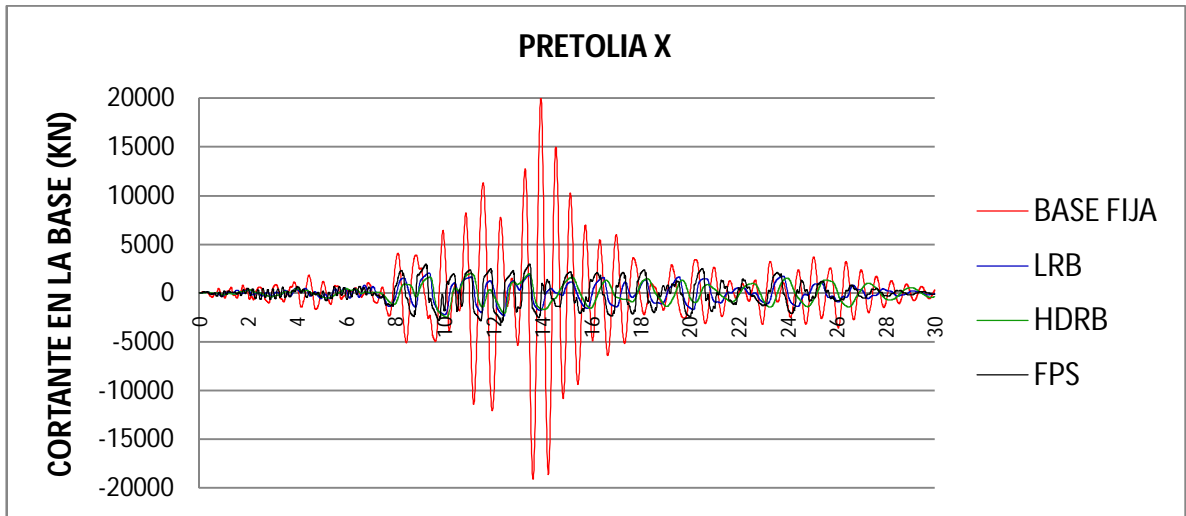


Figura 64: Cortante Basal Pretolia X Vs tiempo

Es el sismo que más afecta a la estructura con base fija al inducirle fuerzas cortantes de grandes magnitudes, se observan las ventajas del sistema de aislación para los movimientos fuertes del terreno controlando los niveles de fuerza cortante que se inducen a la superestructura.

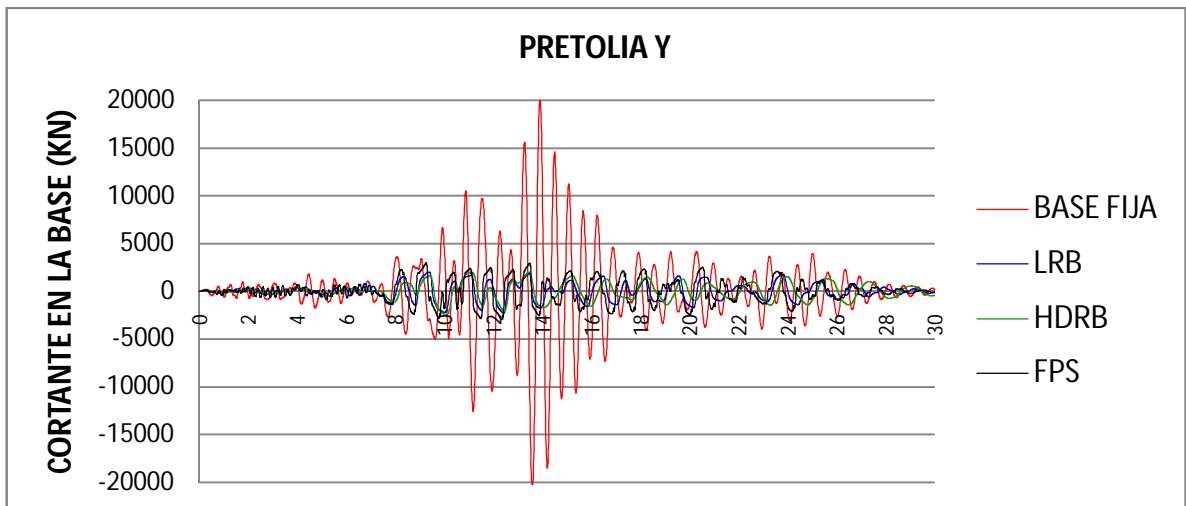


Figura 65: Cortante Basal Pretolia Y Vs tiempo

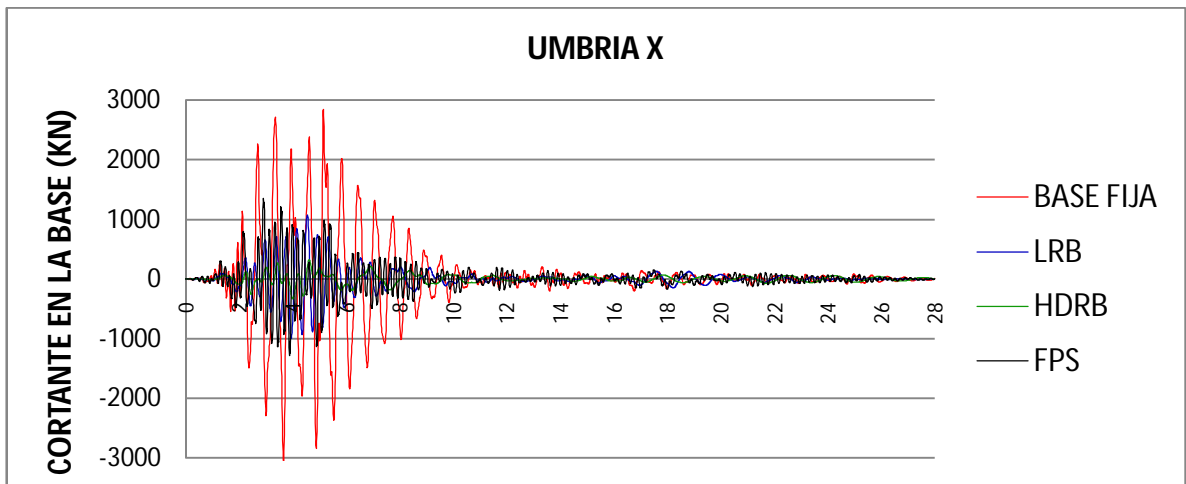


Figura 66: Cortante Basal Umbría X Vs tiempo

El comportamiento en general de los sistemas de aislación empleados es similar para este evento sísmico, de presentan reducciones importantes.

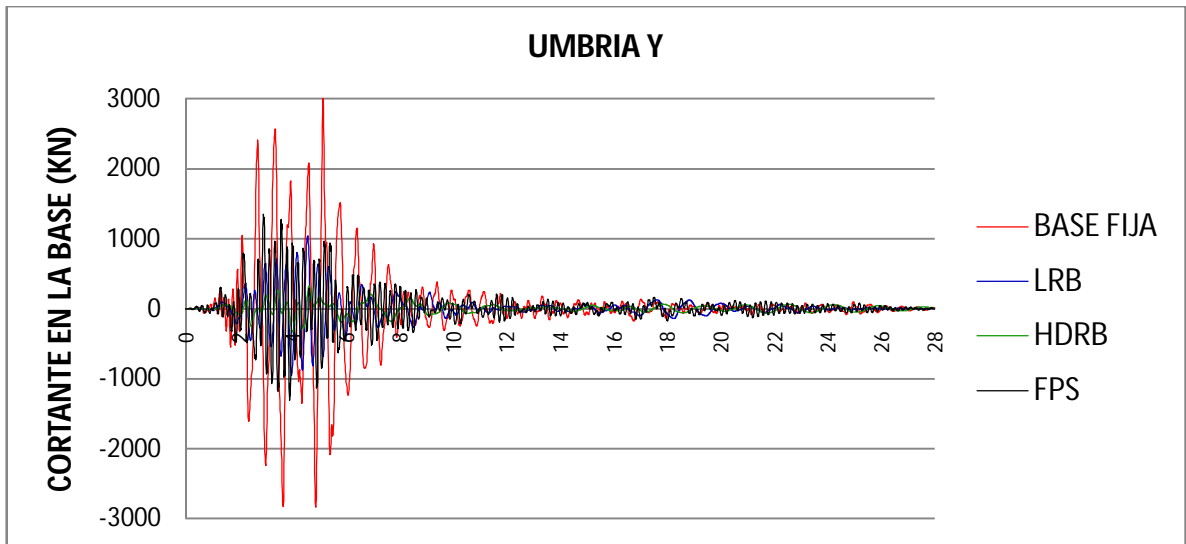


Figura 67: Cortante Basal Umbría Y Vs tiempo

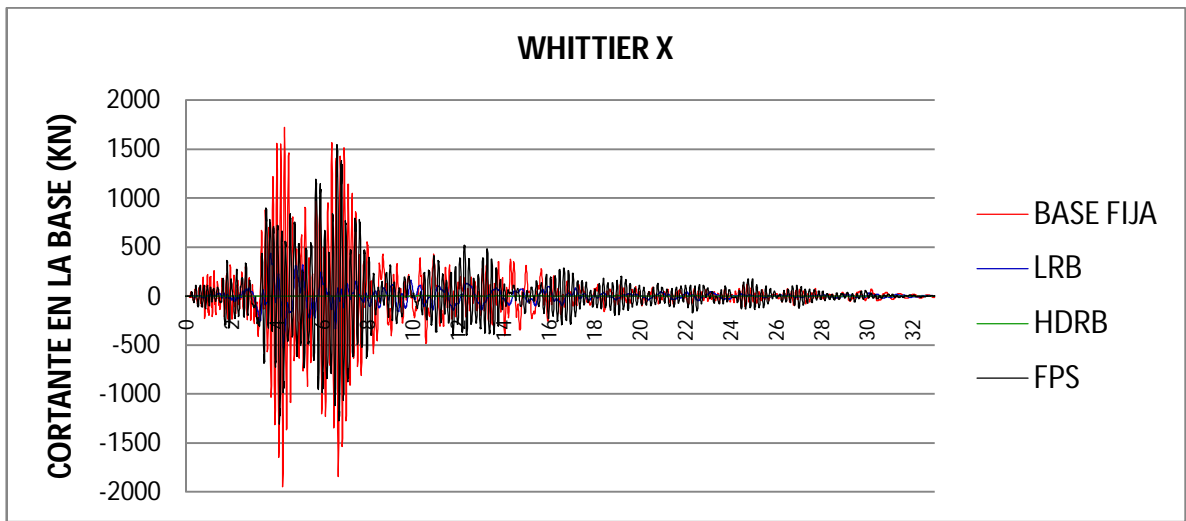


Figura 68: Cortante Basal Whittier X Vs tiempo

Este caso de sismo en particular permite explicar un poco lo que es un sistema de control estructural pasivo, donde la respuesta del sistema depende de la sollicitación sísmica y no se puede calibrar, para fuerzas cortantes de sismos moderados o bajos la reducción respecto a estructuras con base fija no se hace tan evidente.

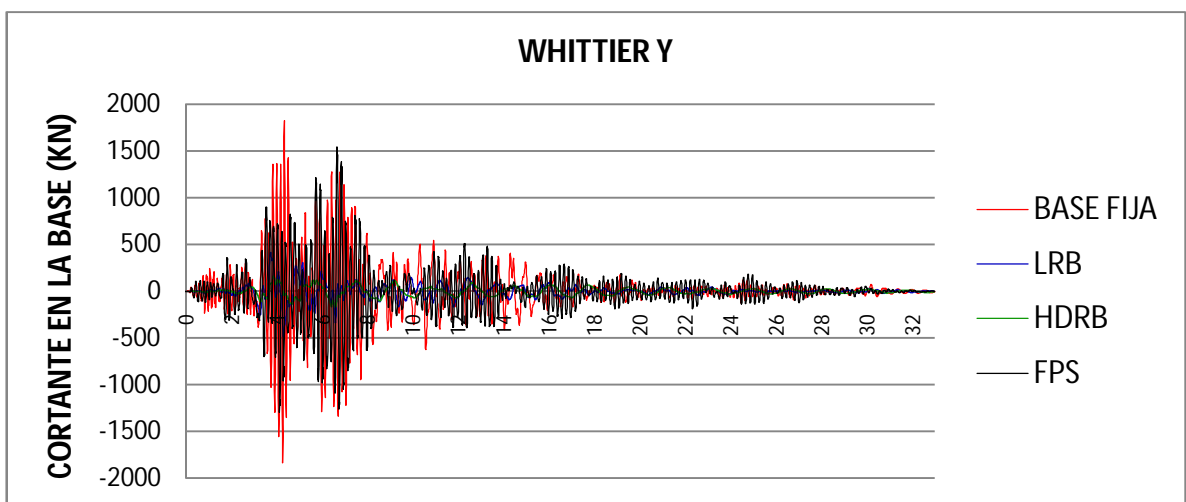
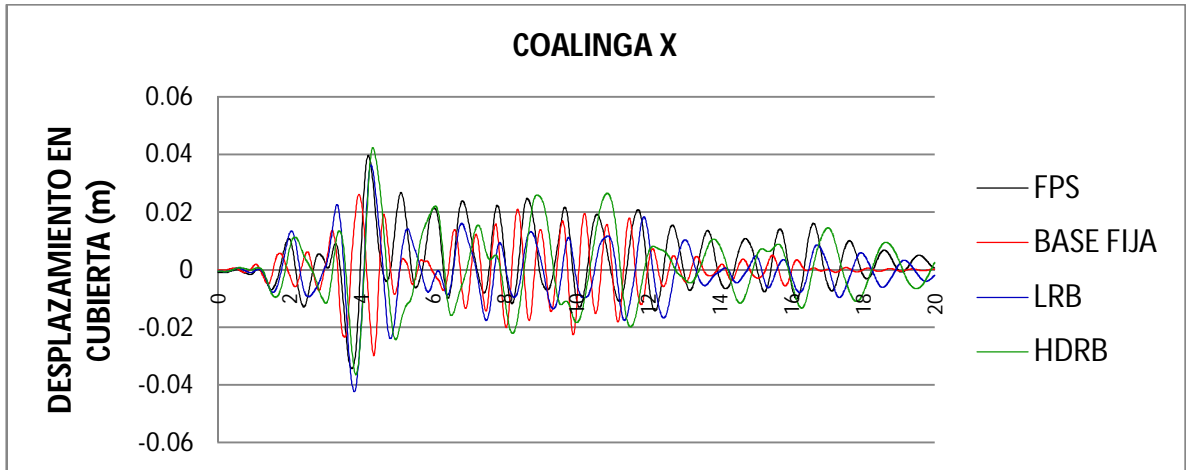


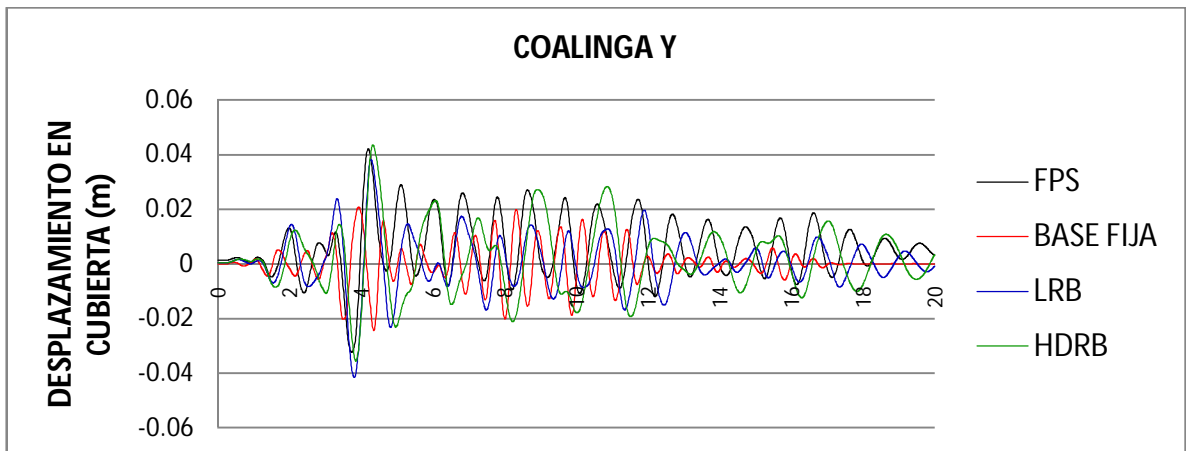
Figura 69: Cortante Basal Whittier Y Vs tiempo

**12.1.2. Graficas de desplazamiento para un nodo de control en la cubierta vs tiempo.**



**Figura 70: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Coalinga X**

Los sistemas de aislamiento de base generan que se aumenten los desplazamientos, respecto a una estructura con base fija, estos desplazamientos se encuentran concentrados en el sistema de aislación.



**Figura 71: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Coalinga X.**

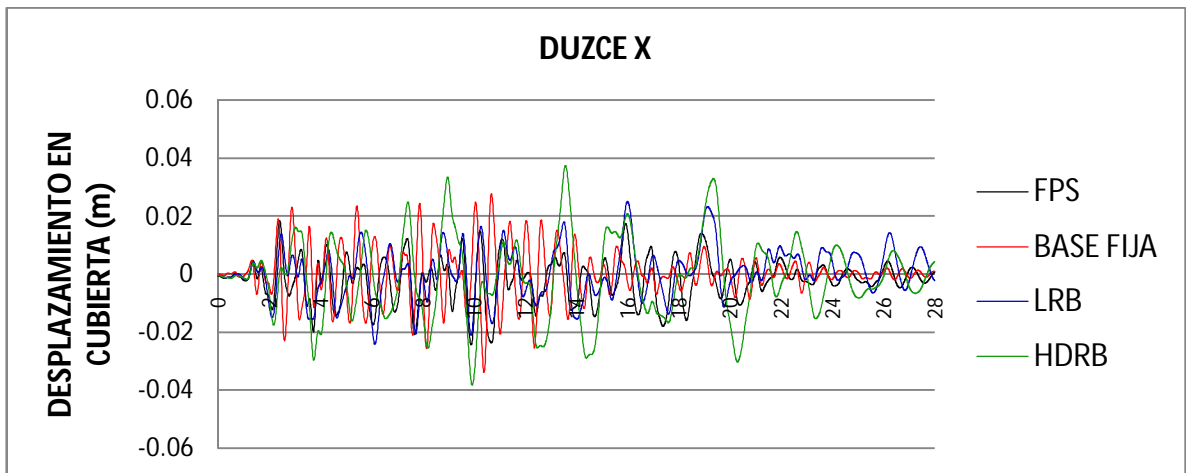


Figura 72: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Duzce X.

Los aisladores tipo péndulo de fricción reducen los desplazamientos de la estructura en mayor grado que los aisladores elastoméricos.

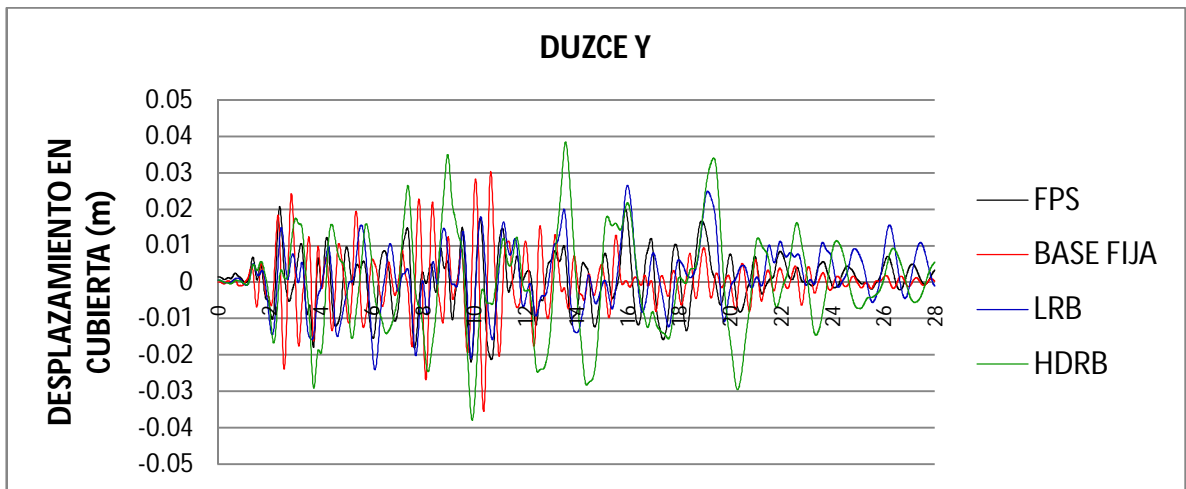


Figura 73: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Duzce Y.

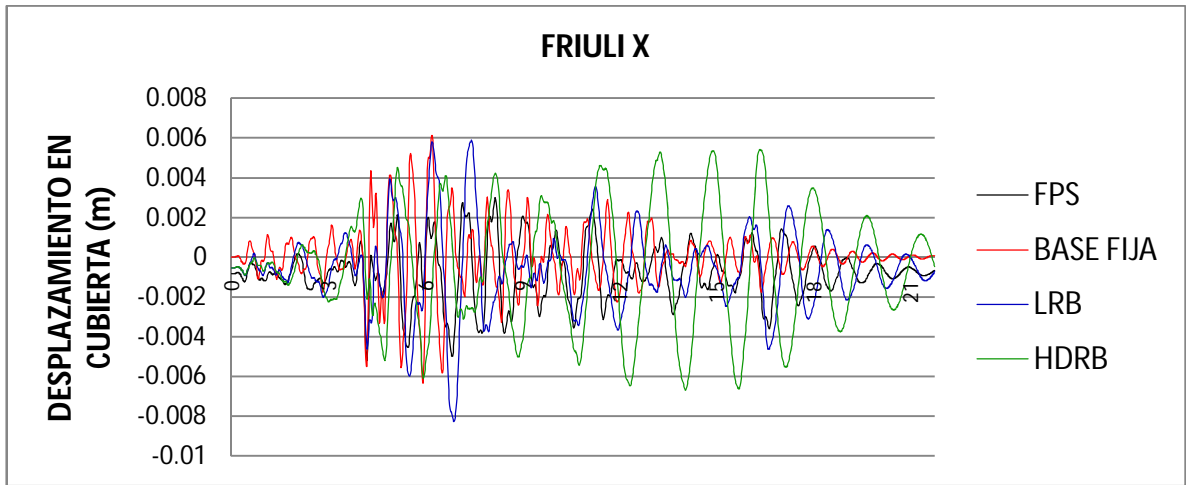


Figura 74: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Friuli X.

En general se observa que el aislador de alto amortiguamiento genera los desplazamientos más grandes con respecto a los otros sistemas.

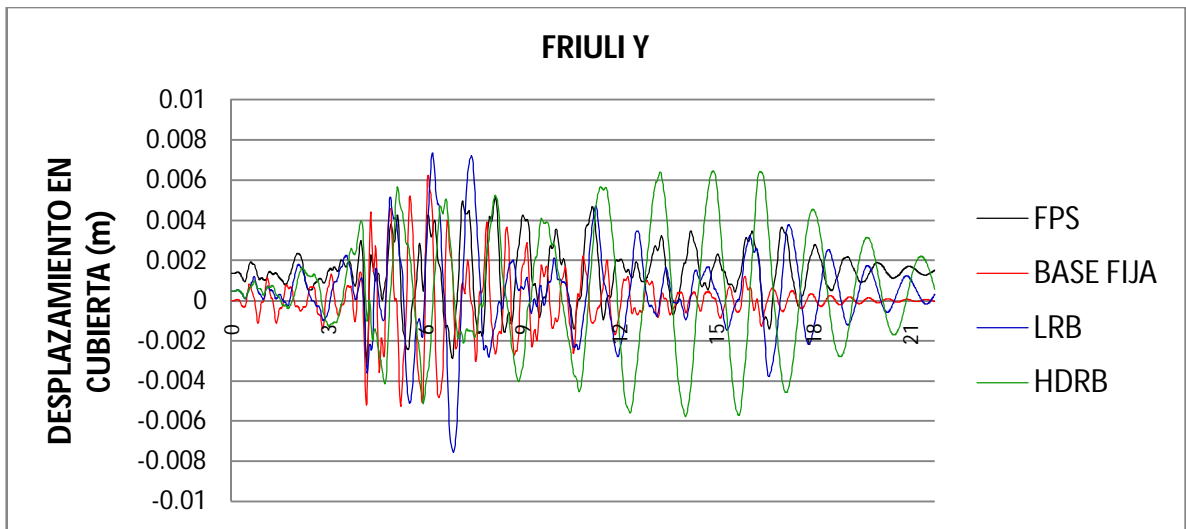


Figura 75: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Friuli Y.

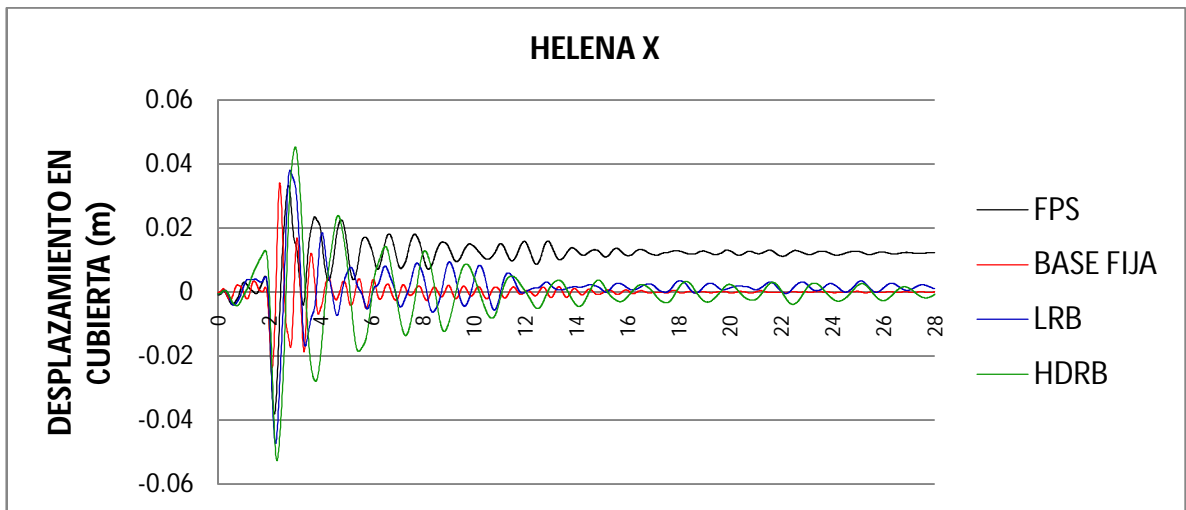


Figura 76: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Helena X

Se observa claramente que el sistema de péndulo de fricción no regresa a su posición inicial, esto se debe a que en este caso la fuerza de fricción supero a la fuerza restauradora, mientras que los aisladores elastoméricos regresaron a su posición inicial.

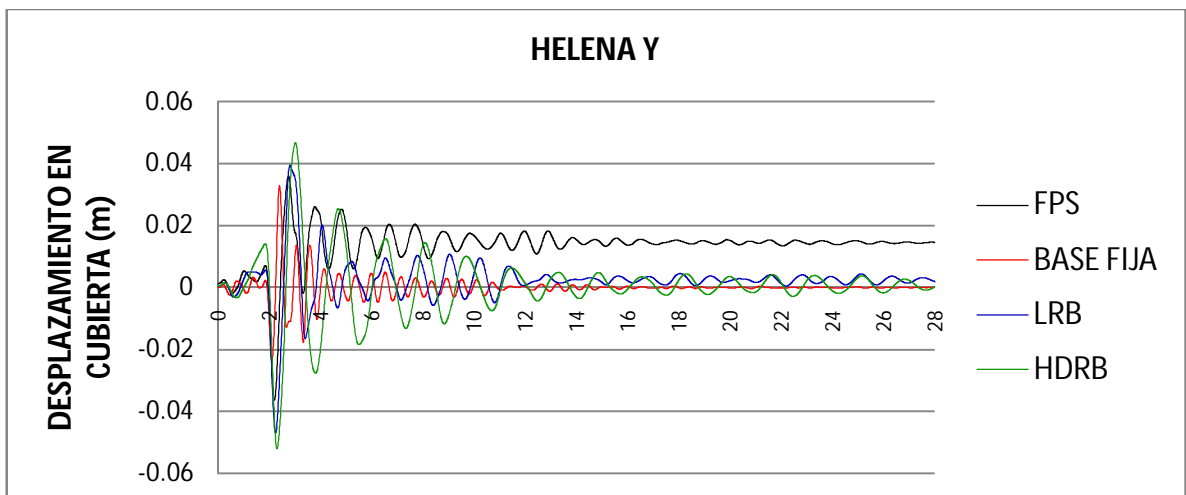


Figura 77: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Helena Y

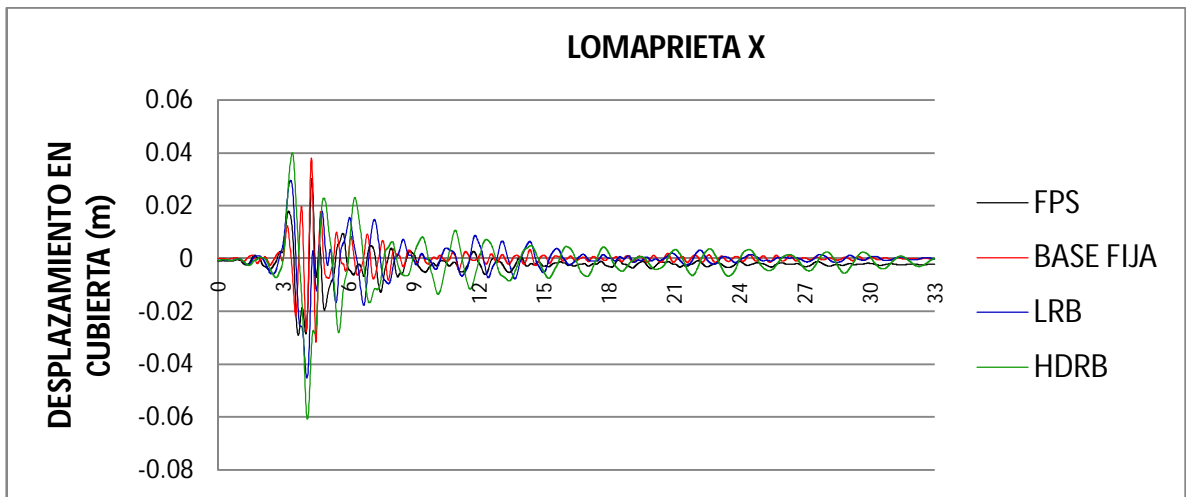


Figura 78: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Loma prieta X

Se presenta nuevamente un desplazamiento mayor para los aisladores elastoméricos.

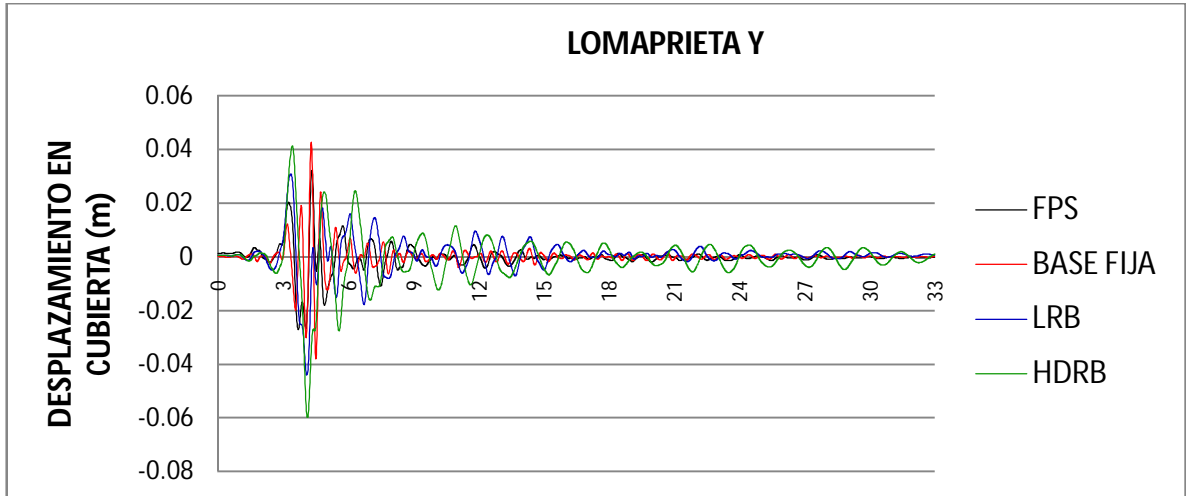


Figura 79: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Loma prieta Y

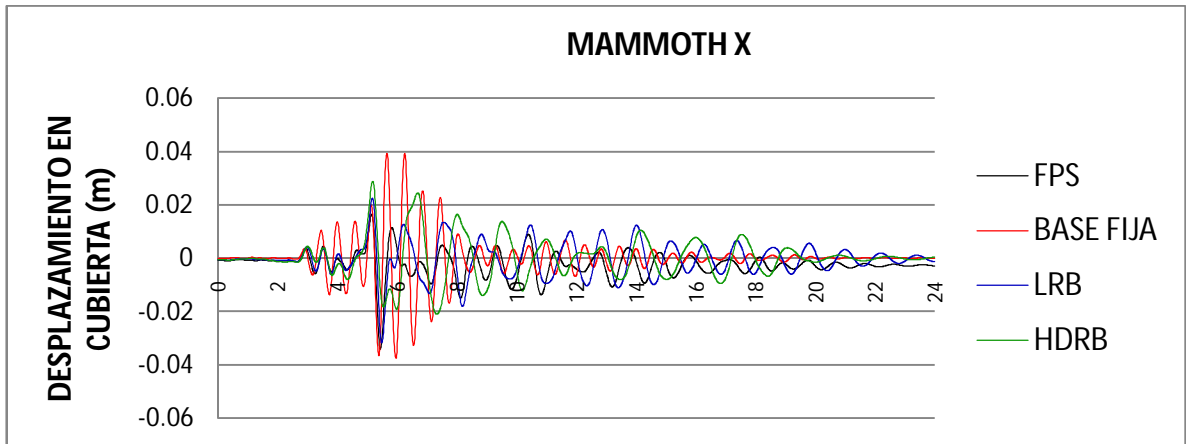


Figura 80: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Mammoth X

Al comparar la grafica del desplazamiento con la grafica de cortante, se aprecia que el sistema de aislación está sometido a una fuerza cortante baja y los grandes desplazamientos en la estructura con base fijase debe a que existe una fuerza cortante alta actuando.

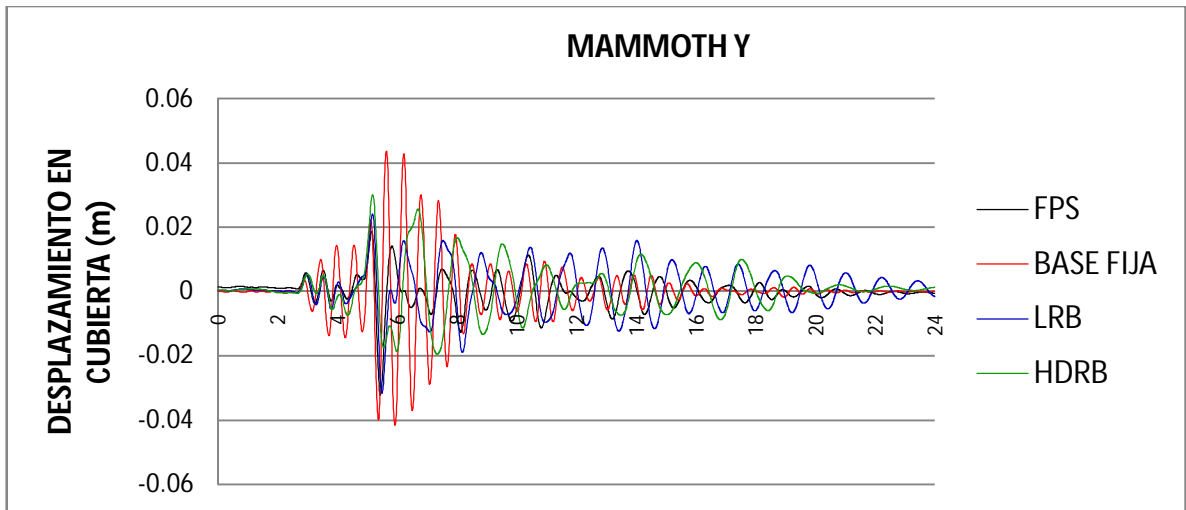


Figura 81: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Mammoth Y.

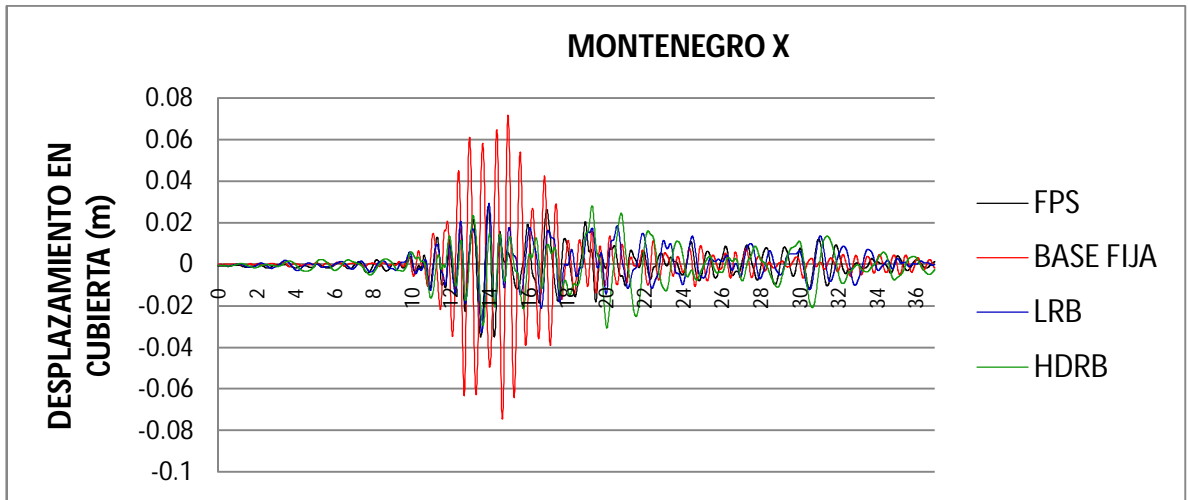


Figura 82: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Montenegro X

Al comparar la grafica del desplazamiento con la grafica de cortante, se aprecia que el sistema de aislación está sometido a una fuerza cortante baja y los grandes desplazamientos en la estructura con base fijase debe a que existe una fuerza cortante alta actuando.

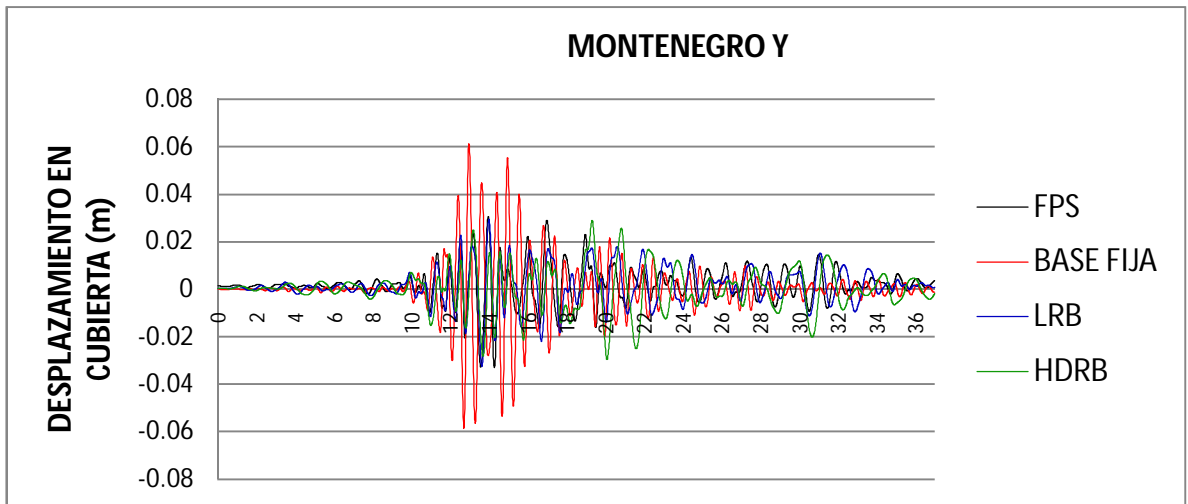


Figura 83: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Montenegro Y

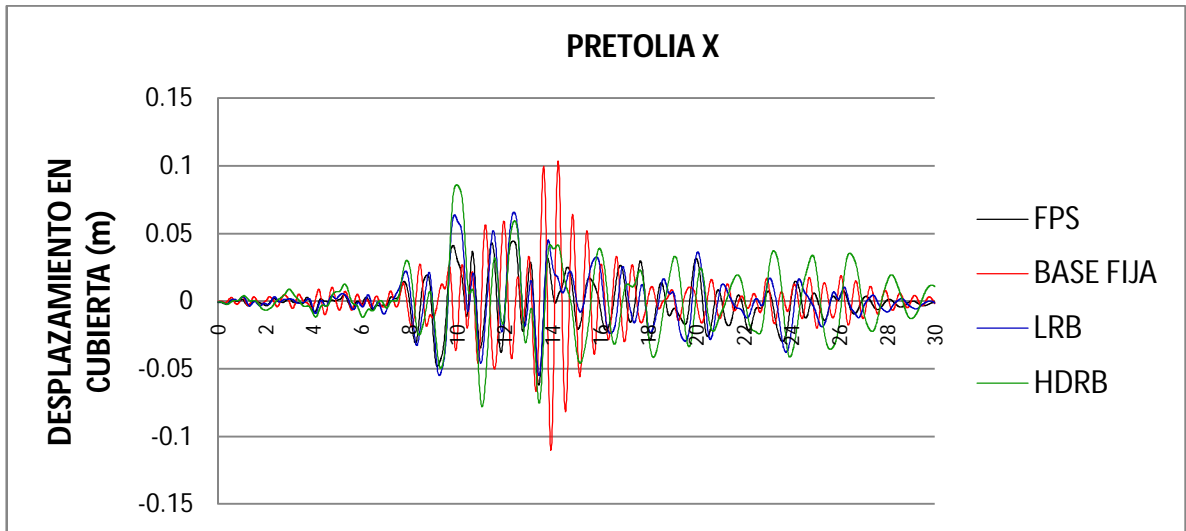


Figura 84: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Pretolia x.

Al comparar la grafica del desplazamiento con la grafica de cortante, se aprecia que el sistema de aislación está sometido a una fuerza cortante baja y los grandes desplazamientos en la estructura con base fijase debe a que existe una fuerza cortante alta actuando.

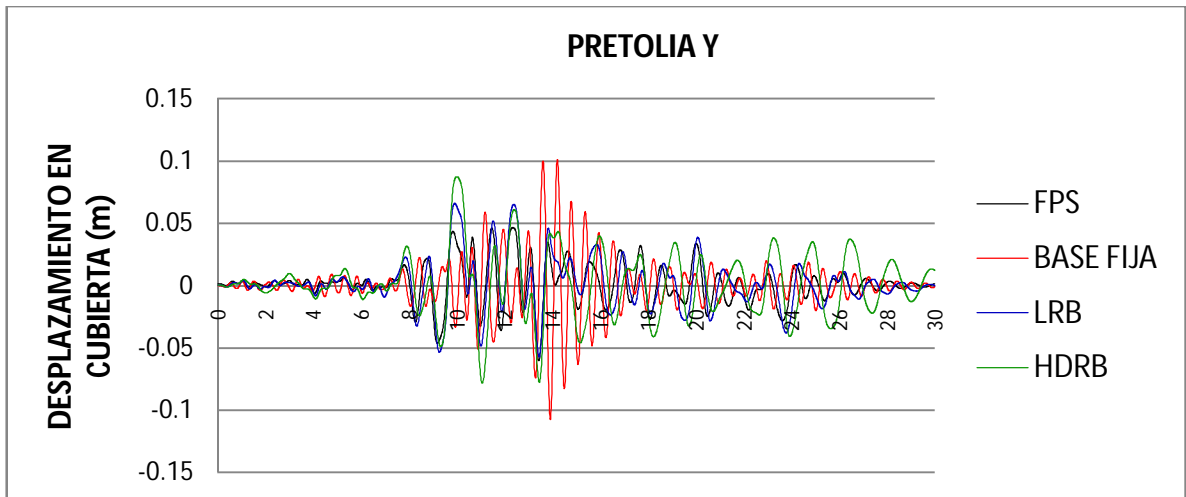


Figura 85: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Pretolia Y

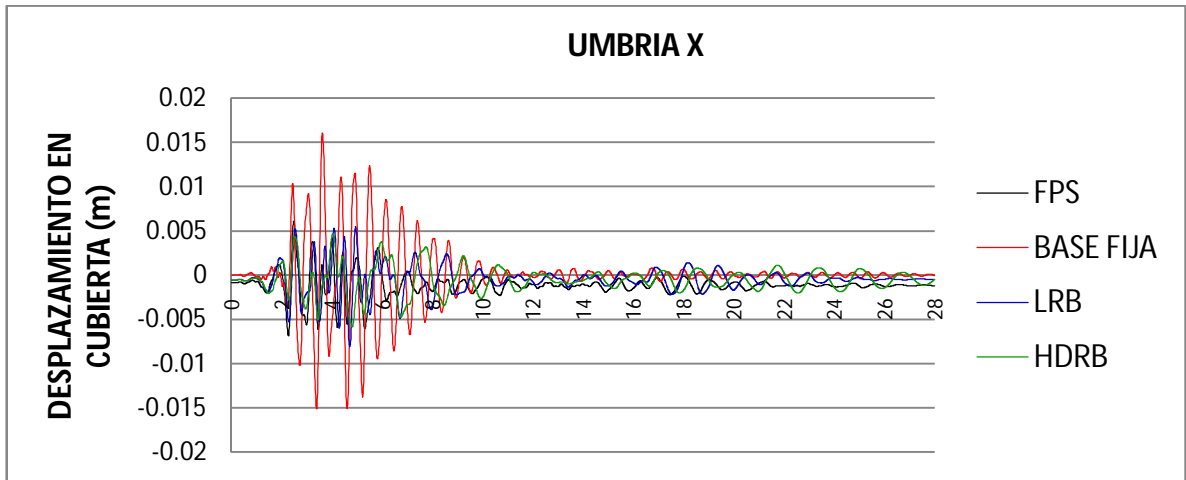


Figura 86: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Umbria X.

Al comparar la grafica del desplazamiento con la grafica de cortante, se aprecia que el sistema de aislación está sometido a una fuerza cortante baja y los grandes desplazamientos en la estructura con base fijase debe a que existe una fuerza cortante alta actuando.

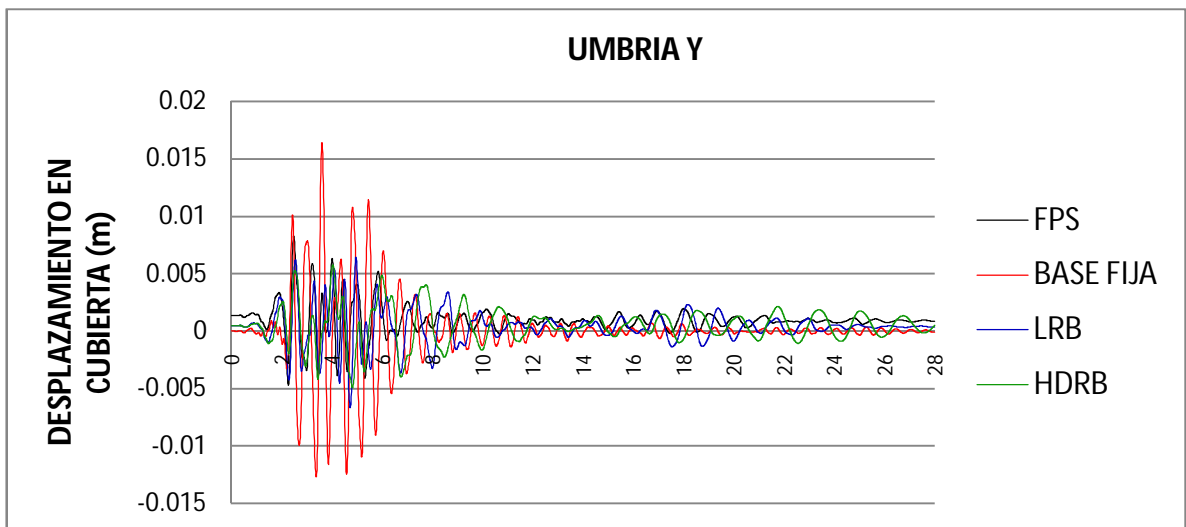


Figura 87: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Umbria Y.

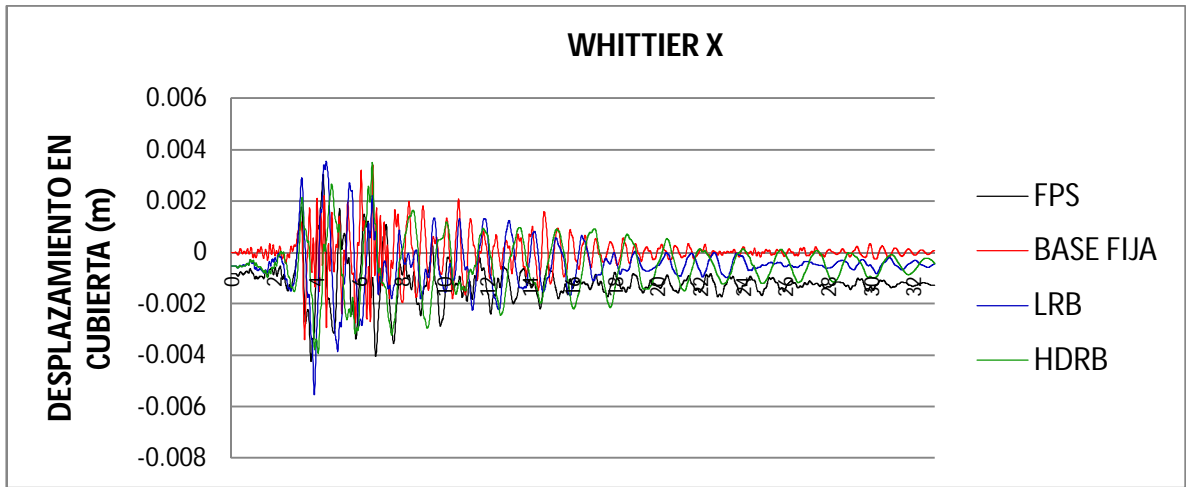


Figura 88: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para Whittier Y.

Se presenta un desajuste en los resultados iniciales ya que deberían empezar en cero; los desfases en el eje de desplazamientos se producen porque la fuerza cortante no logra desplazar lo suficiente al deslizador, se puede considerar que no se presenta movimiento.

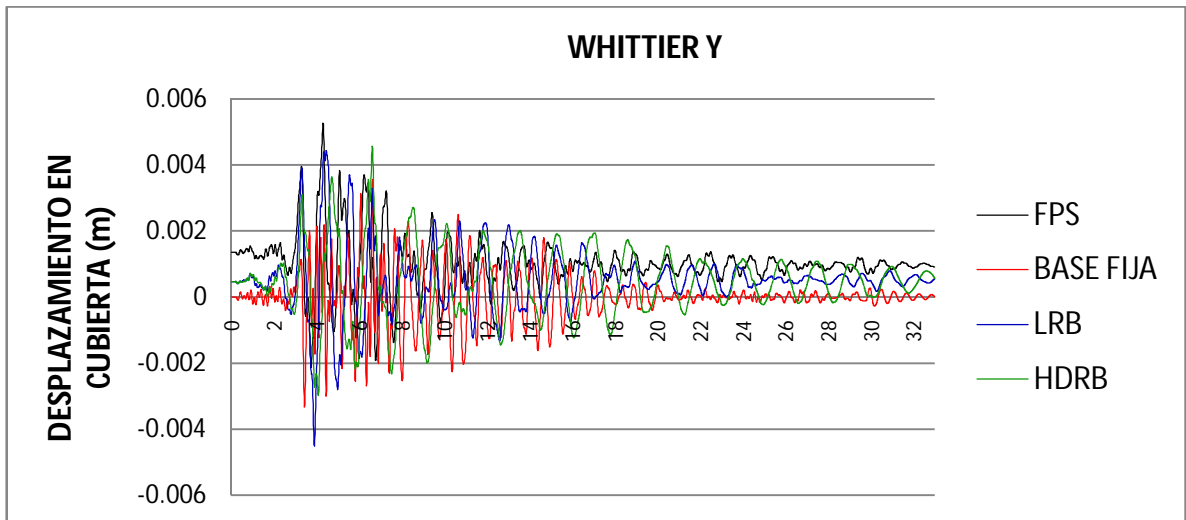
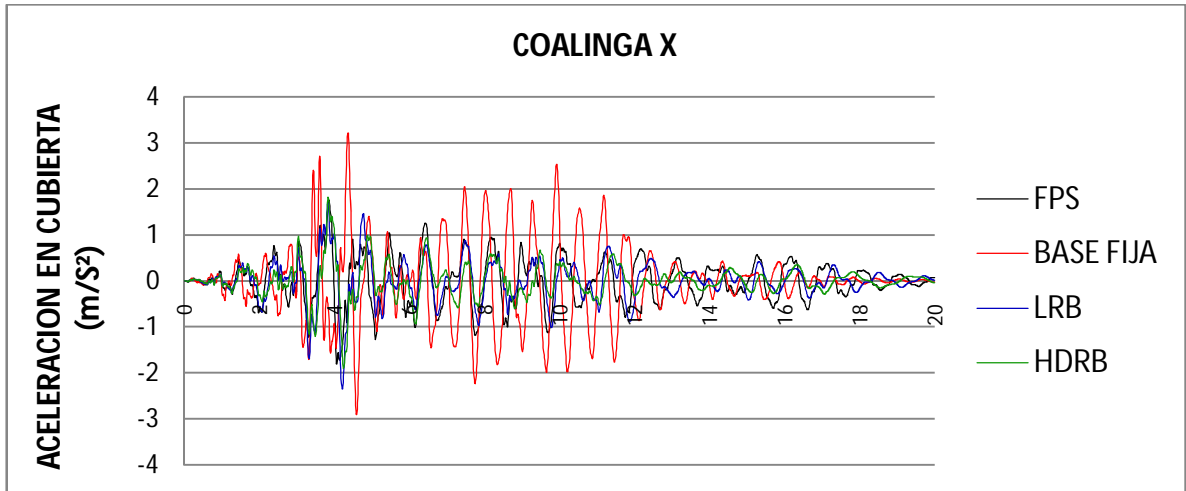


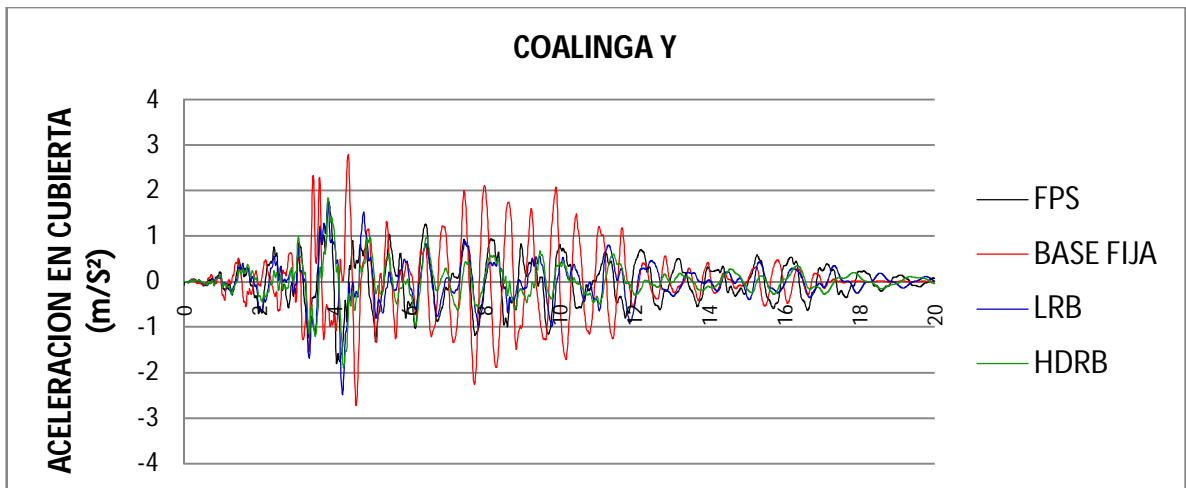
Figura 89: Desplazamiento en la cubierta Vs tiempo para whittier Y.

**12.1.3. Grafica aceleración en el nodo de control en la cubierta vs tiempo.**



**Figura 90: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Coalinga X.**

La aceleración de la cubierta se reduce significativamente y los dispositivos parecen tener una misma tendencia.



**Figura 91: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Coalinga Y.**

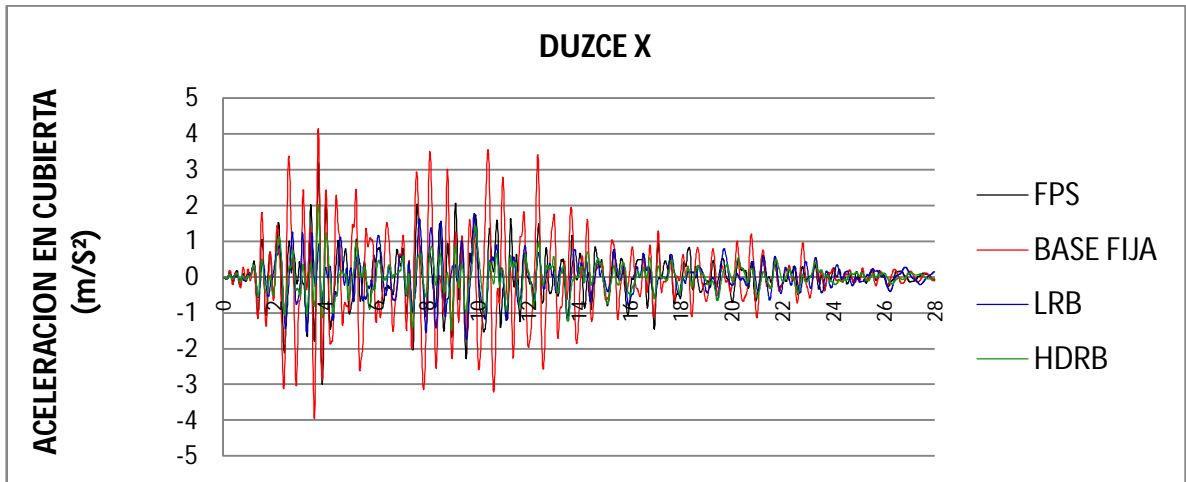


Figura 92: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Duzce X.

La aceleración de la cubierta se reduce significativamente y los dispositivos parecen tener una misma tendencia.

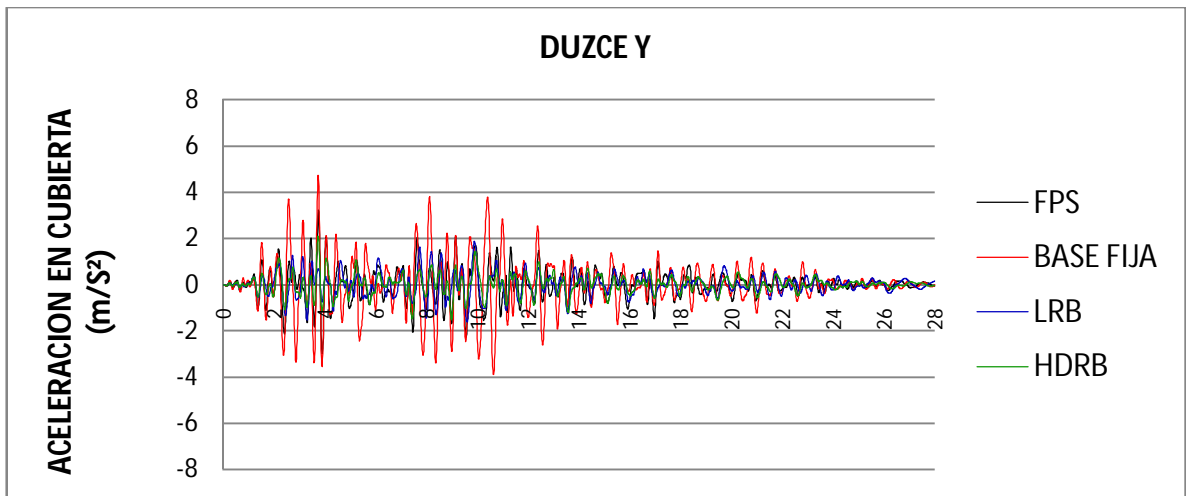


Figura 93: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Duzce Y.

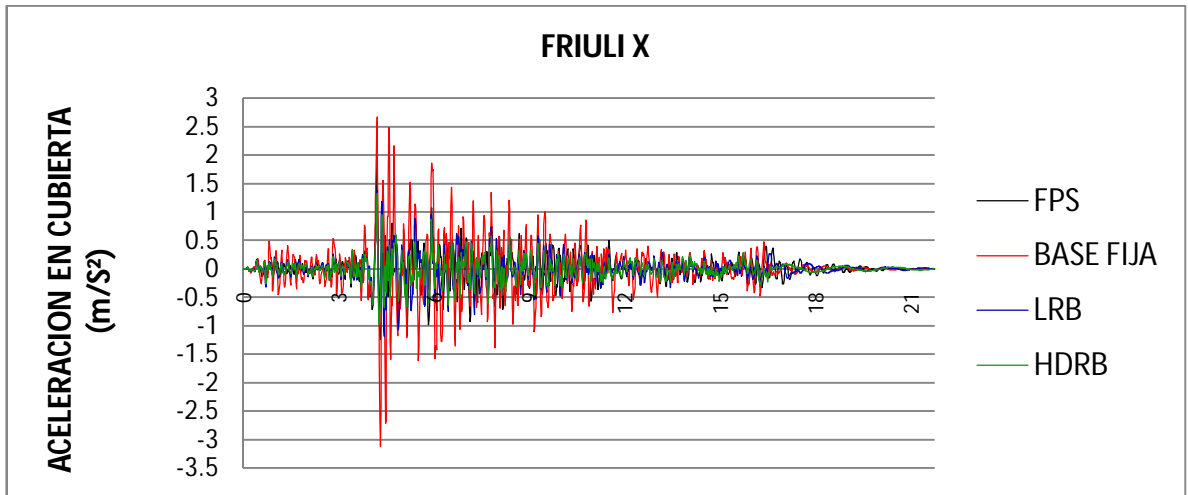


Figura 94: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Friuli X.

Se puede observar que los aisladores elastoméricos son los que reducen más las aceleraciones en la estructura.

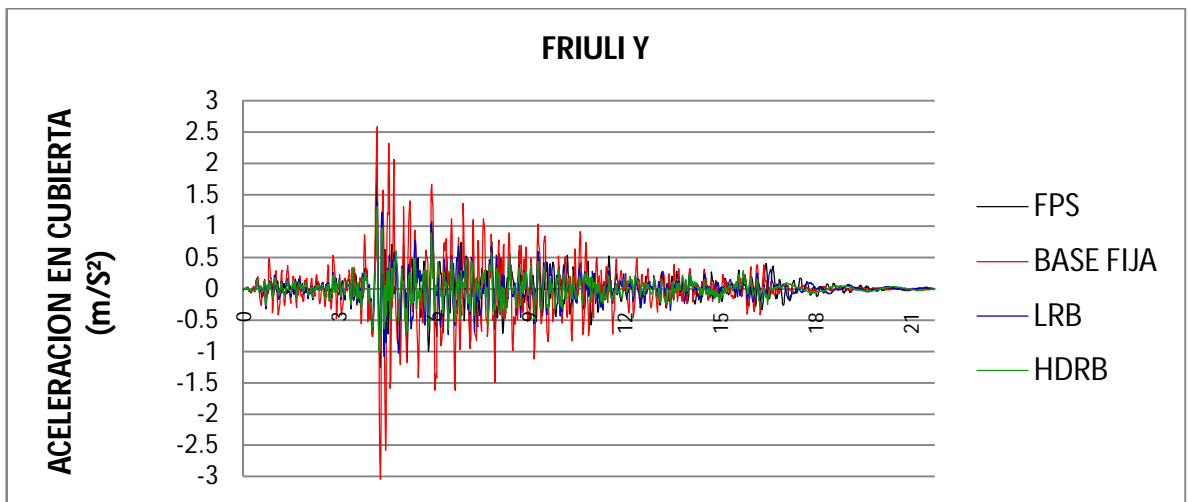


Figura 95: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Friuli Y

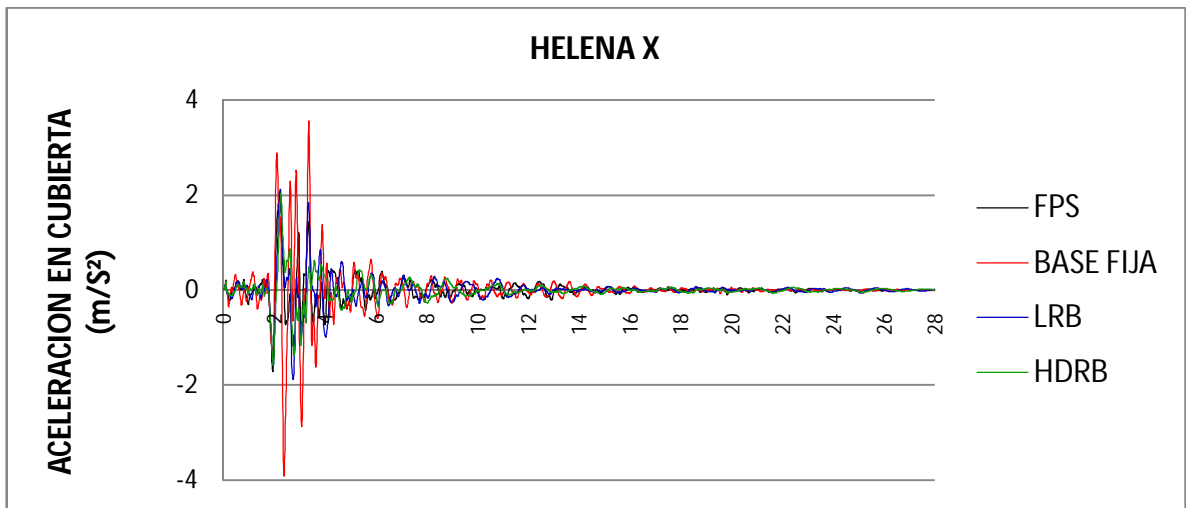


Figura 96: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Helena X

La aceleración de la cubierta se reduce significativamente en una dirección, los dispositivos parecen tener una misma tendencia

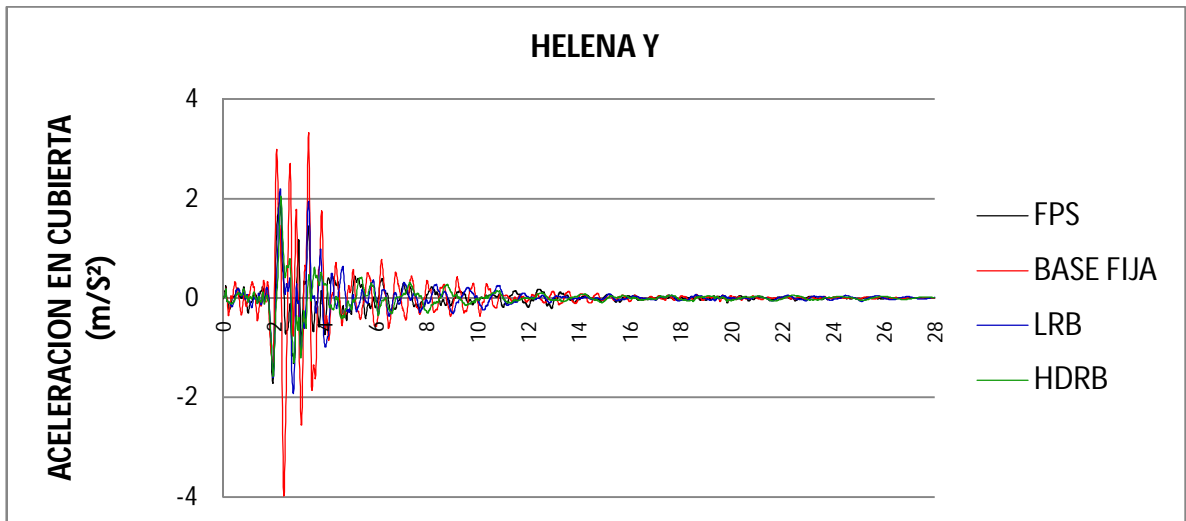


Figura 97: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Helena Y

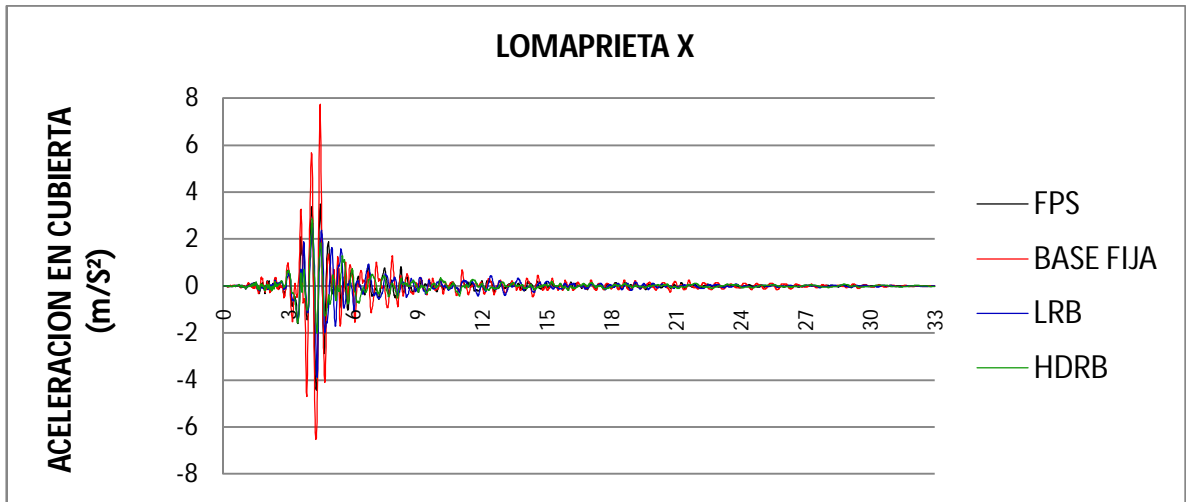


Figura 98: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Loma prieta X.

Nuevamente se observan grandes reducciones en las aceleraciones y al aislador HDRB como el de menor aceleración.

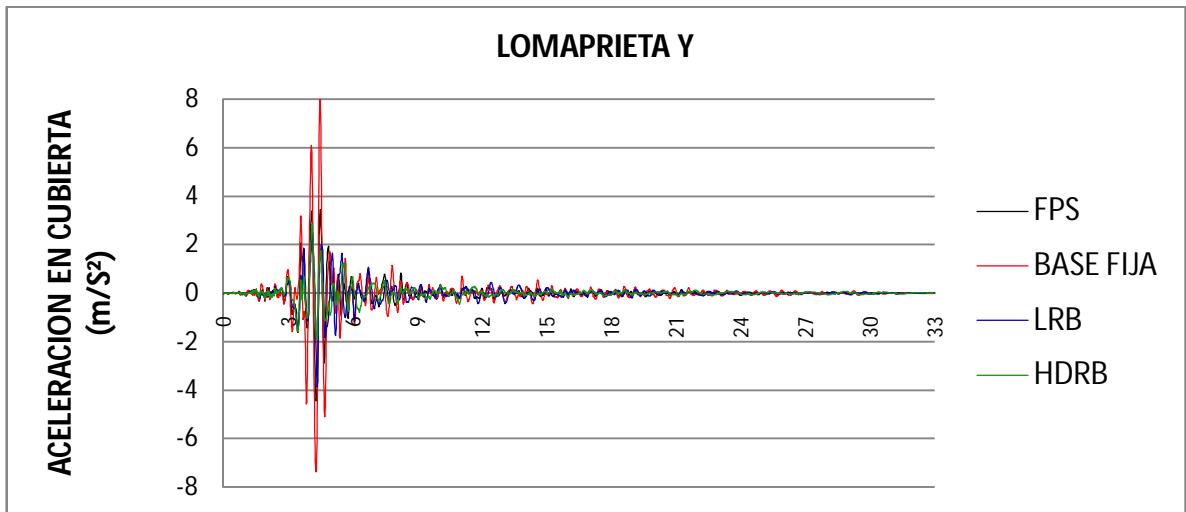


Figura 99: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Loma prieta Y.

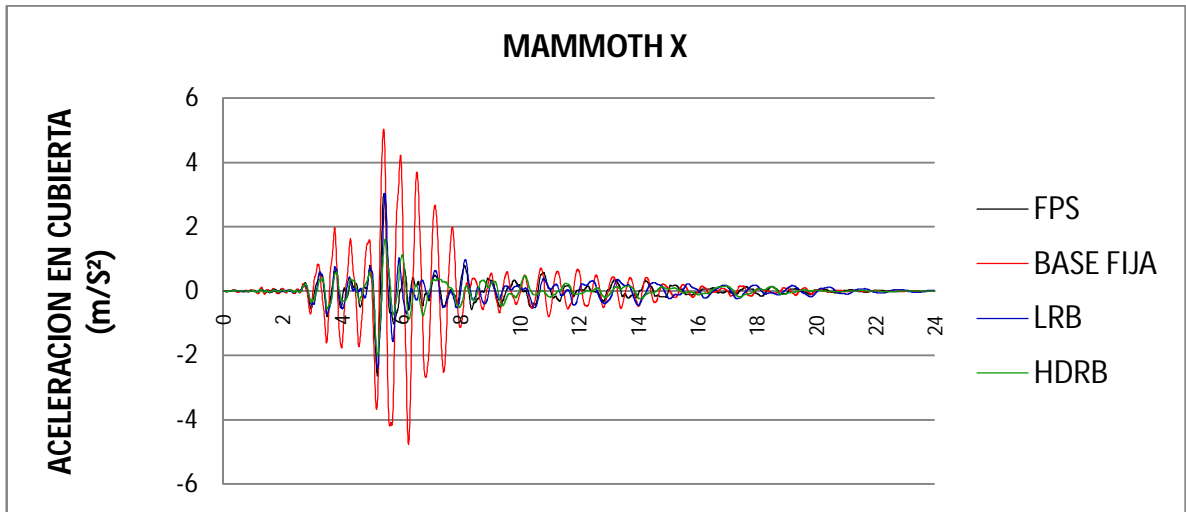


Figura 100: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Mammoth X.

Se aprecian reducciones en las aceleraciones y el aislador que reduce mas las aceleraciones es el HDRB.

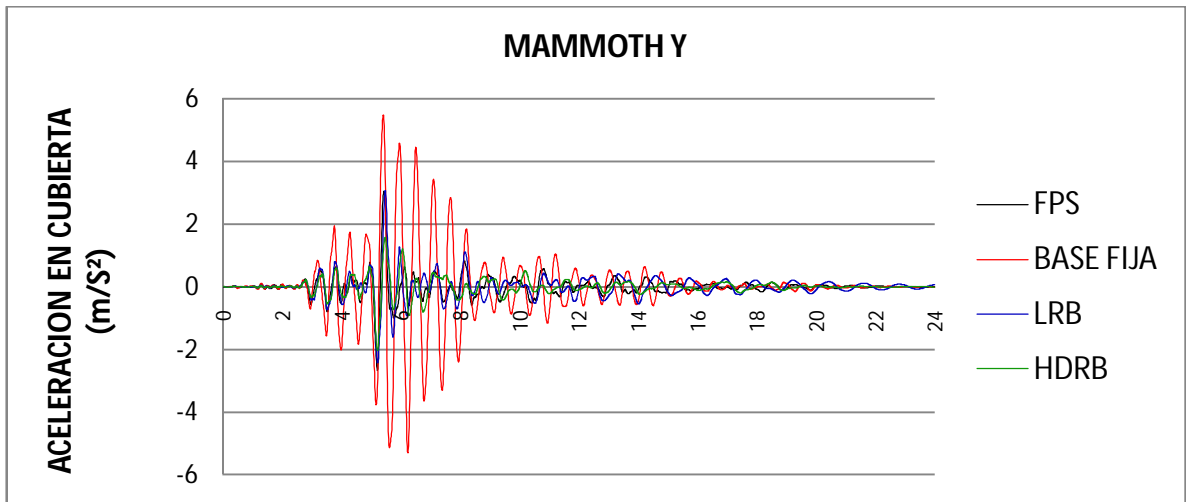


Figura 101: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Mammoth Y.

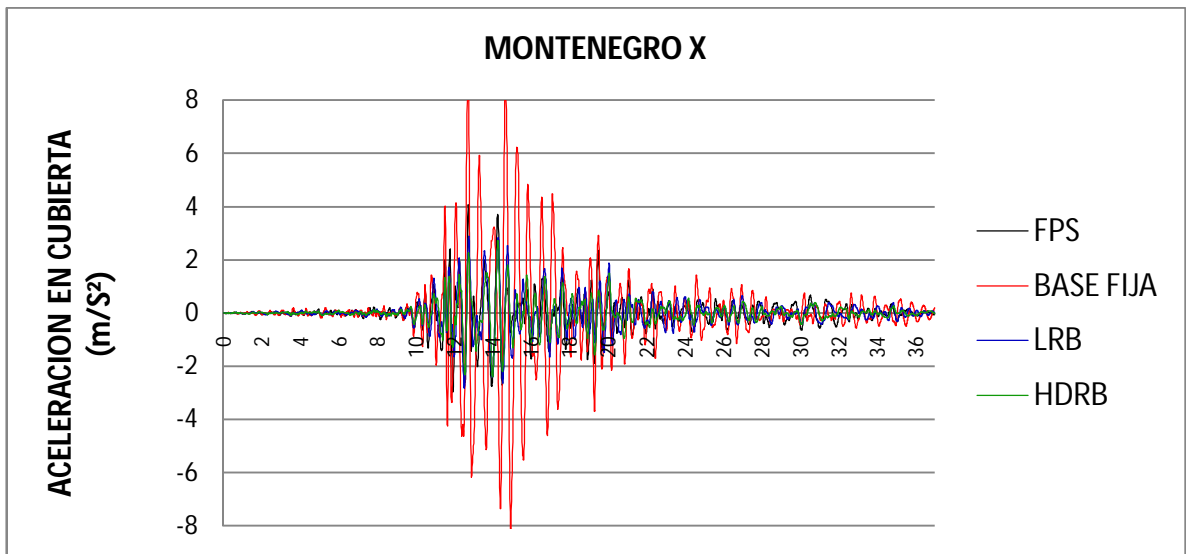


Figura 102: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Montenegro X.

Se presentan reducciones en la aceleración del nodo de control de un 50% aproximadamente.

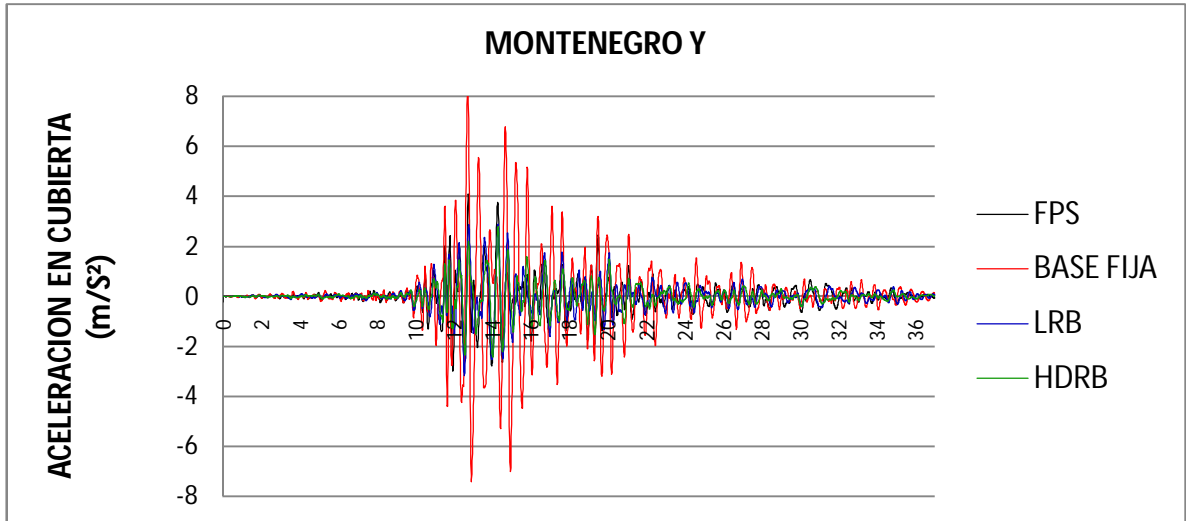


Figura 103: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Montenegro Y.

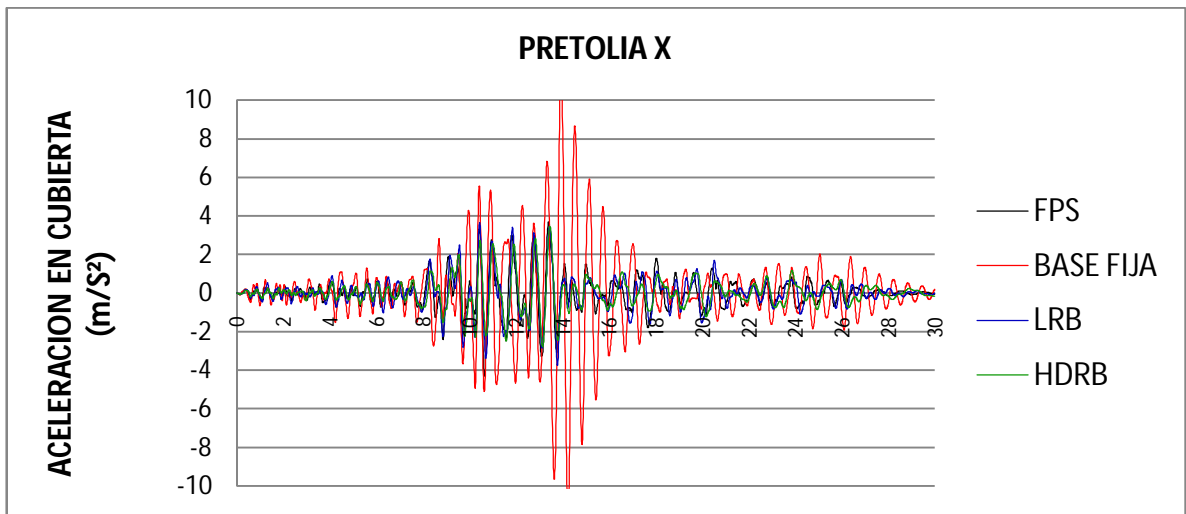


Figura 104: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Pretolia X.

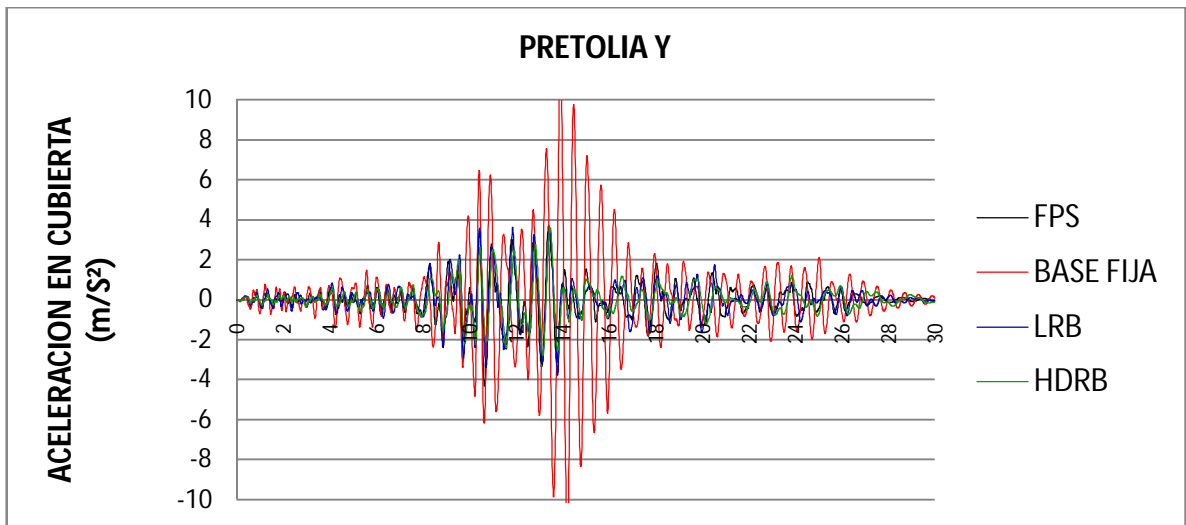


Figura 105: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Pretolia X.

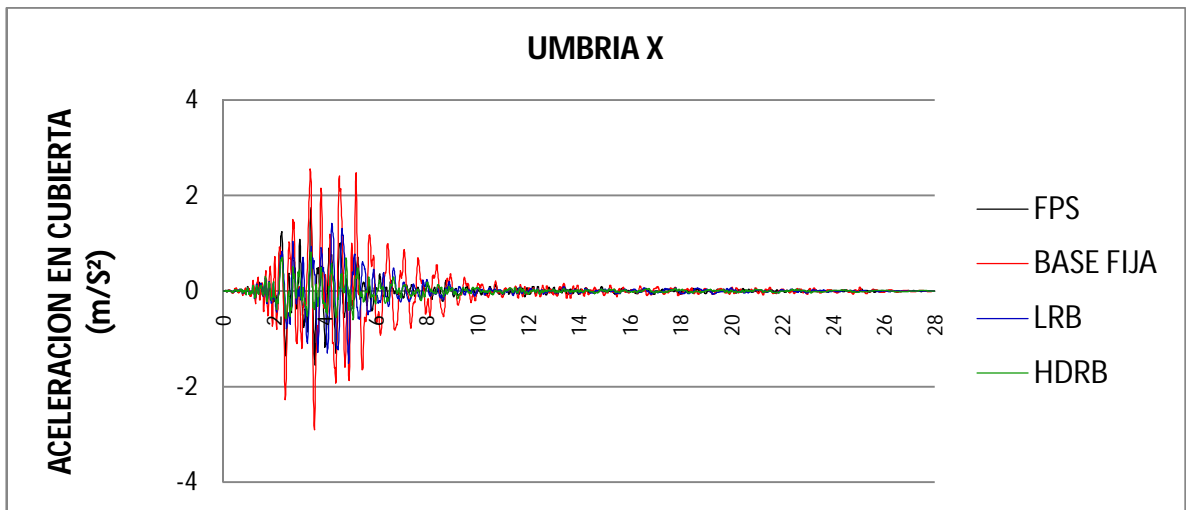


Figura 106: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Umbria X.

En sismos de bajas aceleraciones la reducción no es tan grande como en aquellos que inducen mayores a aceleraciones a la estructura sin embargo se presentan reducciones en las aceleraciones,

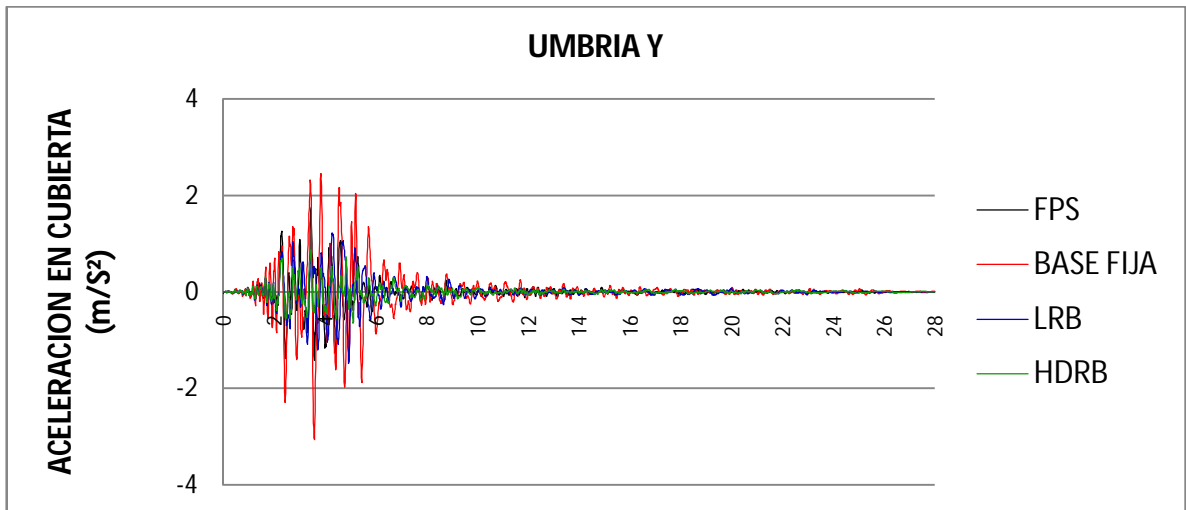


Figura 107: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Umbria X.

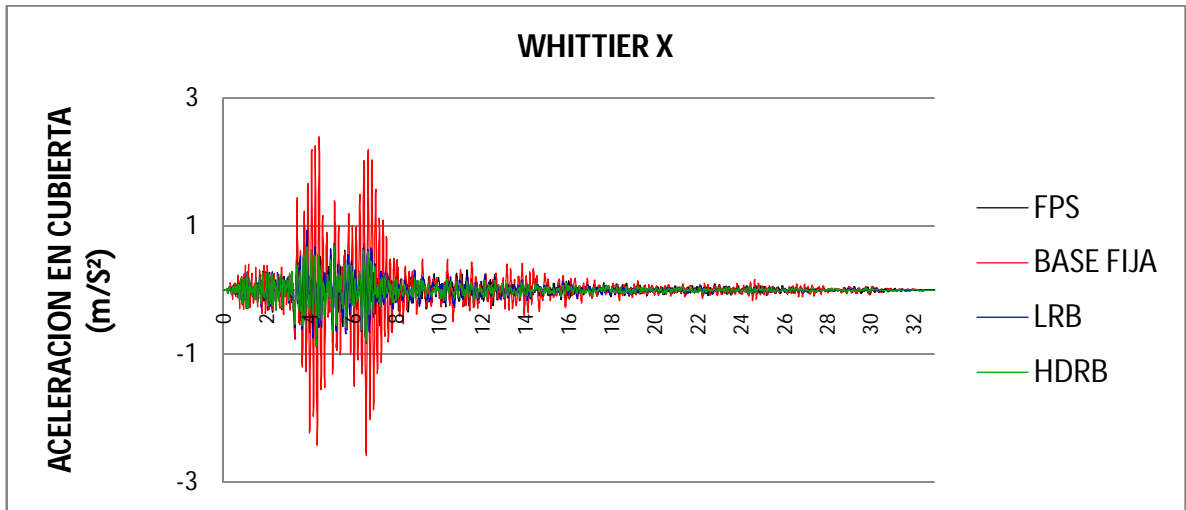


Figura 108: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Whittier X.

El aislador de alto amortiguamiento es el que reduce mas las aceleraciones para este caso de estudio.

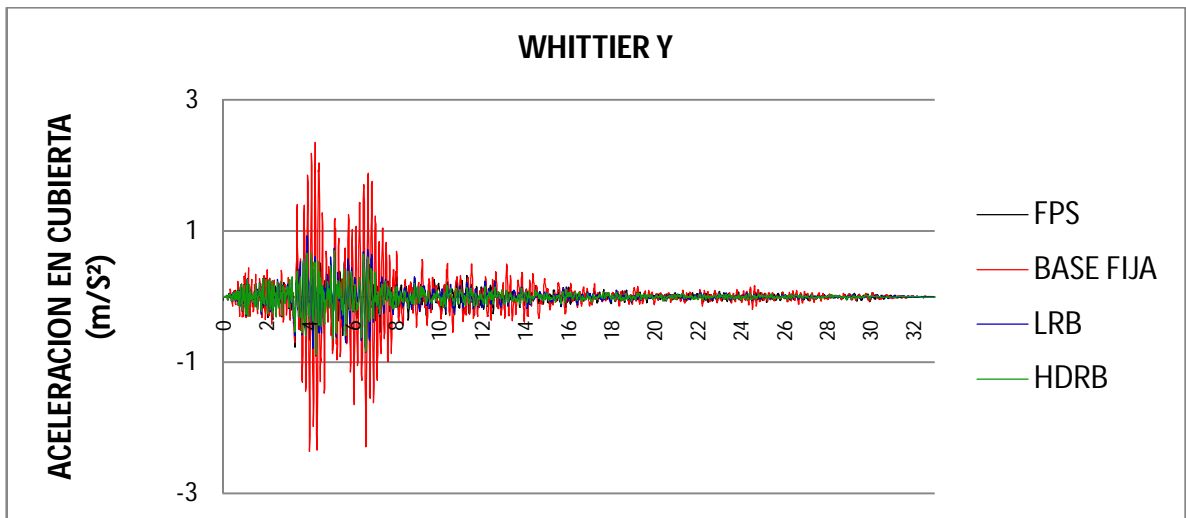


Figura 109: Aceleración en la cubierta Vs tiempo para Whittier Y.

12.1.4. Grafica desplazamientos de los nodos por piso vs tiempo.

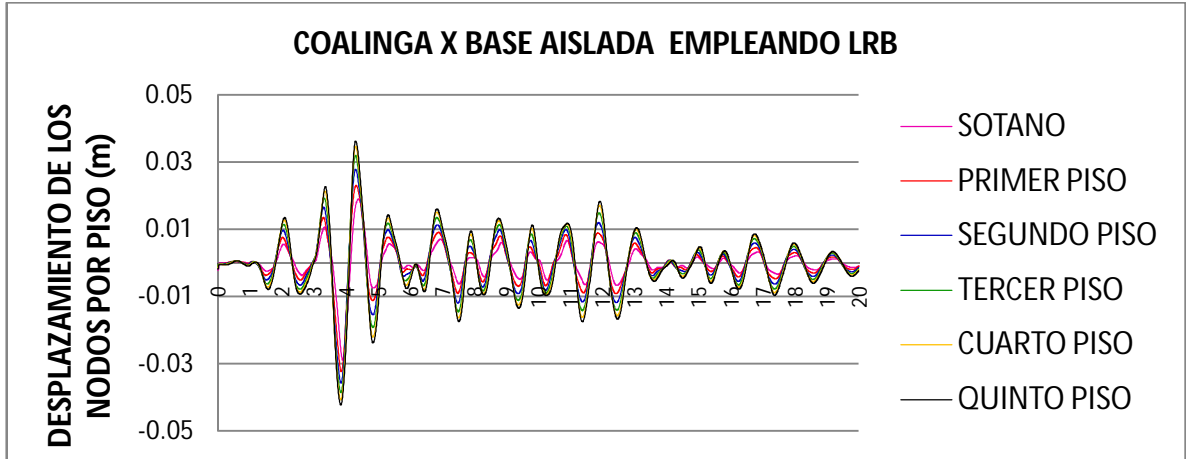


Figura 110: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical pasara LRB

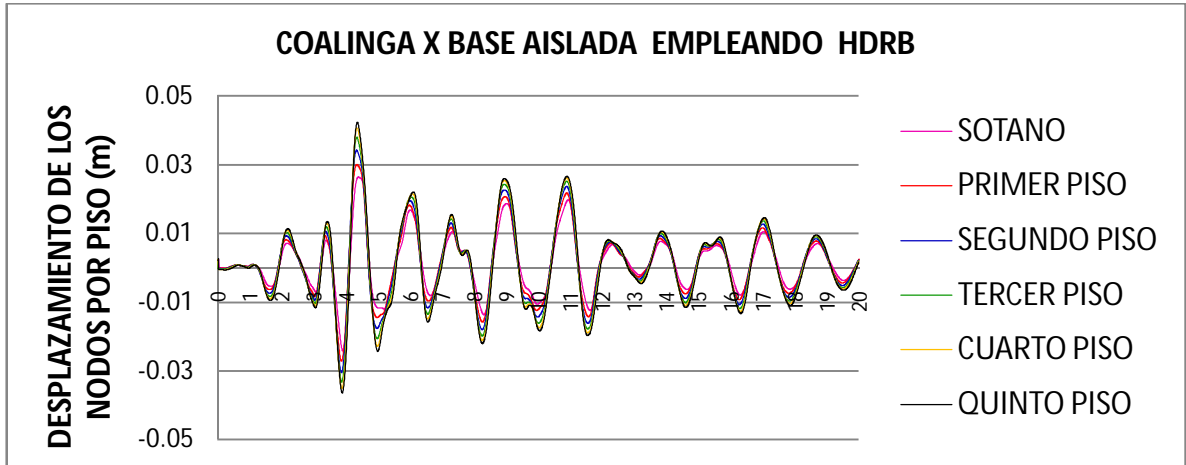


Figura 111: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical para HDRB.

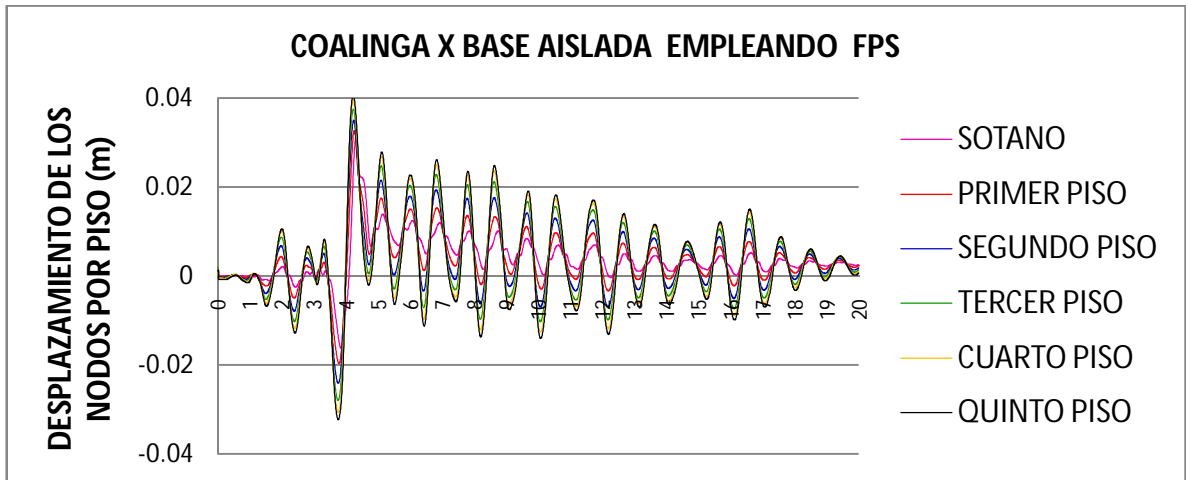


Figura 112: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical para FPS.

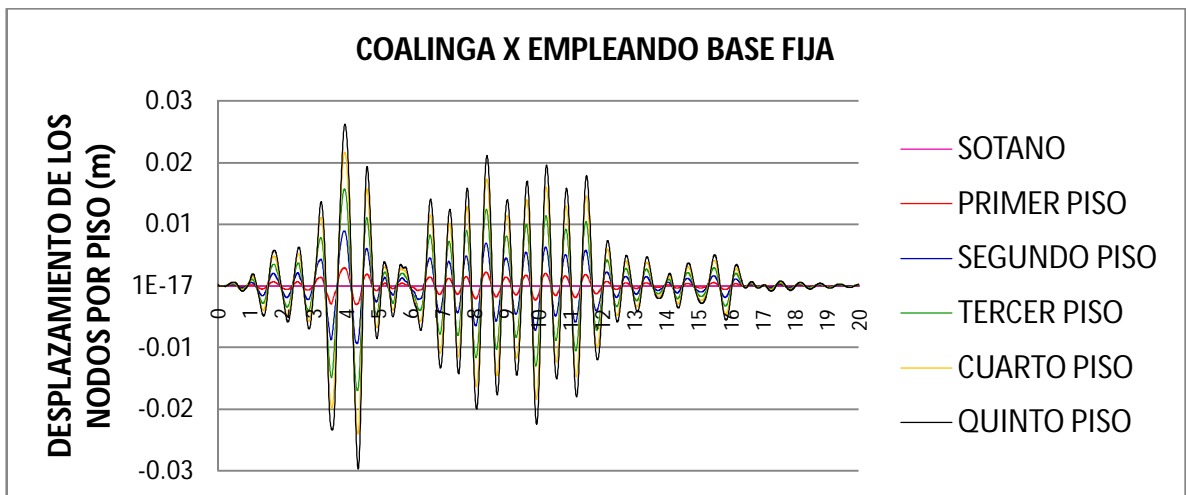


Figura 113: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical para base fija.

Se evidencia con estos gráficos que las derivas en una estructura con base fija son mayores que en una estructura con base aislada; entre los sistemas de aislación los elastoméricos controlan más las derivas que los de fricción.

También se puede apreciar que la estructura se comporta como un cuerpo rígido sobre el sistema de aislación.

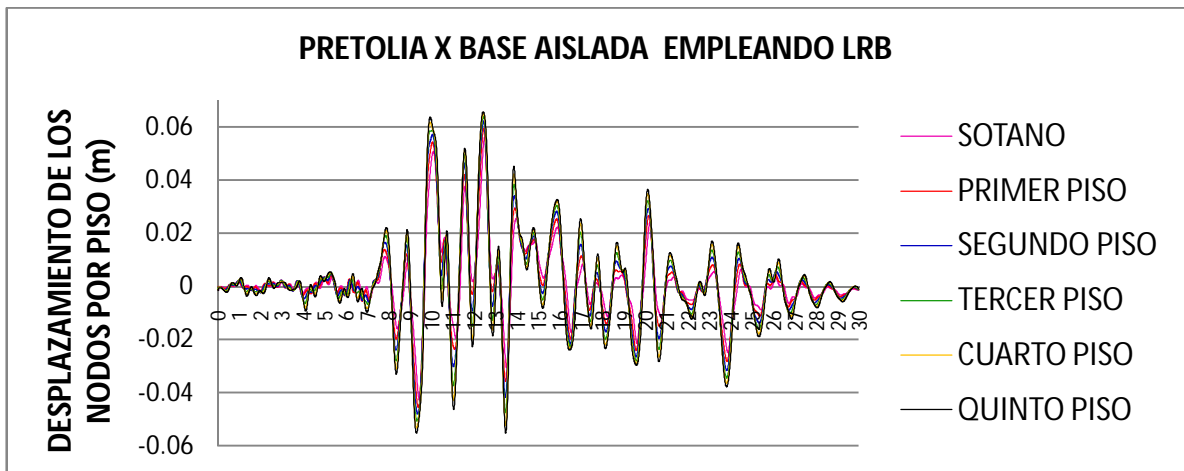


Figura 114: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical LRB

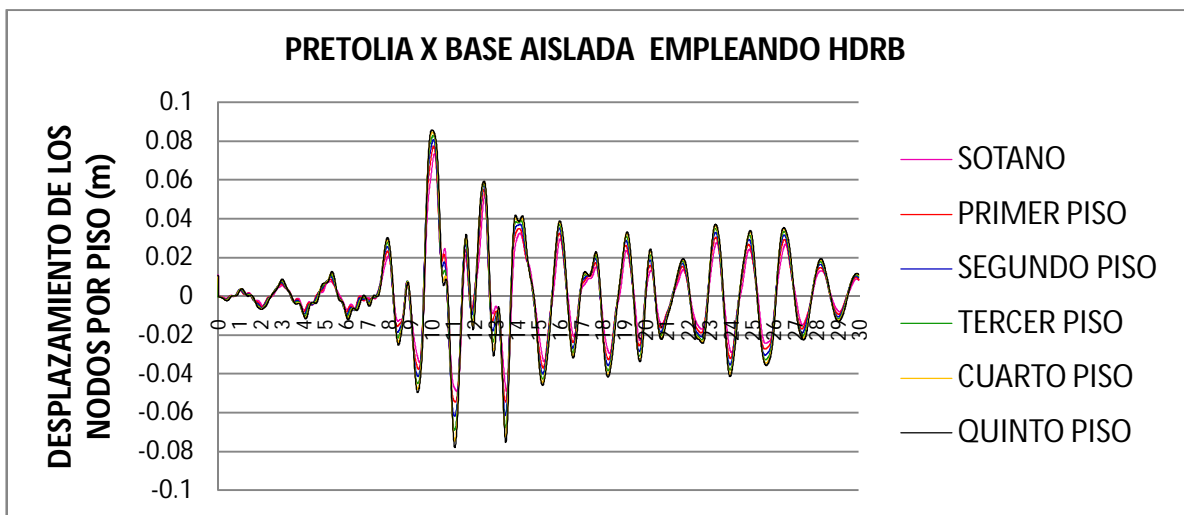


Figura 115: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical HDRB

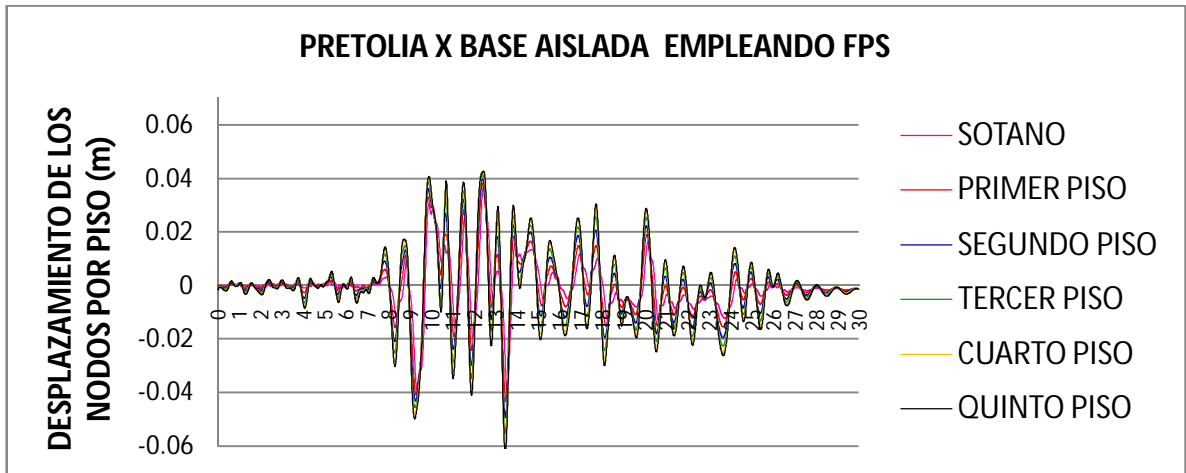


Figura 116: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical FPS

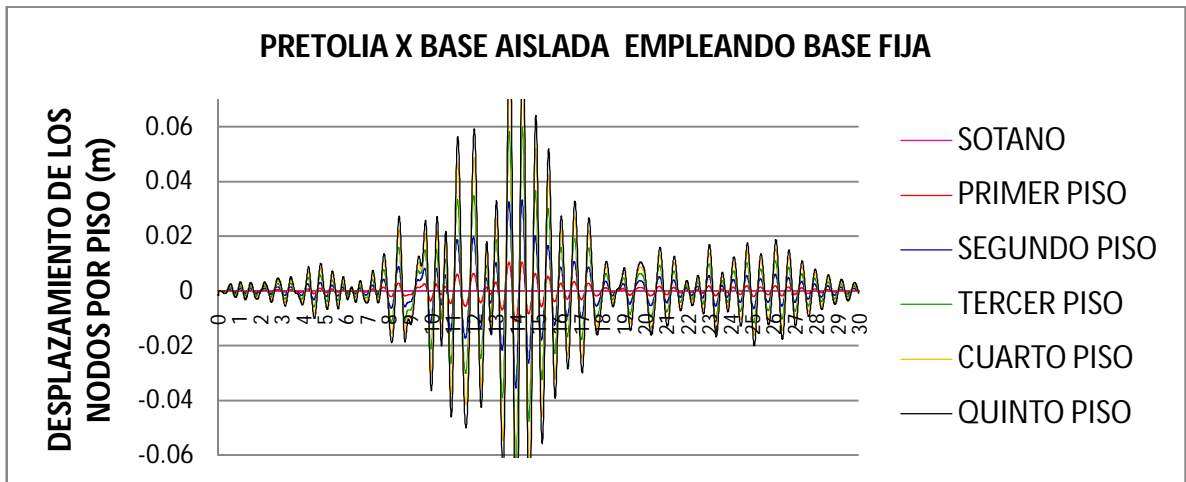


Figura 117: Desplazamientos de los nodos sobre un mismo eje vertical base fija.

Nuevamente podemos ver los desplazamientos correspondientes a los nodos de una columna y su variación debida al sismo para comparar la base fija con los diferentes sistemas de aislación y observar que con un sistema de aislación se reducen las derivas. En estas graficas también se puede observar con un poco mas de detalle ya que el cortante basal que actúa en esta sollicitación es más alto, haciendo más evidente la distancia a puntos

### 12.1.5. Grafica cortante en la base vs desplazamiento.

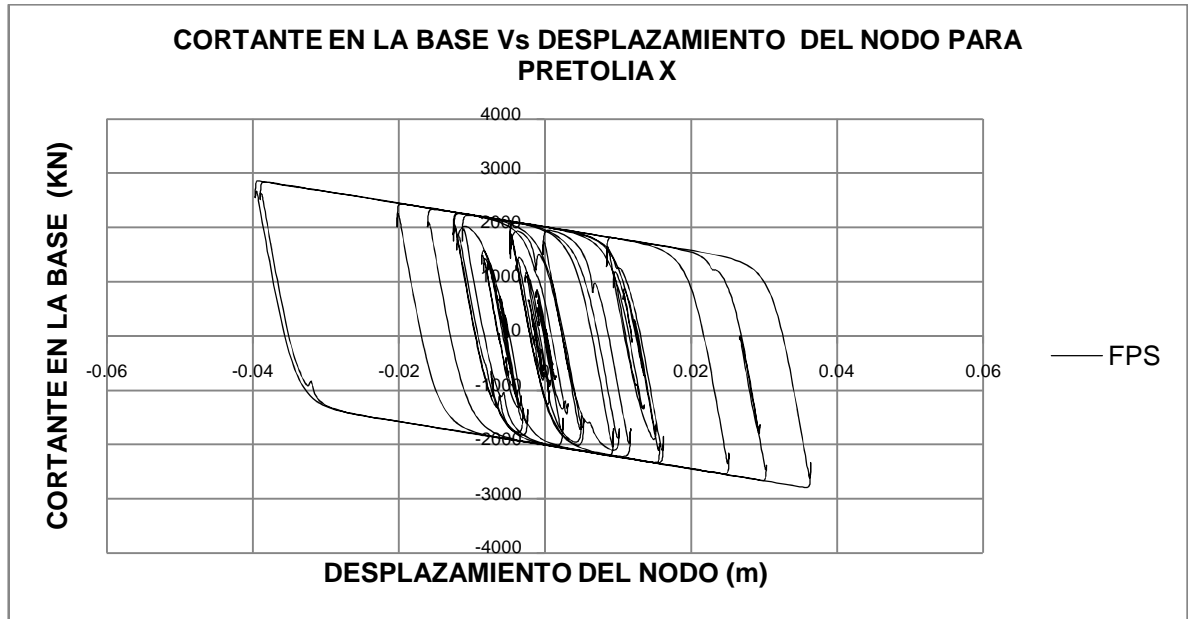


Figura 118: Cortante en la base Vs Desplazamiento de un nodo en el plano de aislación. FPS.

La variación de la fuerza cortante genera estos trazos que representan el desplazamiento del nodo estudiado durante el sismo, este comportamiento está coherente con el definido en la teoría bilineal.

Se observa que el comportamiento del aislador es no lineal.

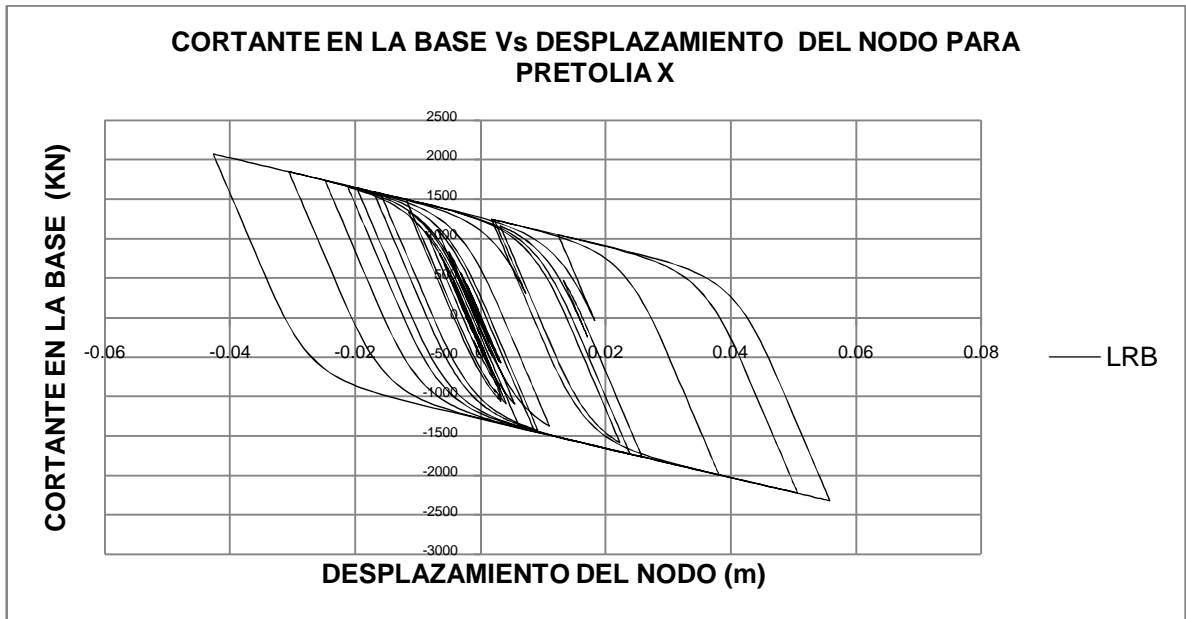
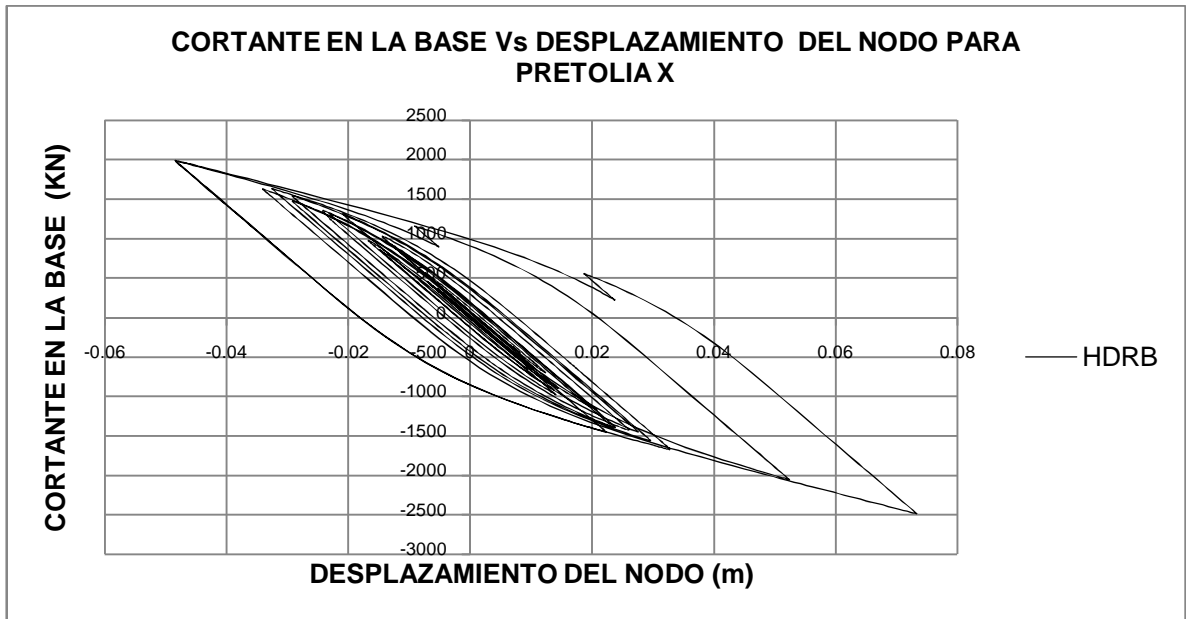


Figura 119: Cortante en la base Vs Desplazamiento de un nodo en el plano de aislación LRB.

La variación de la fuerza cortante genera estos trazos que representan el desplazamiento del nodo estudiado durante el sismo, este comportamiento está coherente con el definido en la teoría bilineal para el LEAD RUBER BEARING.

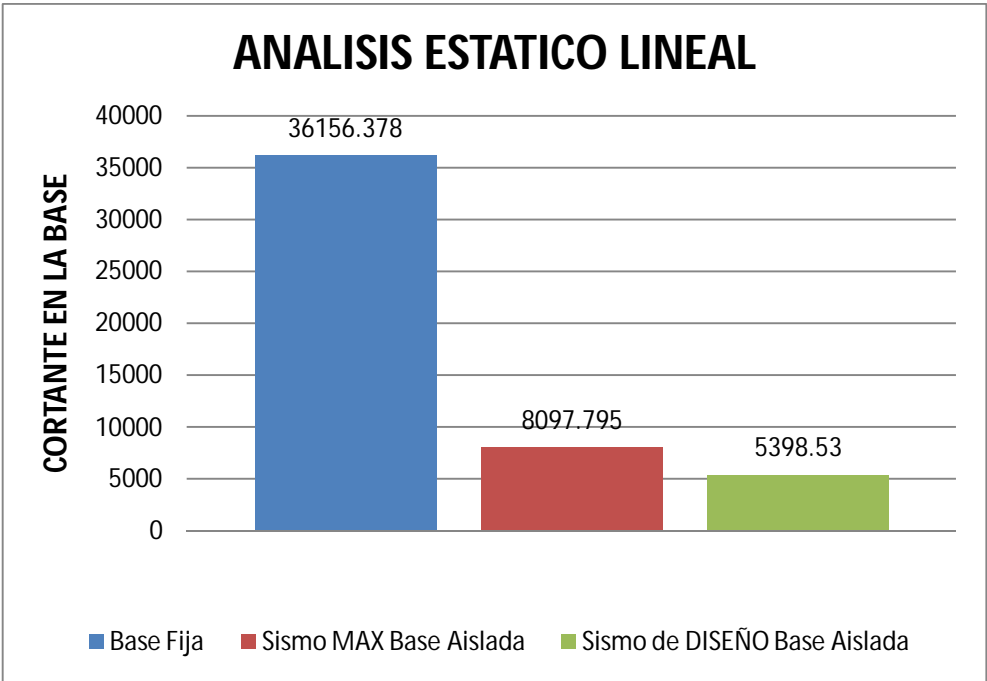
Se observa que el comportamiento de este tipo de dispositivo es no lineal.



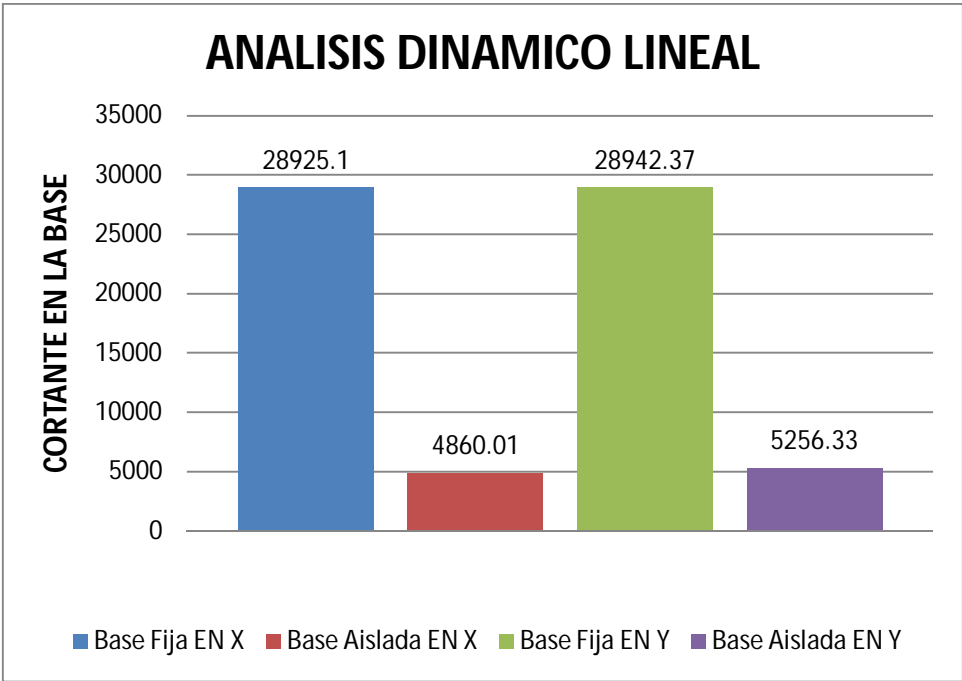
**Figura 120: Cortante en la base Vs Desplazamiento de un nodo en el plano de aislación HDRB.**

La variación de la fuerza cortante genera estos trazos que representan el desplazamiento del nodo estudiado durante el sismo, este comportamiento está coherente con el definido en la teoría bilineal para el HDRB.

Se observa que el comportamiento de este tipo de dispositivo es no lineal, sin embargo este dispositivo se podría llegar a modelar definiéndolo como un aislador de comportamiento lineal.



**Figura 121: Comparación para el análisis estático lineal. Modelo 1**



**Figura 122: comparación para el análisis dinámico modal espectral. Modelo 1**

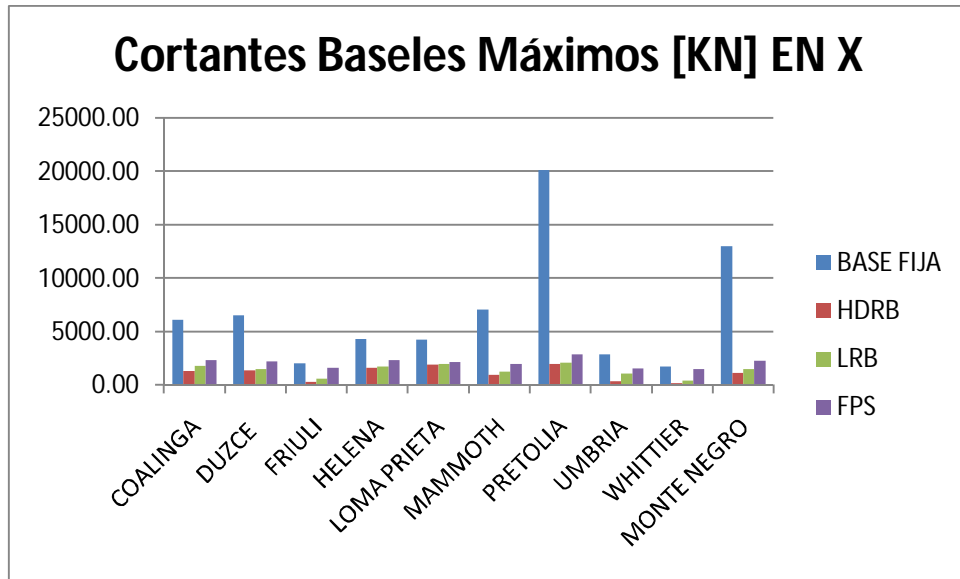


Figura 123: Cortante basal para base fija y empleando aisladores. Modelo 1

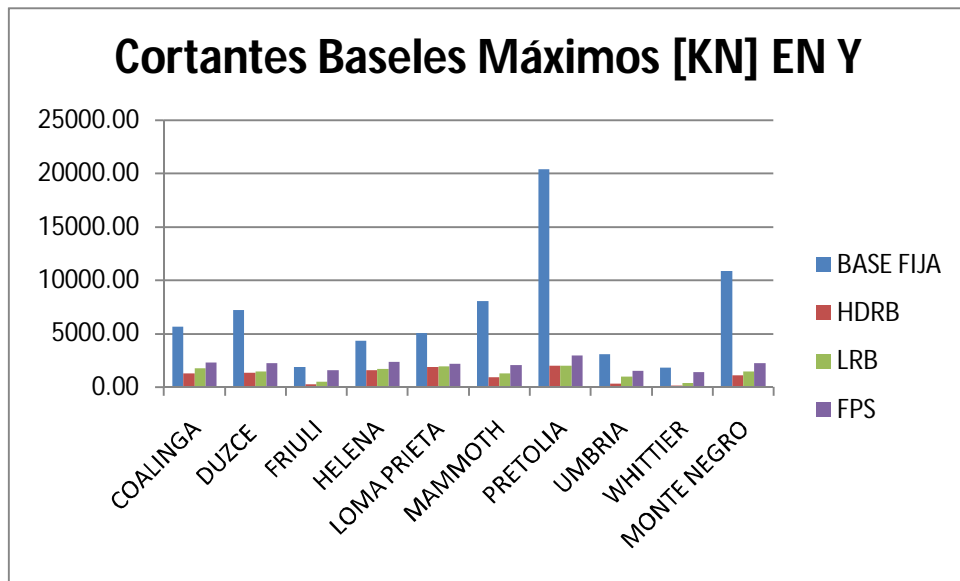


Figura 124: Cortante basal para base fija y empleando aisladores. Modelo 1

## 12.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS MODELO 2.

Reacciones en la base y reducciones empleando diferentes tipos de aisladores.							
Caso de carga	BASE FIJA	HDRB	% HDRB	LRB	% LRB	FPS	% FPS
	F (KN)	FX (KN)		FX (KN)			
Coalinga X	6773.19	2042.17	0.70	2737.61	0.60	2361.52	0.65
Coalinga X	-9649.26	-2163.21	0.78	-2337.36	0.76	-2157.44	0.78
Coalinga Y	8074.35	2029.03	0.75	3801.87	0.53	2362.42	0.71
Coalinga Y	-9905.47	-2146.35	0.78	-3808.17	0.62	-2156.53	0.78
Duzce X	25708.20	1944.75	0.92	2170.90	0.92	2160.09	0.92
Duzce X	-24257.61	-2189.98	0.91	-2170.45	0.91	-1960.60	0.92
Duzce Y	32255.24	1918.84	0.94	2561.99	0.92	2158.01	0.93
Duzce Y	-33395.77	-2169.25	0.94	-2432.76	0.93	-1942.41	0.94
Friuli X	6303.23	441.24	0.93	846.31	0.87	1305.37	0.79
Friuli X	-6377.43	-489.96	0.92	-900.54	0.86	-1228.45	0.81
Friuli Y	7821.17	443.39	0.94	897.28	0.89	1336.31	0.83
Friuli Y	-7498.13	-487.76	0.93	-937.72	0.87	-1268.31	0.83
Helena X	16376.08	2480.93	0.85	2639.51	0.84	2394.79	0.85
Helena X	-15175.80	-2412.56	0.84	-2393.89	0.84	-1985.52	0.87
Helena Y	14500.06	2458.95	0.83	3403.80	0.77	2382.10	0.84
Helena Y	-12491.76	-2413.55	0.81	-3988.84	0.68	-2009.13	0.84
Lomapieta X	39194.47	2728.94	0.93	2714.92	0.93	2248.56	0.94
Lomapieta X	-37497.32	-2193.80	0.94	-2246.39	0.94	-1991.29	0.95
Lomapieta Y	29924.55	2726.44	0.91	4019.20	0.87	2255.99	0.92
Lomapieta Y	-28821.55	-2181.32	0.92	-3455.17	0.88	-1988.24	0.93
Mammoth X	13208.66	1545.46	0.88	2042.04	0.85	2018.11	0.85
Mammoth X	-15073.84	-1722.58	0.89	-1937.90	0.87	-1873.43	0.88
Mammoth Y	29924.55	1492.20	0.95	2188.43	0.93	2004.64	0.93
Mammoth Y	-28821.55	-1728.92	0.94	-2092.41	0.93	-1867.97	0.94
Pretolia X	26956.80	3012.36	0.89	3102.88	0.88	2798.26	0.90
Pretolia X	-18754.70	-3539.41	0.81	-3147.28	0.83	-2634.58	0.86
Pretolia Y	26573.11	2991.18	0.89	4379.45	0.84	2785.68	0.90
Pretolia Y	-16429.39	-3552.72	0.78	-5753.29	0.65	-2700.55	0.84
Umbria X	12521.35	568.15	0.95	1133.82	0.91	1309.67	0.90
Umbria X	-12061.00	-593.78	0.95	-1304.88	0.89	-1408.34	0.88
Umbria Y	8012.65	570.55	0.93	1352.29	0.83	1308.33	0.84
Umbria Y	-7703.92	-588.00	0.92	-1424.77	0.82	-1405.63	0.82
Whittier X	4870.02	249.91	0.95	749.43	0.85	1021.57	0.79
Whittier X	-5006.27	-278.45	0.94	-899.55	0.82	-924.80	0.82
Whittier Y	4787.19	260.02	0.95	753.10	0.84	1044.86	0.78
Whittier Y	-5318.91	-327.78	0.94	-920.30	0.83	-937.79	0.82
Montenegro X	24098.61	1582.42	0.93	2121.64	0.91	1906.96	0.92
Montenegro X	-22566.27	-1886.31	0.92	-2295.86	0.90	-2248.48	0.90
Montenegro Y	29136.85	1557.07	0.95	2496.72	0.91	1910.62	0.93
Montenegro Y	-29778.33	-1857.66	0.94	-2733.24	0.91	-2242.99	0.92

Tabla 51: Reducciones en fuerzas cortantes empleando aisladores de base. Modelo 2

### 12.2.1. Graficas de cortante basal Vs tiempo.

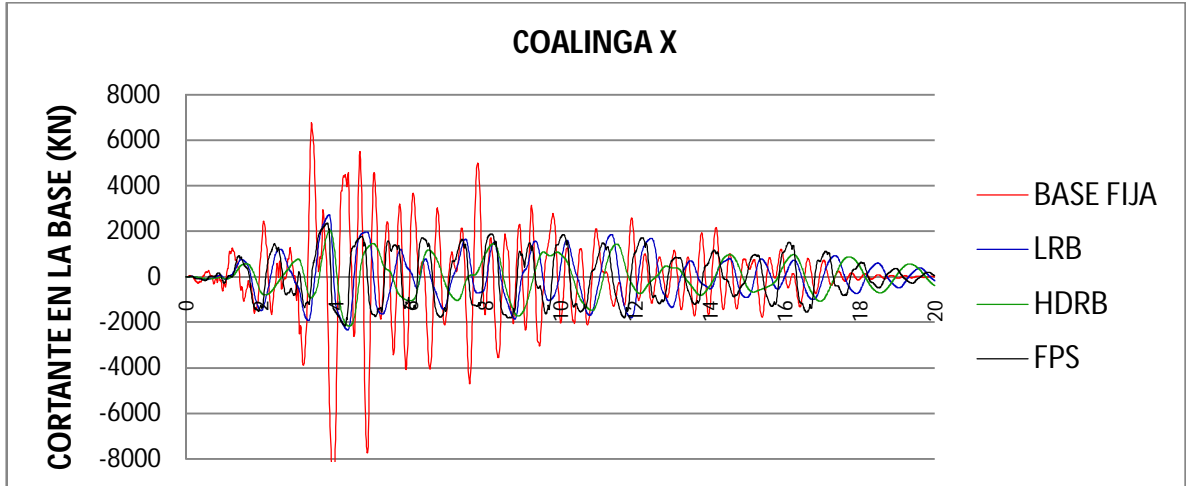


Figura 125: Cortante basal Vs tiempo Coalinga X modelo 2

Se puede observar en la grafica que el cortante basal para una estructura con base fija es mayor que para una estructura aislada de su base, también las diferencias entre los aisladores son evidentes y serán el motivo de análisis.

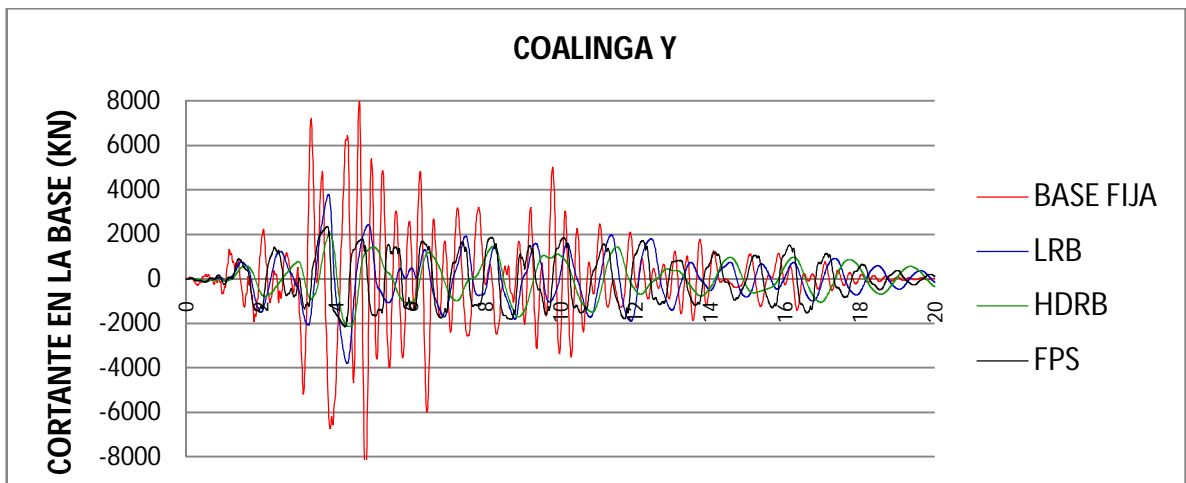


Figura 126: Cortante basal Vs tiempo Coalinga Y modelo 2

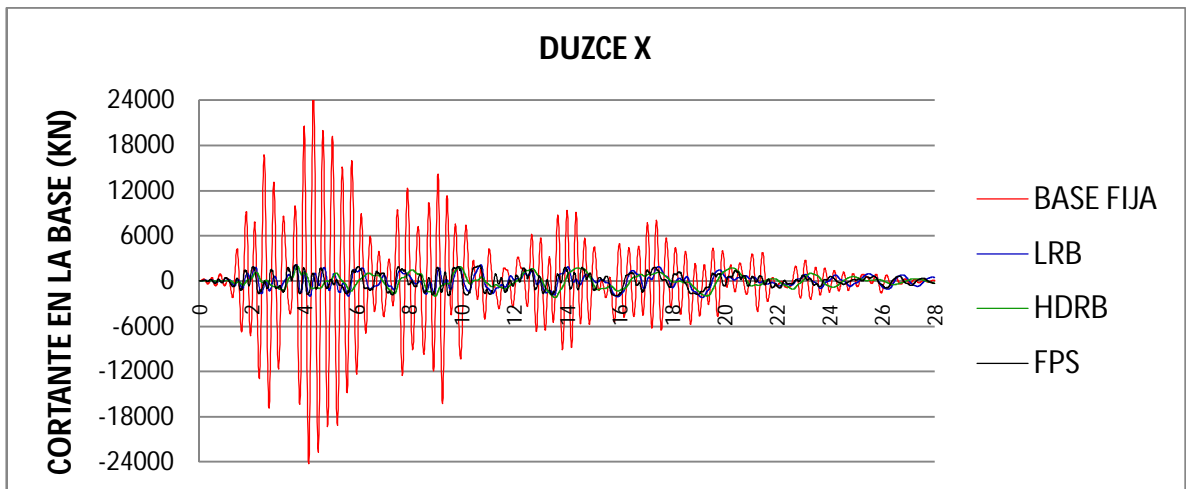


Figura 127: Cortante basal Vs tiempo Duzce X modelo 2

Las reducciones de la fuerza cortante implican que el sistema cumple con los objetivos de control estructural ampliamente.

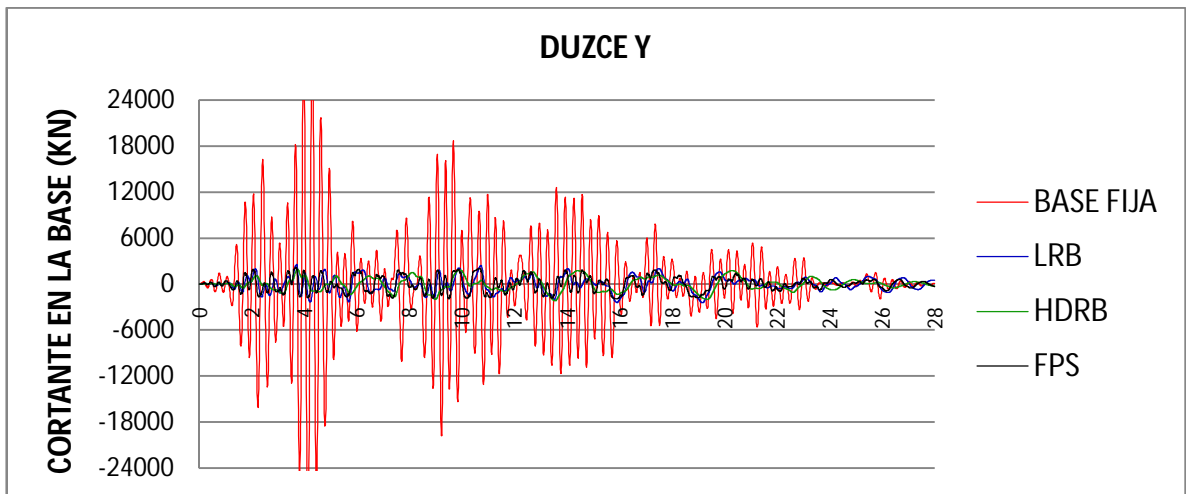


Figura 128: Cortante basal Vs tiempo Duzce Y. modelo 2

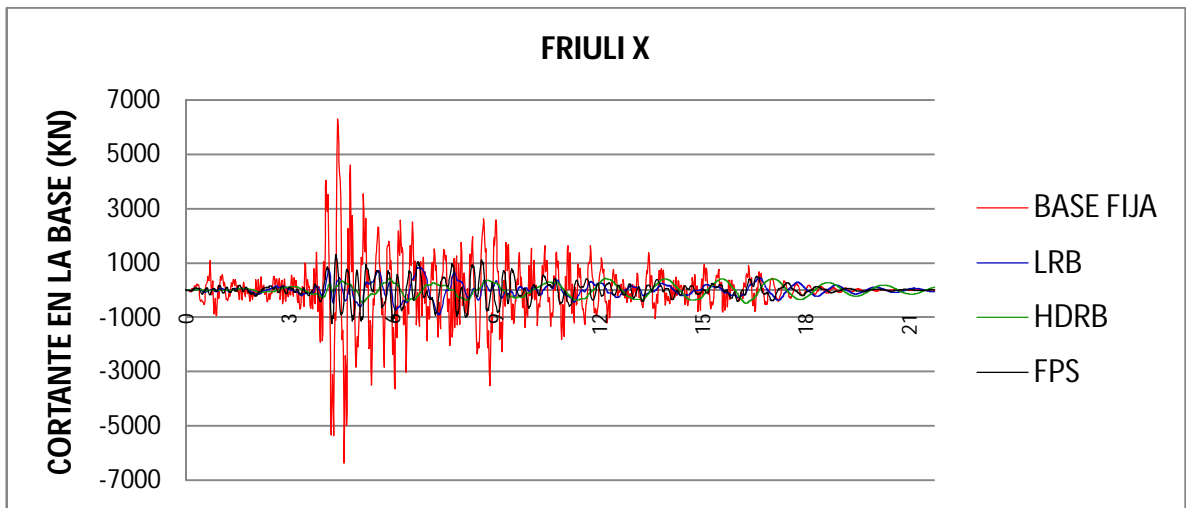


Figura 129: Cortante basal Vs tiempo Friuli X. modelo 2

Las reducciones de la fuerza cortante implican que el sistema cumple con los objetivos de control estructural ampliamente.

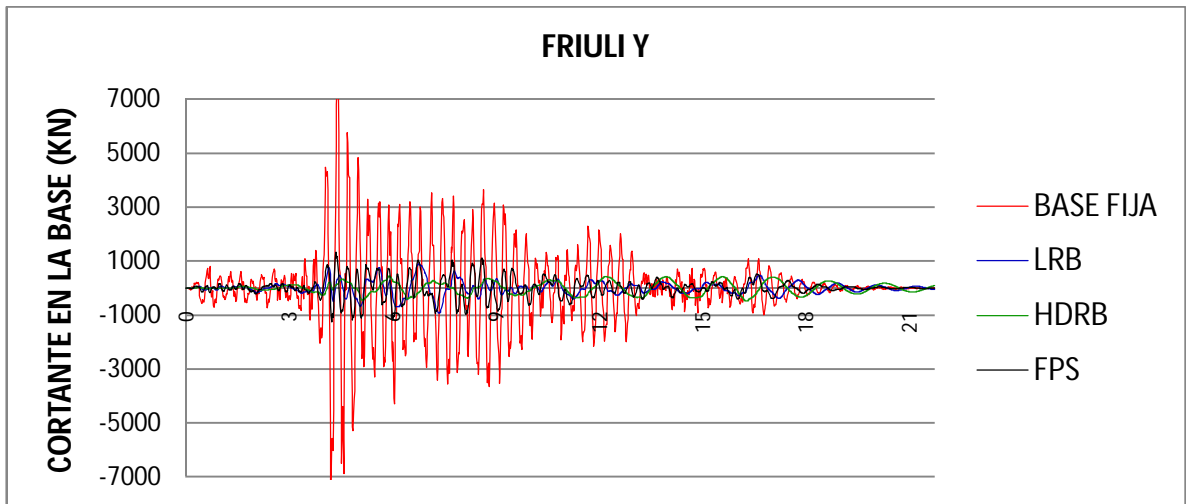


Figura 130: Cortante basal Vs tiempo Friuli Y. modelo 2

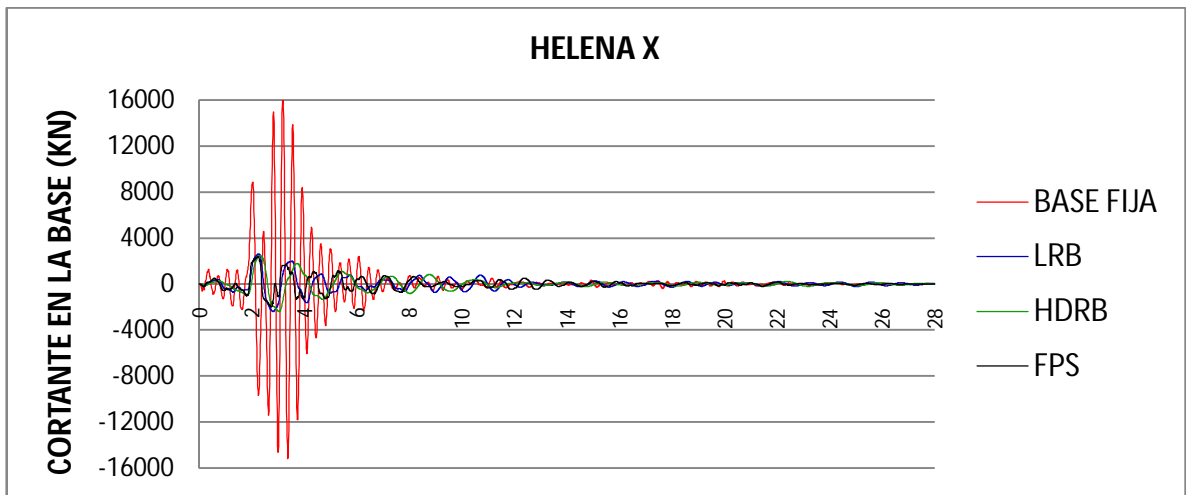


Figura 131: Cortante basal Vs tiempo Helena X modelo 2

Las reducciones de la fuerza cortante implican que el sistema cumple con los objetivos de control estructural ampliamente.

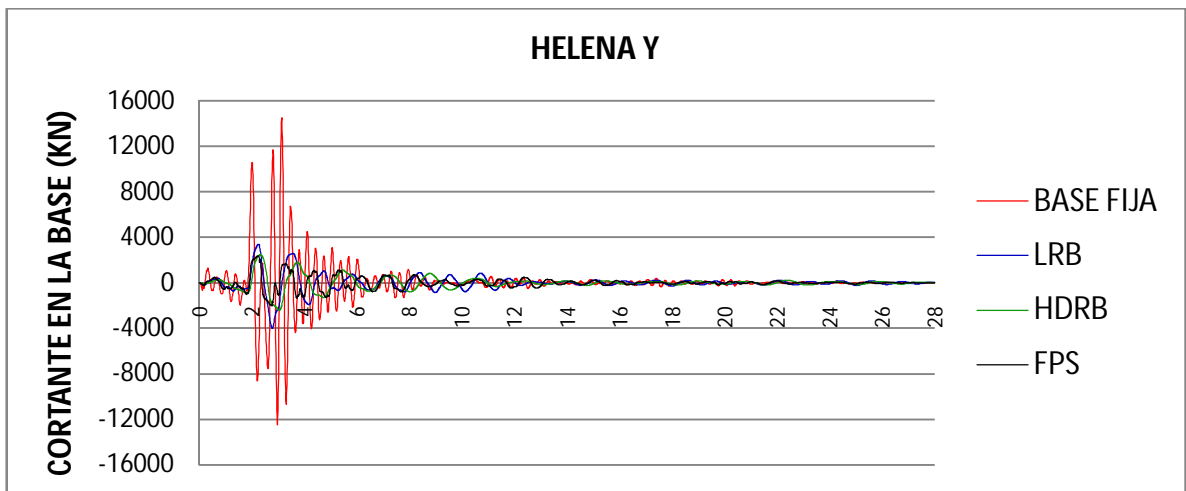
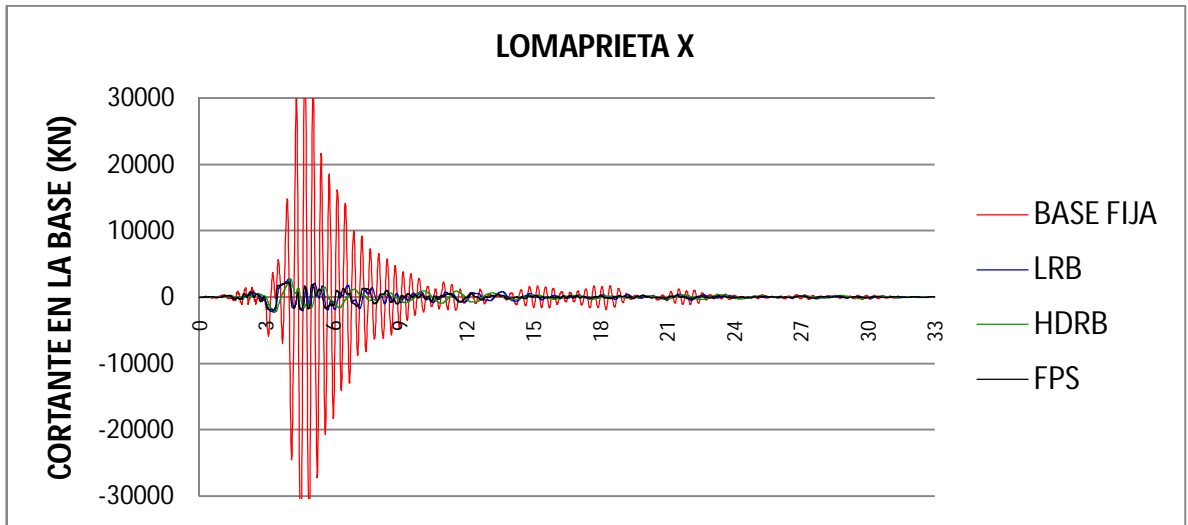
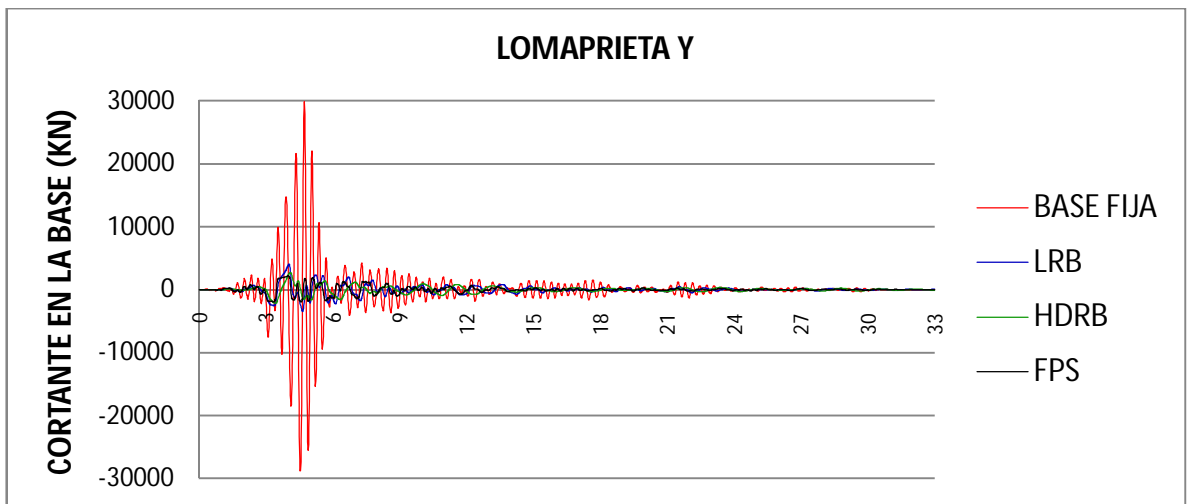


Figura 132: Cortante basal Vs tiempo Helena Y. modelo 2



**Figura 133: Cortante basal Vs tiempo Loma prieta X modelo 2**

Las reducciones de la fuerza cortante implican que el sistema cumple con los objetivos de control estructural ampliamente. El sistema de aislación basal empleando cualquiera de los dispositivos genera resultados satisfactorios, proporcionando seguridad a la vida, manteniendo la integridad estructural y protegiendo los contenidos.



**Figura 134: Cortante basal Vs tiempo Loma prieta Y. modelo 2**

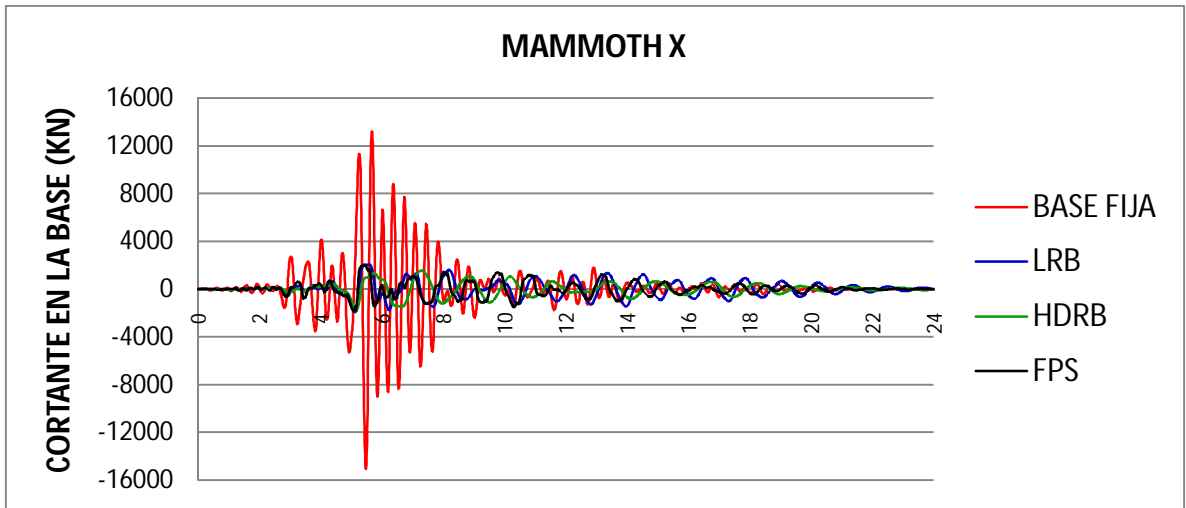


Figura 135: Cortante basal Vs tiempo Mammoth X modelo 2

Las reducciones de la fuerza cortante implican que el sistema cumple con los objetivos de control estructural ampliamente.

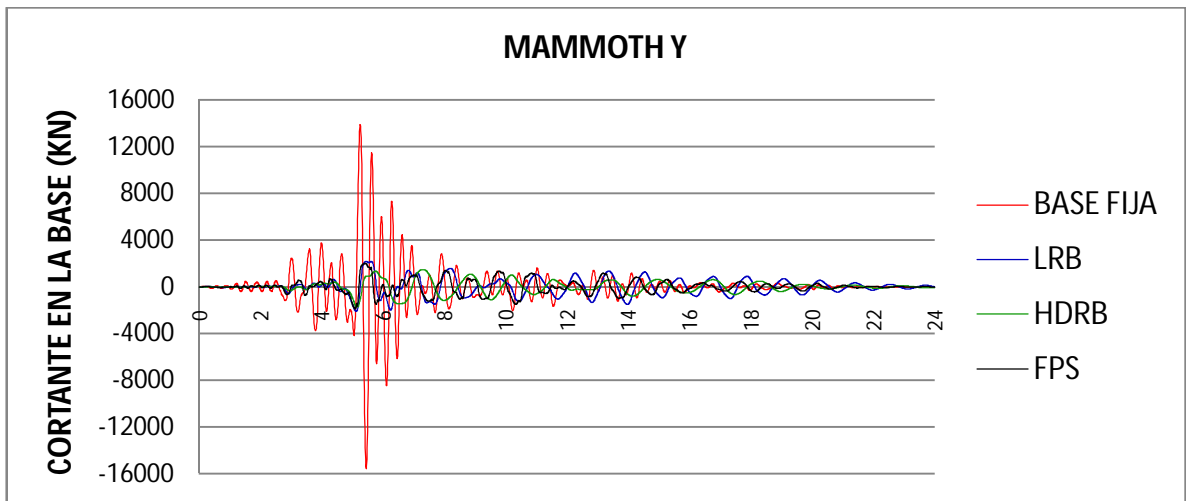


Figura 136: Cortante basal Vs tiempo Mammoth X modelo 2

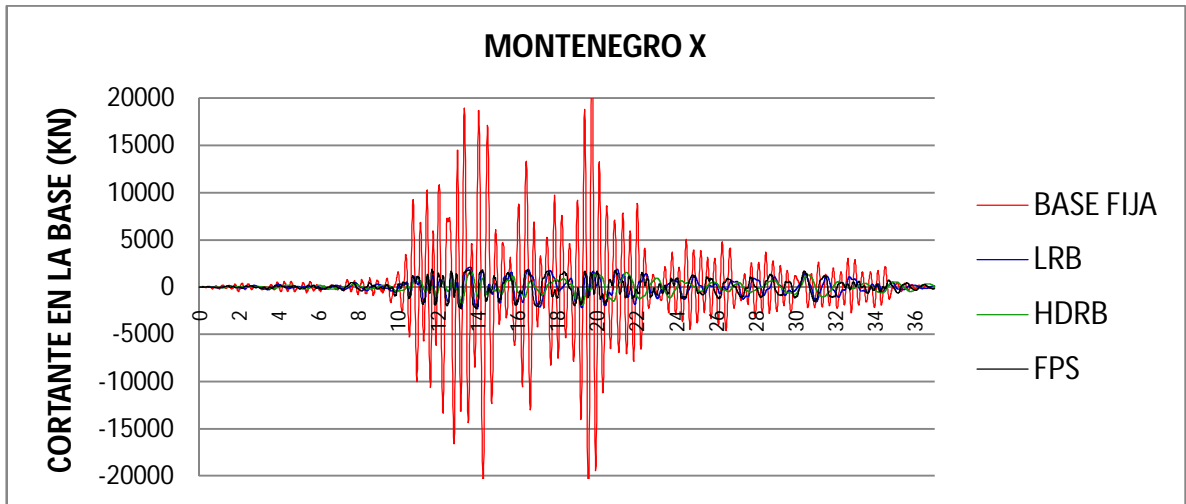


Figura 137: Cortante basal Vs tiempo Montenegro X modelo 2

Las reducciones de la fuerza cortante implican que el sistema cumple con los objetivos de control estructural ampliamente.

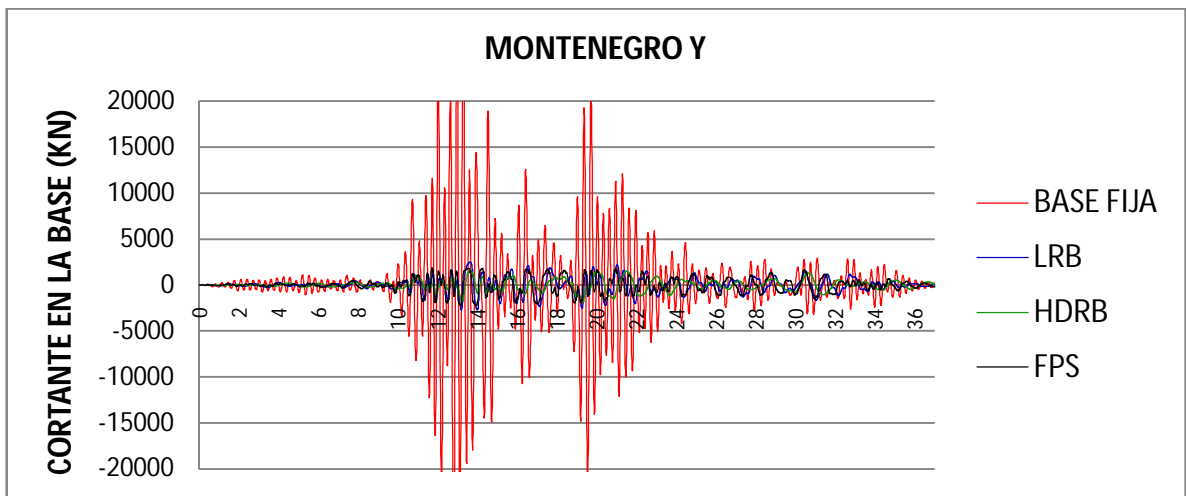


Figura 138: Cortante basal Vs tiempo Montenegro Y modelo 2

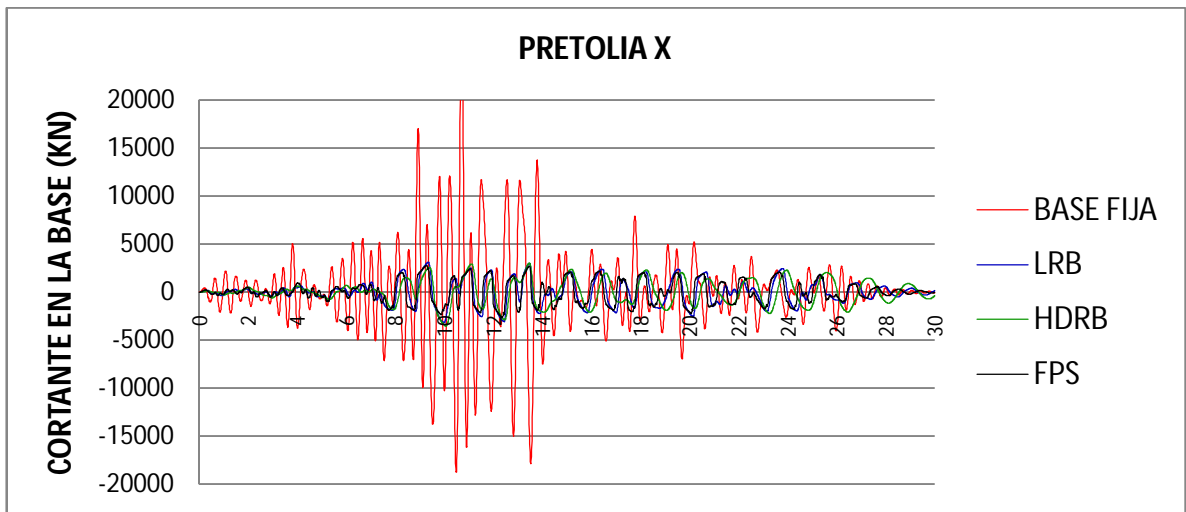


Figura 139: Cortante basal Vs tiempo Pretolia X. modelo 2

Las reducciones de la fuerza cortante implican que el sistema cumple con los objetivos de control estructural ampliamente.

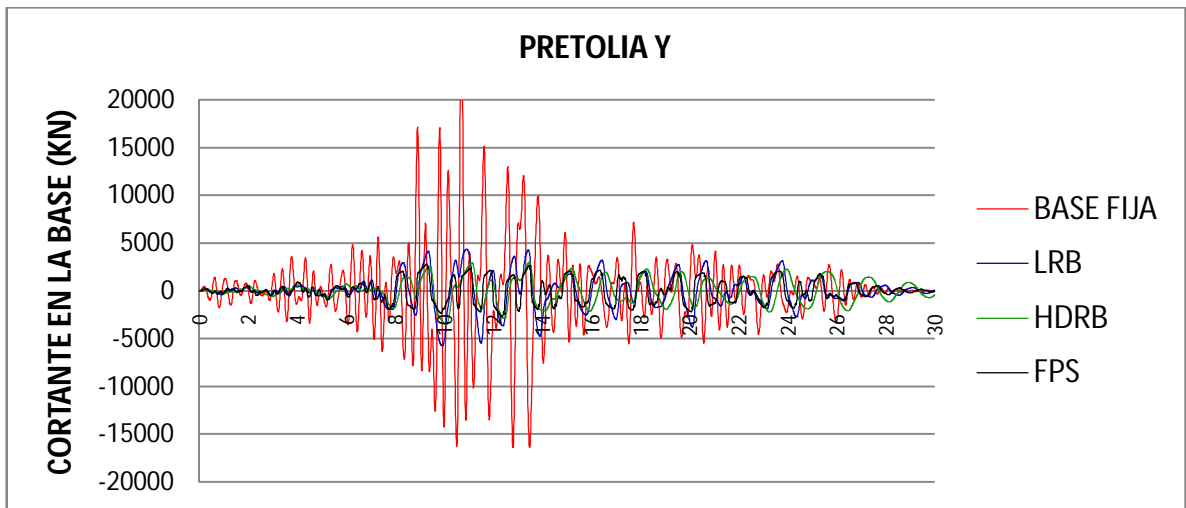


Figura 140: Cortante basal Vs tiempo Pretolia Y. modelo 2

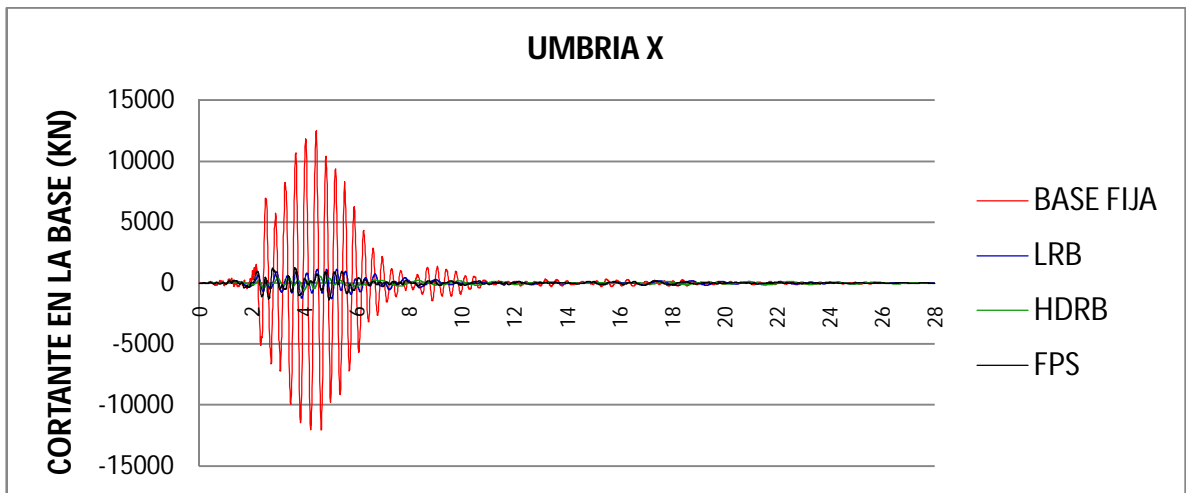


Figura 141: Cortante basal Vs tiempo Umbria X modelo 2

Las reducciones de la fuerza cortante implican que el sistema cumple con los objetivos de control estructural ampliamente.

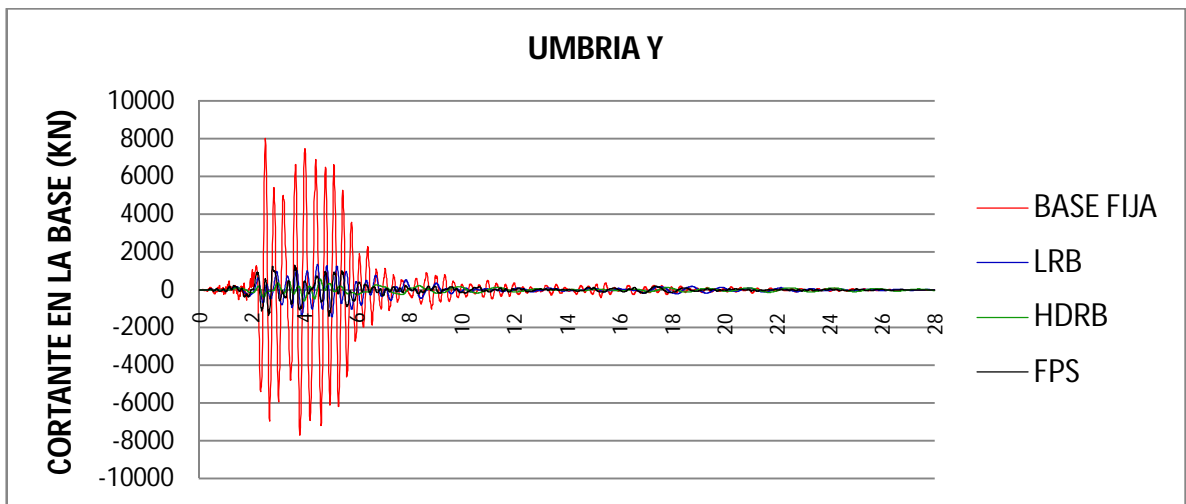


Figura 142: Cortante basal Vs tiempo Umbria Y modelo 2

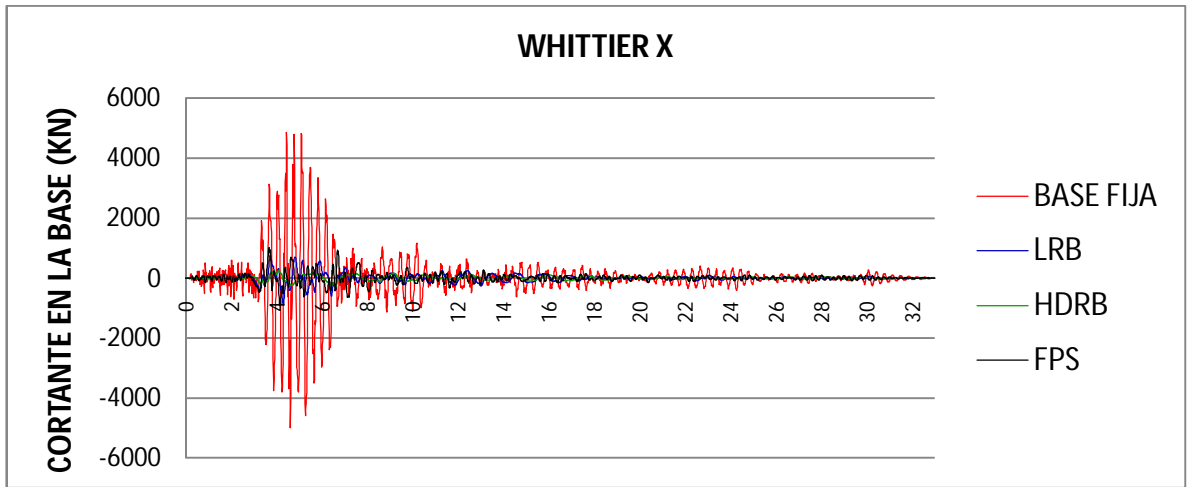


Figura 143: Cortante basal Vs tiempo Whittier X. modelo 2

Las reducciones de la fuerza cortante implican que el sistema cumple con los objetivos de control estructural ampliamente.

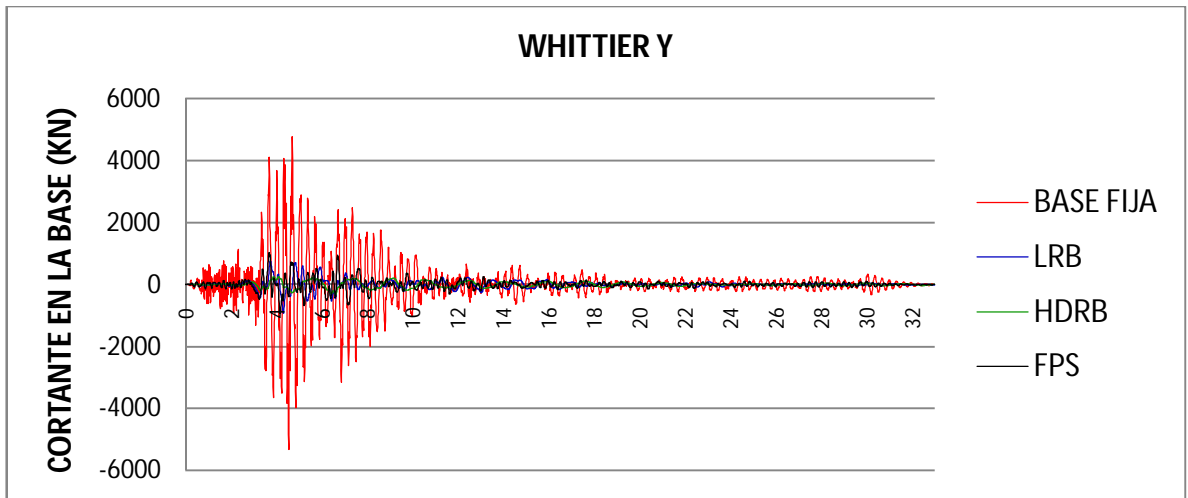
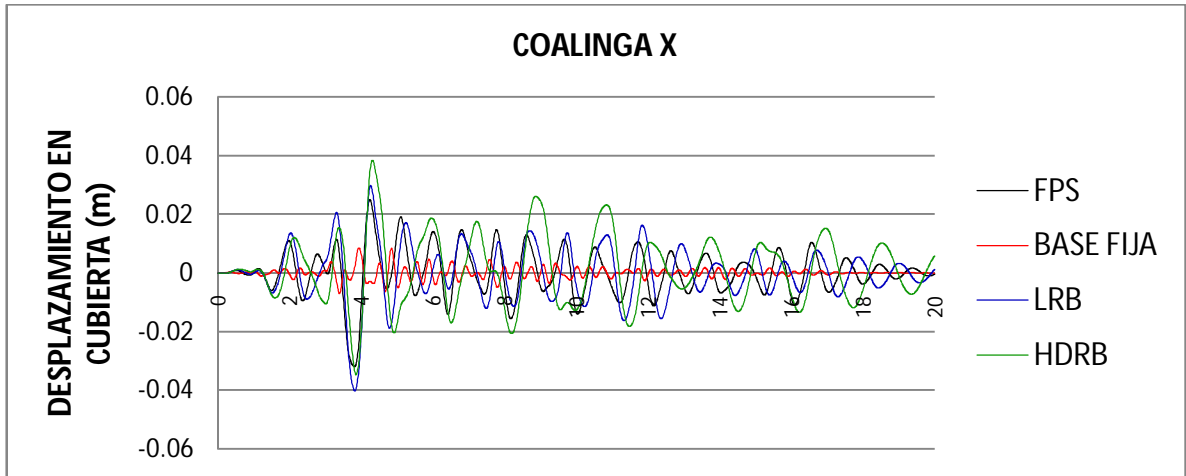


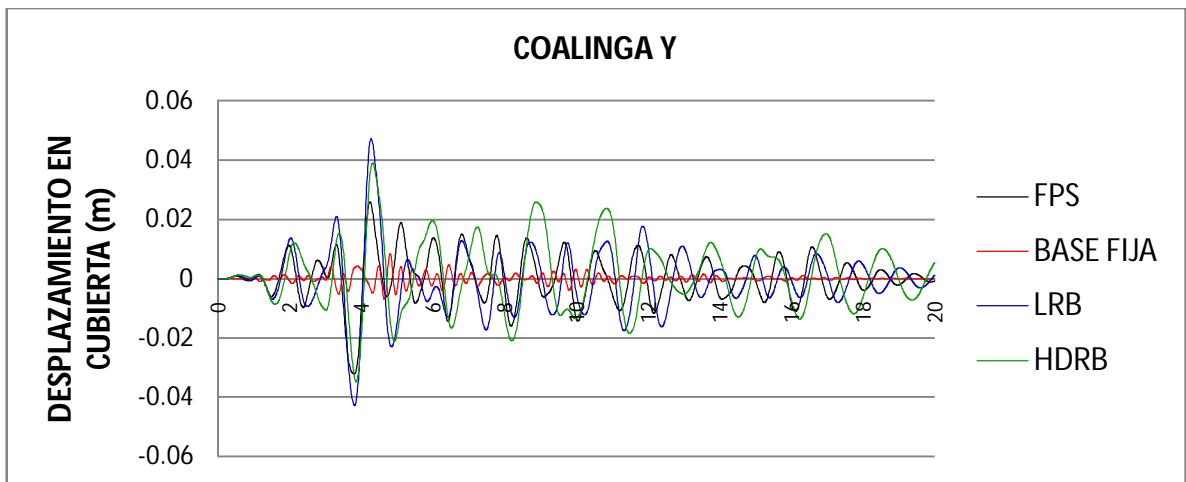
Figura 144: Cortante basal Vs tiempo Whittier Y. modelo 2

**12.2.2. Grafica desplazamiento en nodo de control en la cubierta vs tiempo.**



**Figura 145: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Coalinga X.**

Los desplazamientos en la estructura aislada en general son mayores que los de la estructura con base fija.



**Figura 146: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Coalinga Y.**

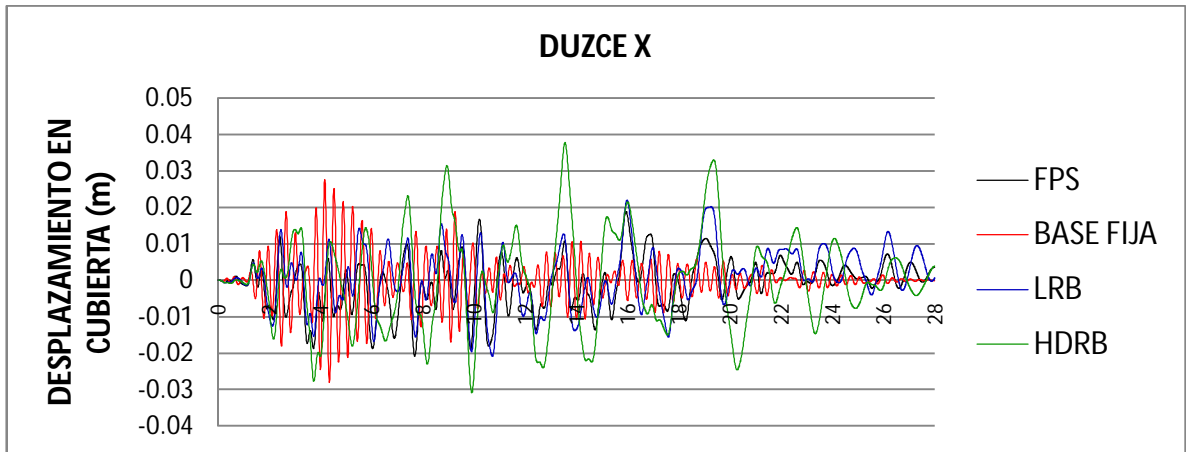


Figura 147: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Duzce X.

Los desplazamientos en la estructura aislada en general son mayores que los de la estructura con base fija. Los aisladores Elastoméricos principalmente el HDRB se caracterizan por tener los mayores desplazamientos.

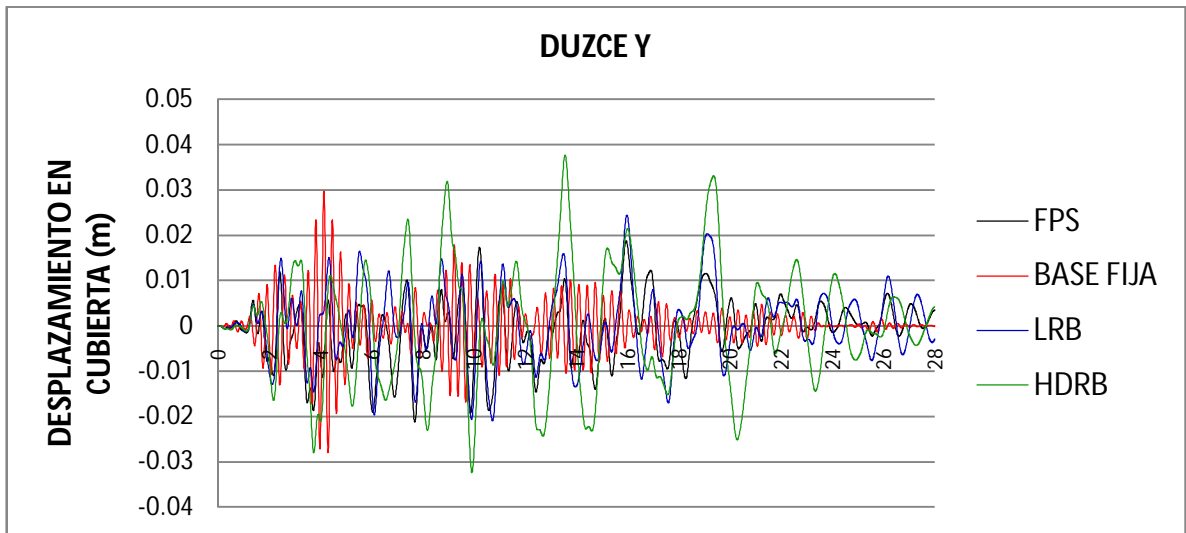


Figura 148: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Duzce Y

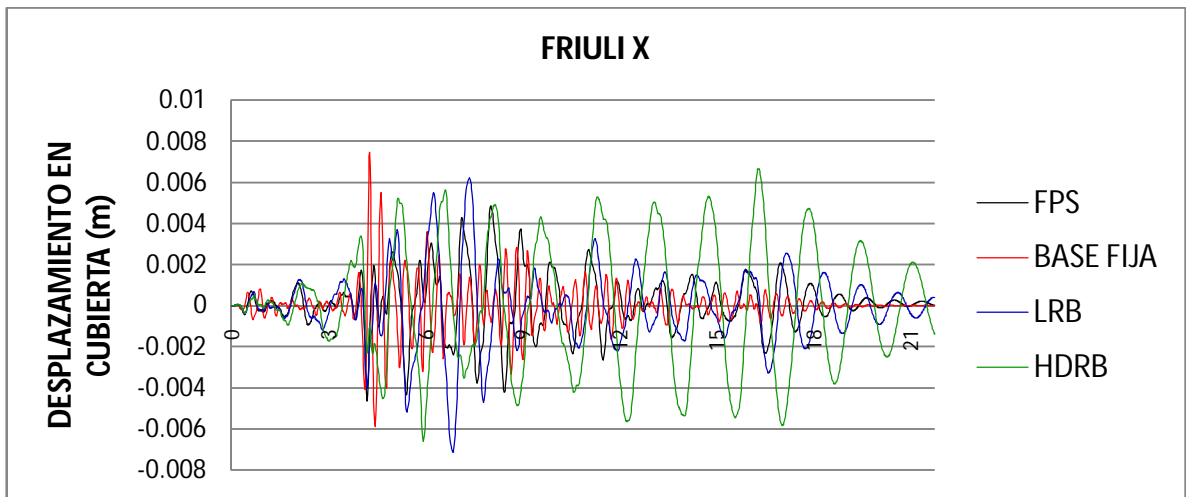


Figura 149: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Friuli X.

Los desplazamientos en la estructura aislada en general son mayores que los de la estructura con base fija. Los aisladores elastoméricos principalmente el HDRB se caracteriza por tener los mayores desplazamientos.

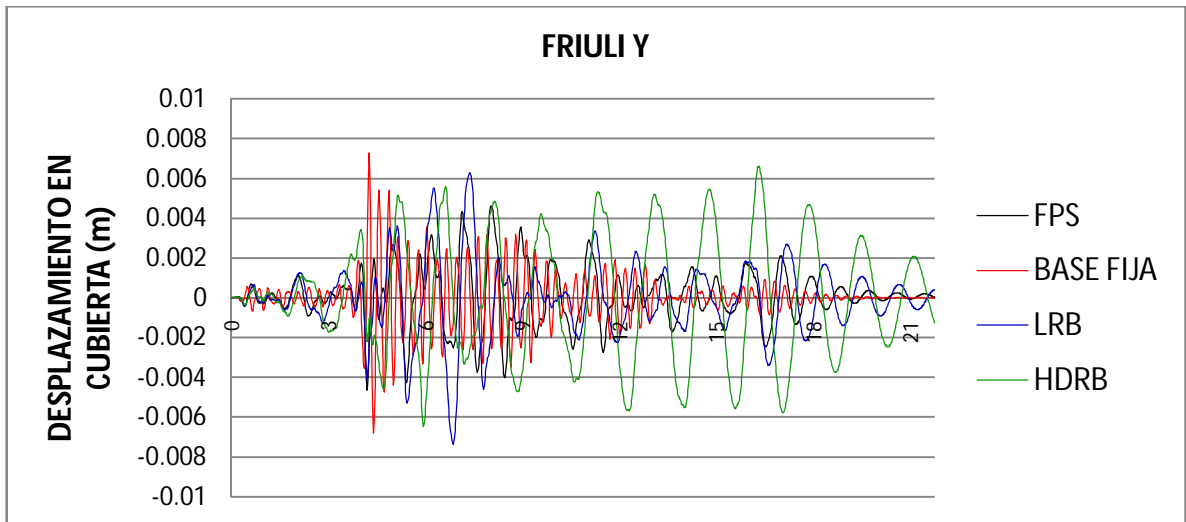


Figura 150: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Friuli X.

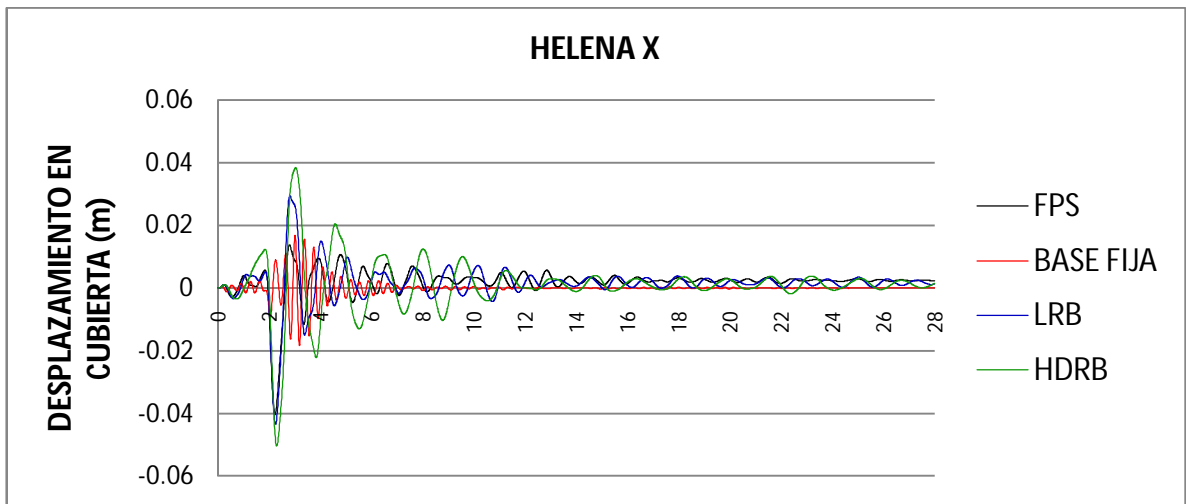


Figura 151: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Helena X.

Los desplazamientos en la estructura aislada en general son mayores que los de la estructura con base fija. Los aisladores elastoméricos principalmente el HDRB se caracteriza por tener los mayores desplazamientos.

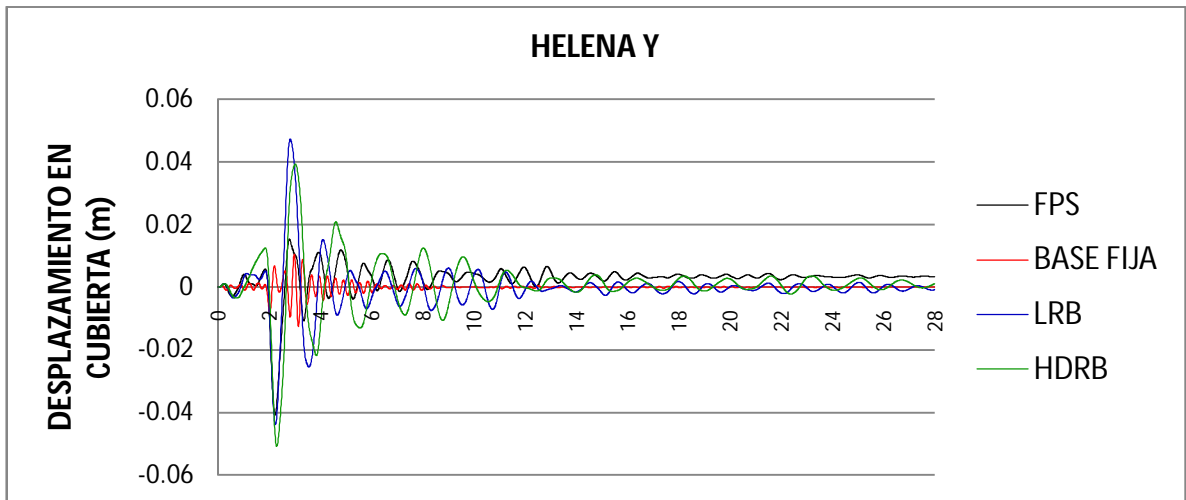


Figura 152: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Helena Y.

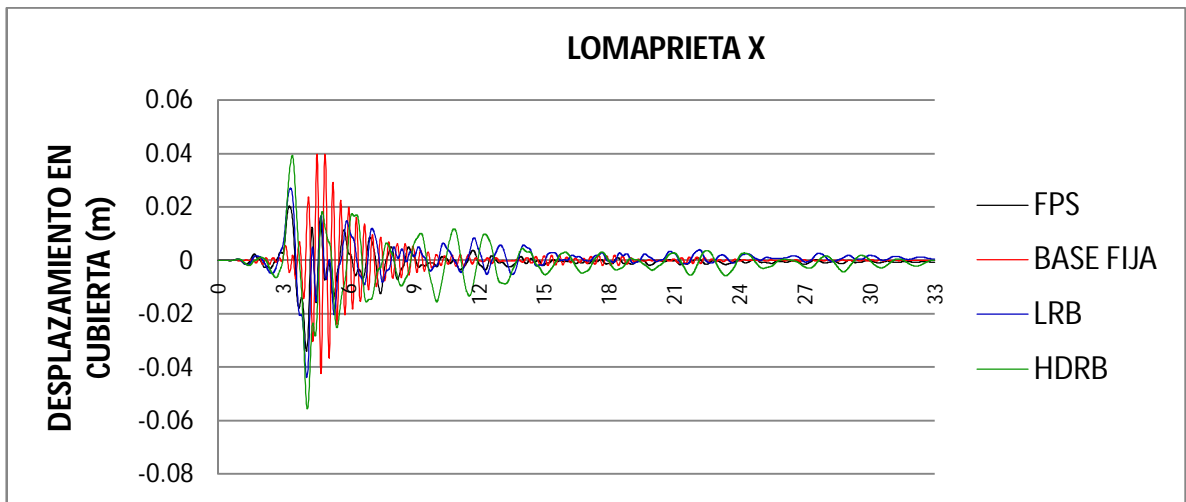


Figura 153: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Loma prieta X.

Los desplazamientos en la estructura aislada en general son mayores que los de la estructura con base fija. Los aisladores elastoméricos principalmente el HDRB se caracteriza por tener los mayores desplazamientos.

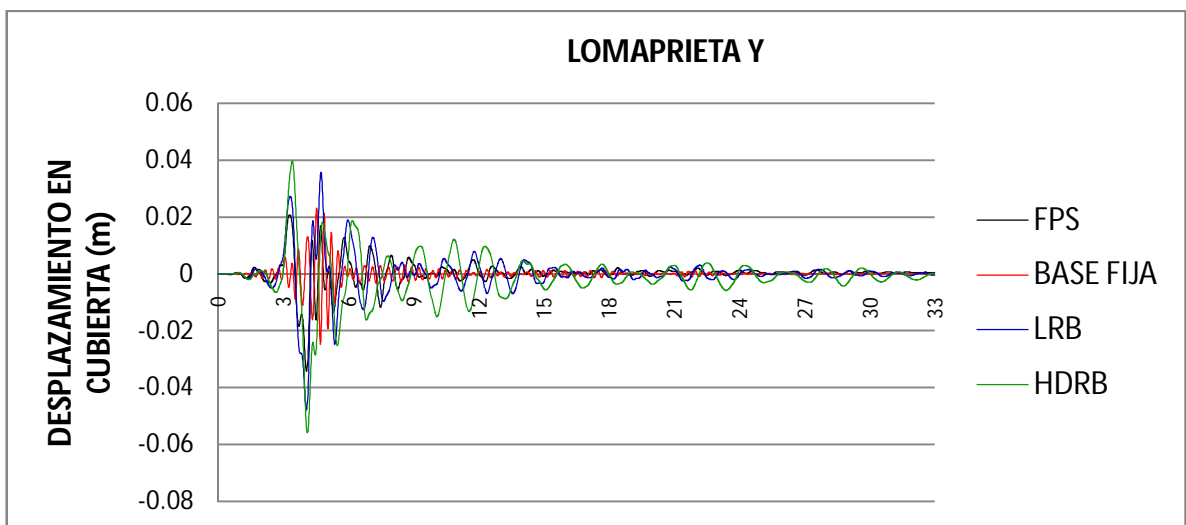


Figura 154: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Loma prieta Y.

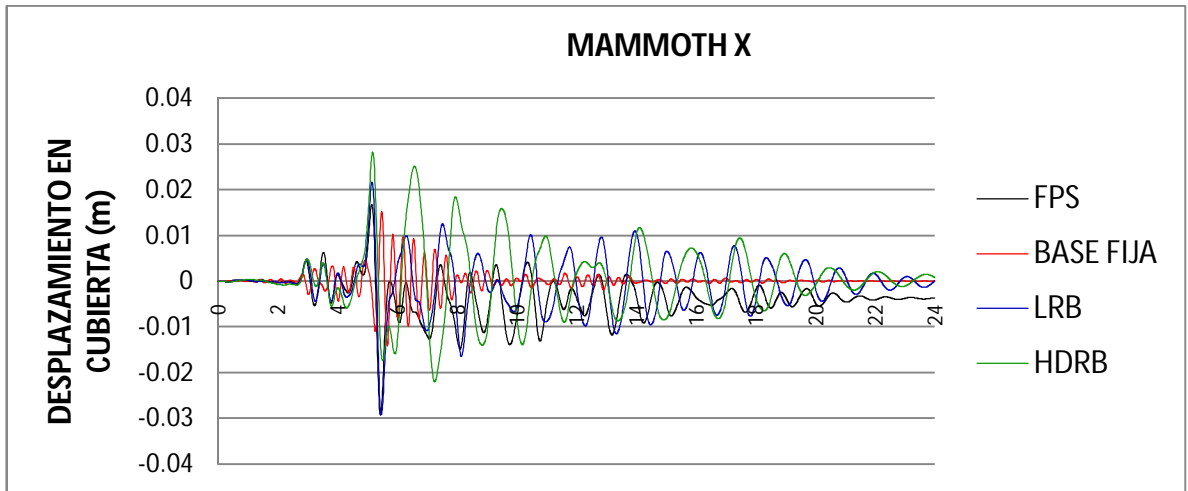


Figura 155: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Mammoth X.

Los desplazamientos en la estructura aislada en general son mayores que los de la estructura con base fija. Los aisladores elastoméricos principalmente el HDRB se caracteriza por tener los mayores desplazamientos.

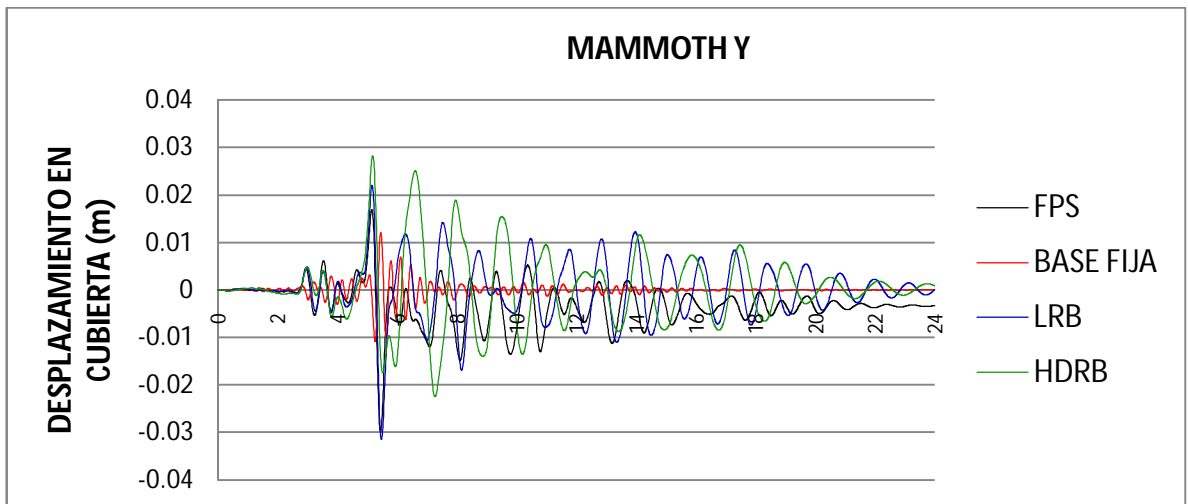


Figura 156: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Mammoth Y

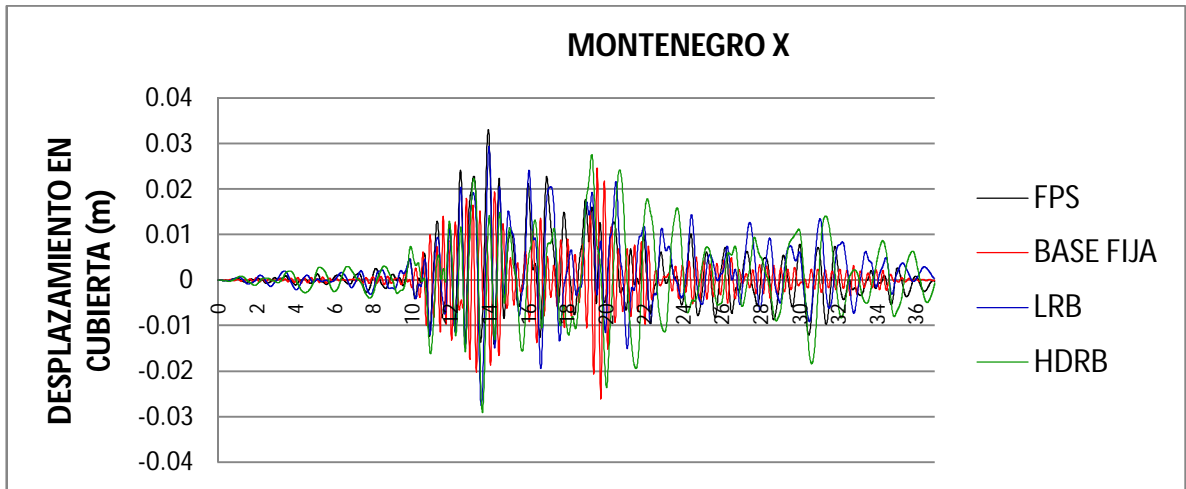


Figura 157: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Montenegro X

Los desplazamientos en la estructura aislada en general son mayores que los de la estructura con base fija. Los aisladores elastoméricos principalmente el HDRB se caracteriza por tener los mayores desplazamientos.

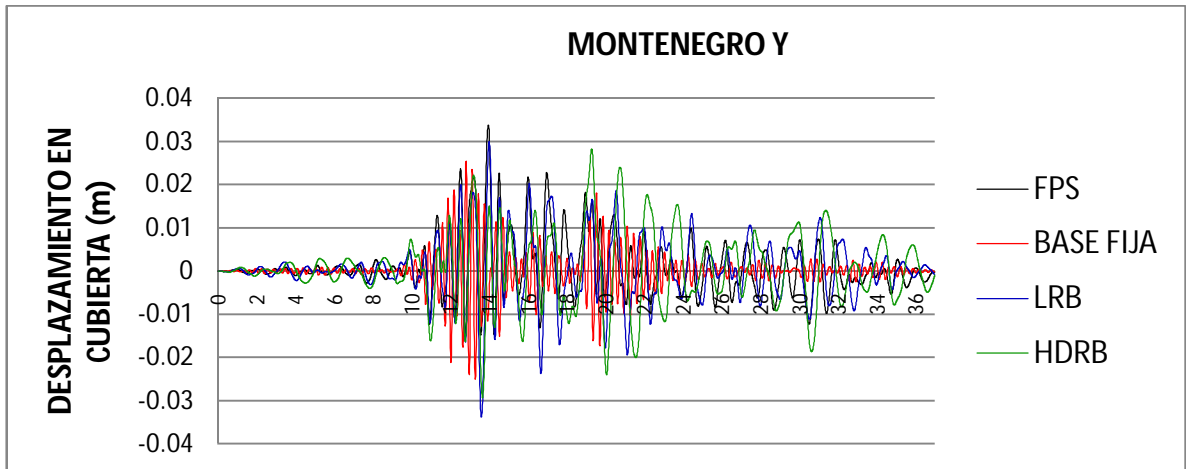


Figura 158: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Montenegro Y.

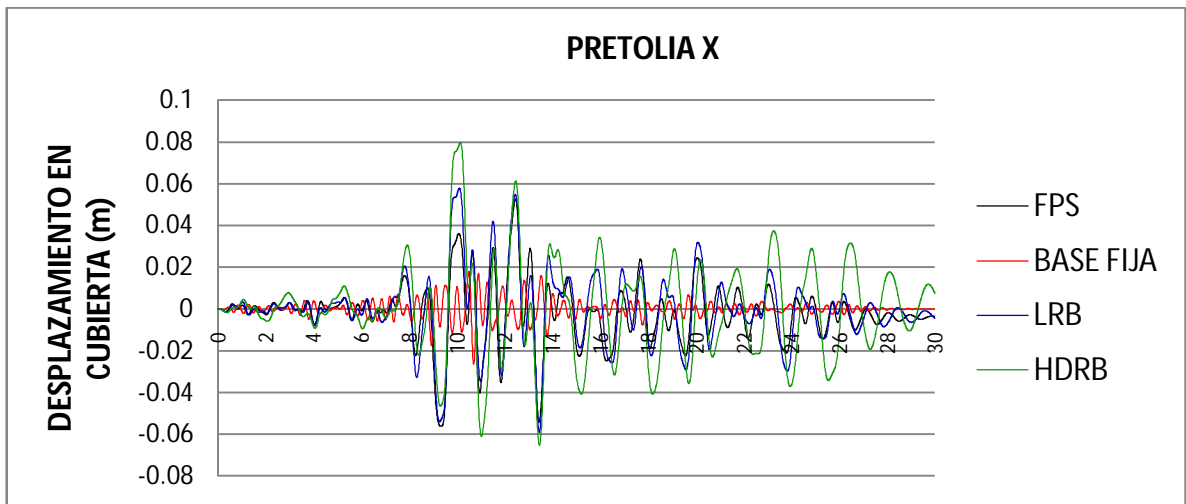


Figura 159: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Pretolia X

Los desplazamientos en la estructura aislada en general son mayores que los de la estructura con base fija. Los aisladores elastoméricos principalmente el HDRB se caracteriza por tener los mayores desplazamientos.

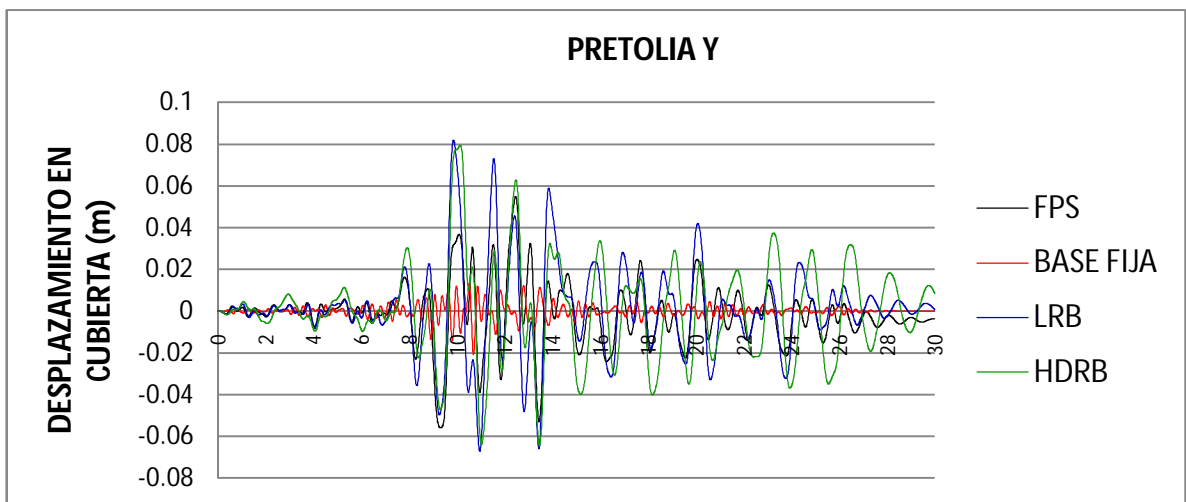


Figura 160: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Pretolia Y

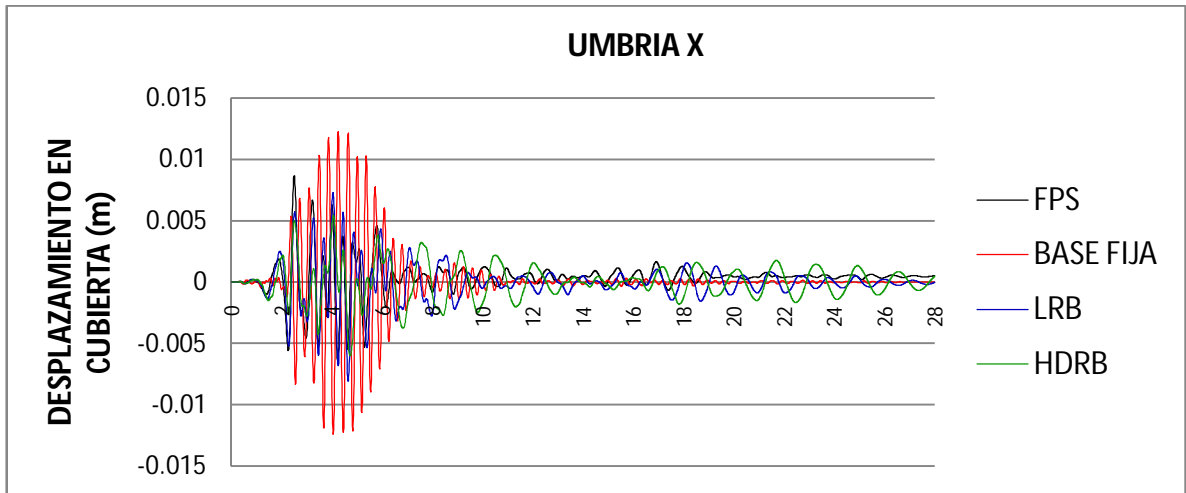


Figura 161: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Umbria X.

Las fuerzas cortantes que actúan sobre la estructura con base fija son grandes en comparación con las de la estructura aislada, por esta razón se producen mayores desplazamientos en la estructura con base fija.

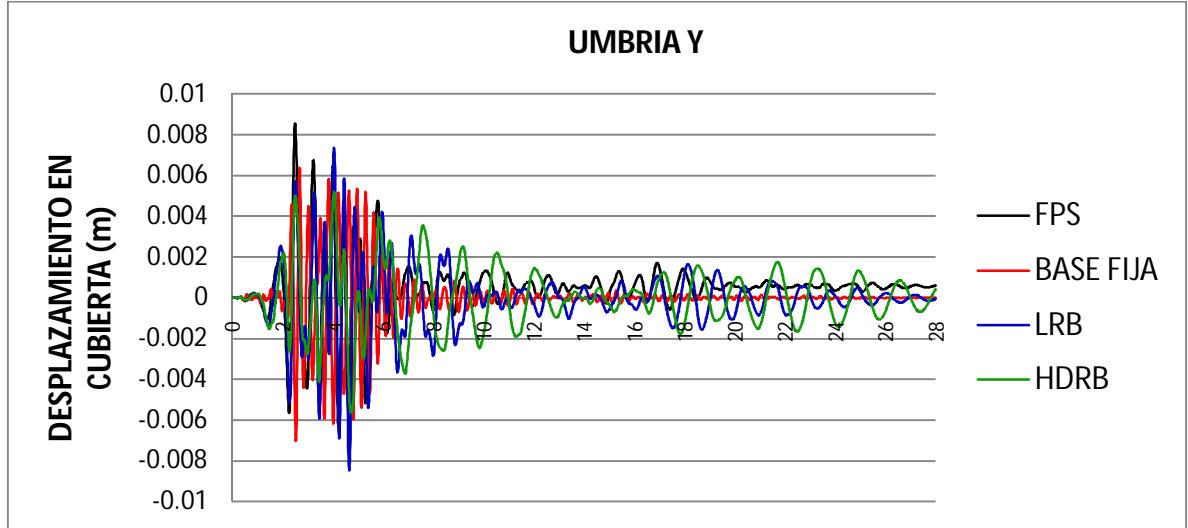


Figura 162: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Umbria Y.

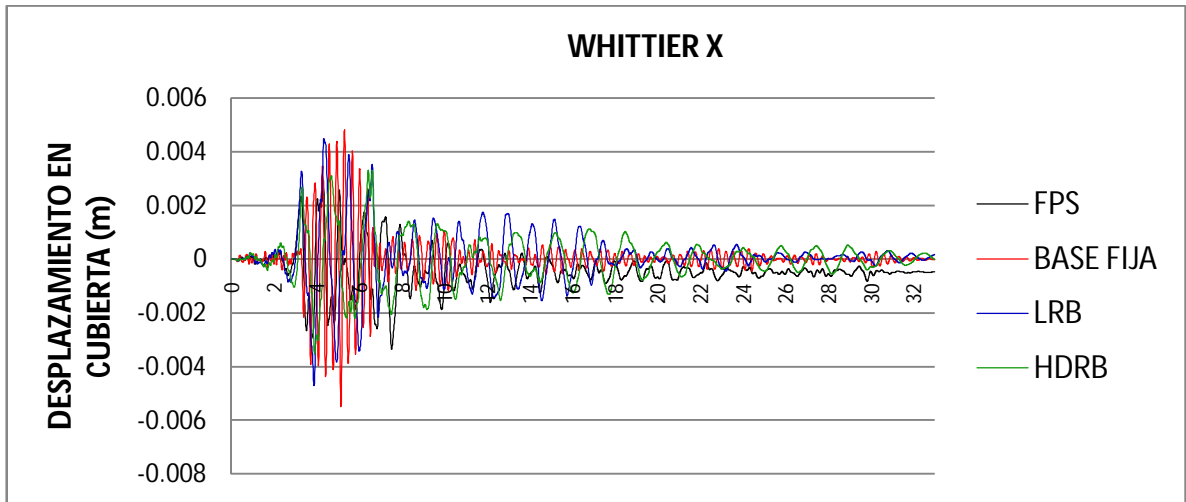


Figura 163: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Whittier X

Las fuerzas cortantes que actúan sobre la estructura con base fija son grandes en comparación con las de la estructura aislada, por esta razón se producen mayores desplazamientos en la estructura con base fija.

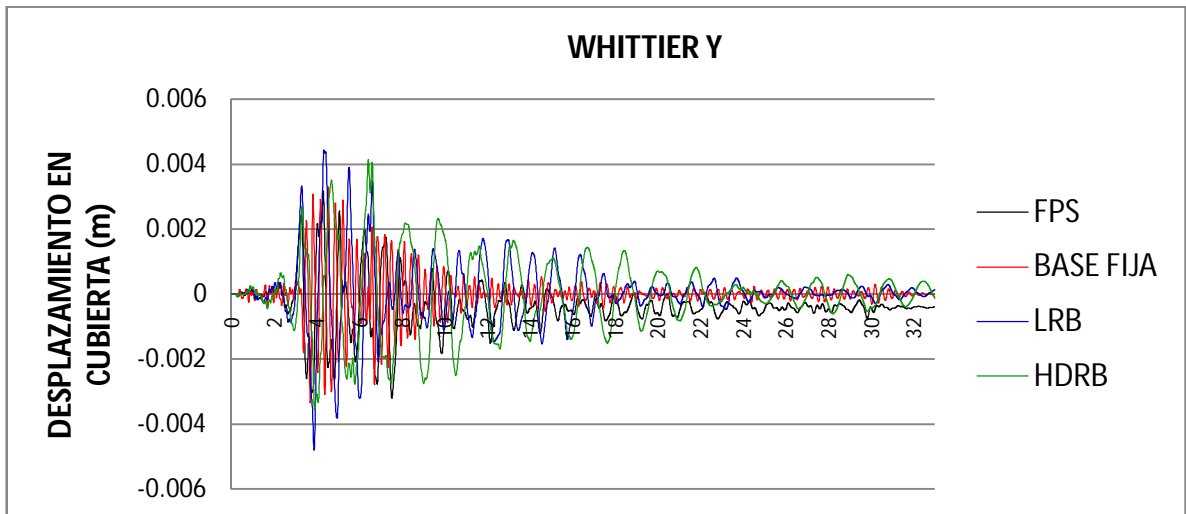


Figura 164: Desplazamiento en el nodo de control de la cubierta Whittier Y.

12.2.3. Grafica aceleraciones en el nodo de control en la cubierta vs tiempo.

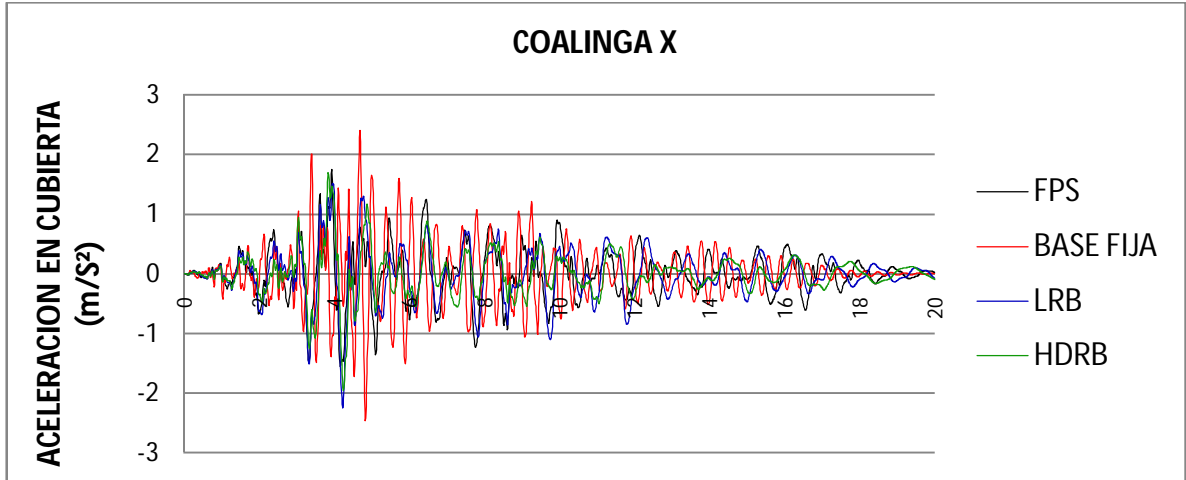


Figura 165: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Coalinga X

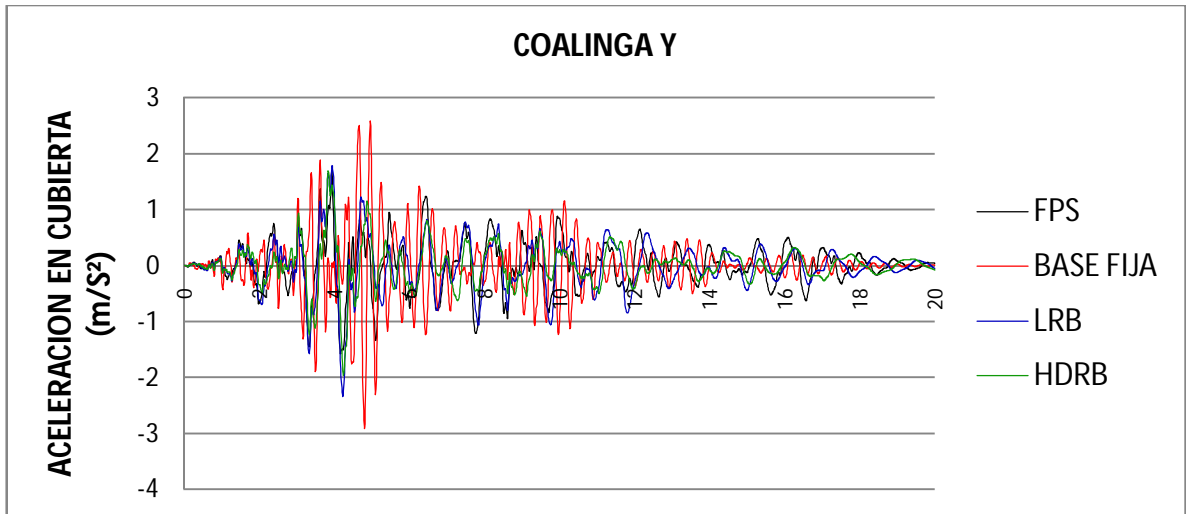


Figura 166: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Coalinga Y

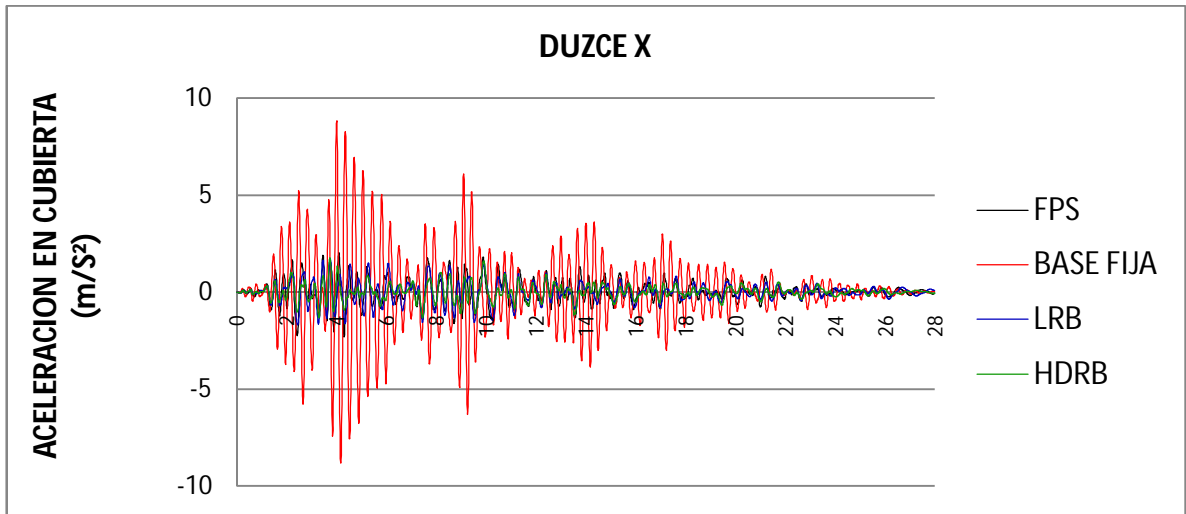


Figura 167: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Duzce X

Las aceleraciones disminuyen considerablemente empleando el sistema de aislamiento de base, especialmente si se emplean los aisladores elastoméricos.

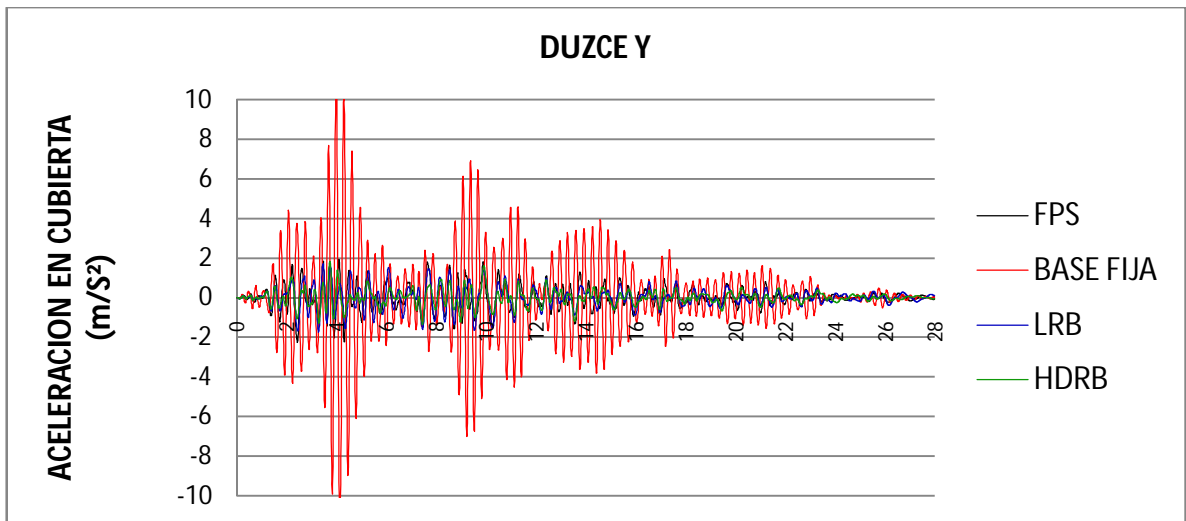


Figura 168: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Duzce Y.

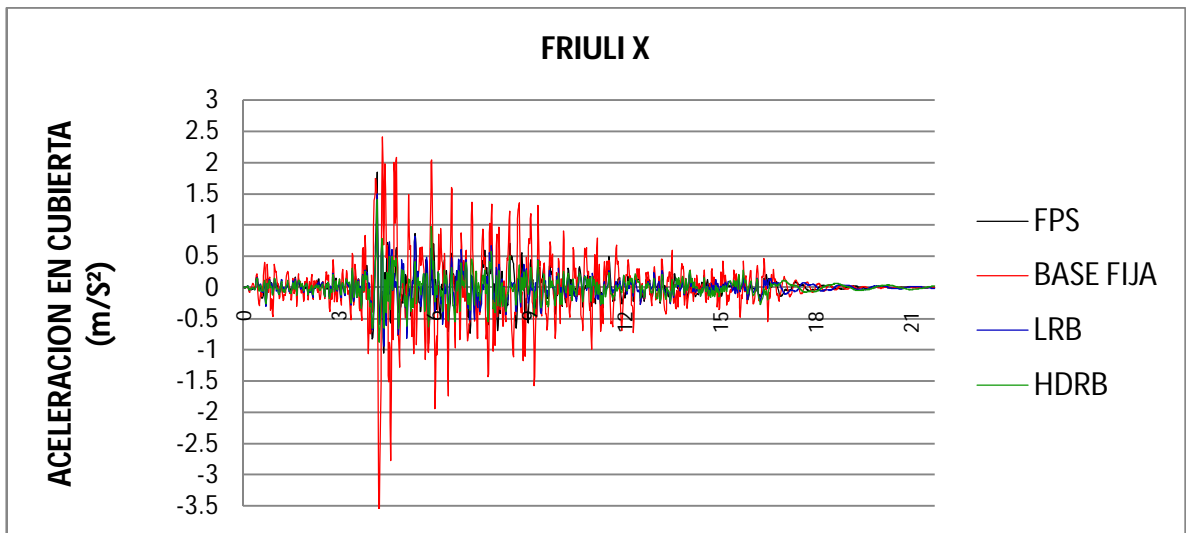


Figura 169: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Friuli X

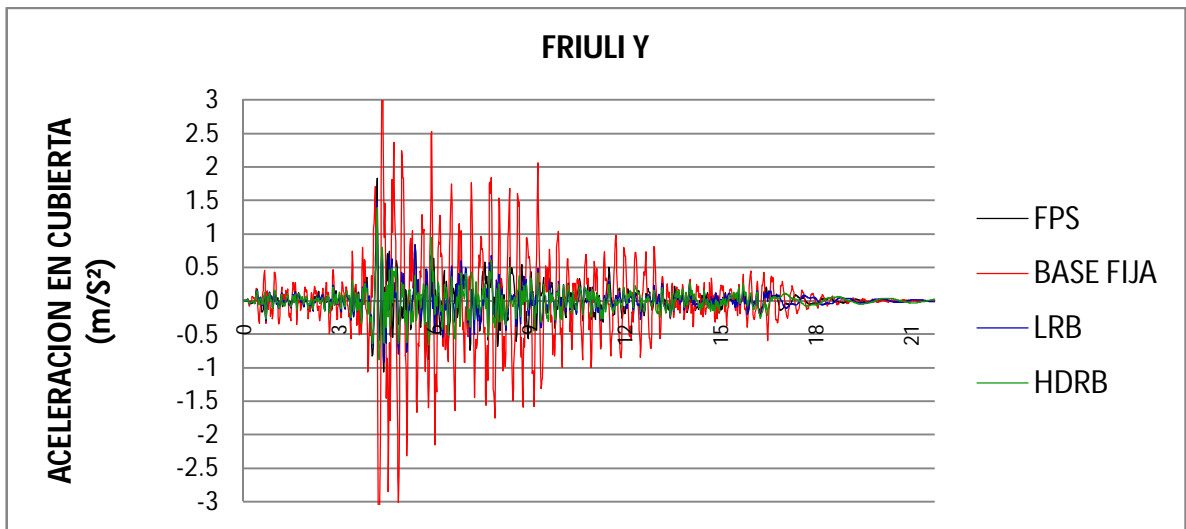


Figura 170: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Friuli Y.

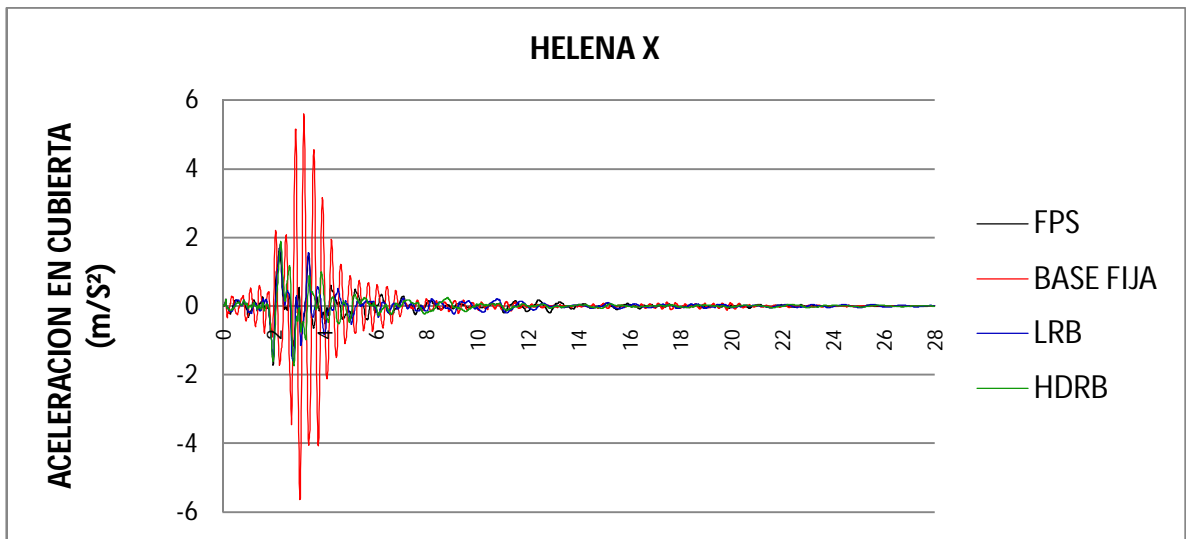


Figura 171: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Helena X

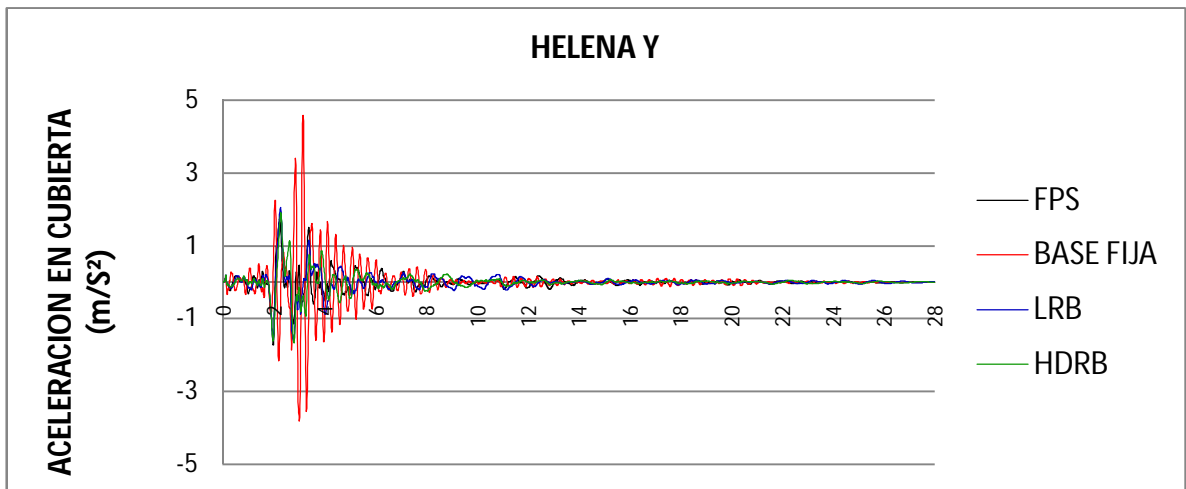
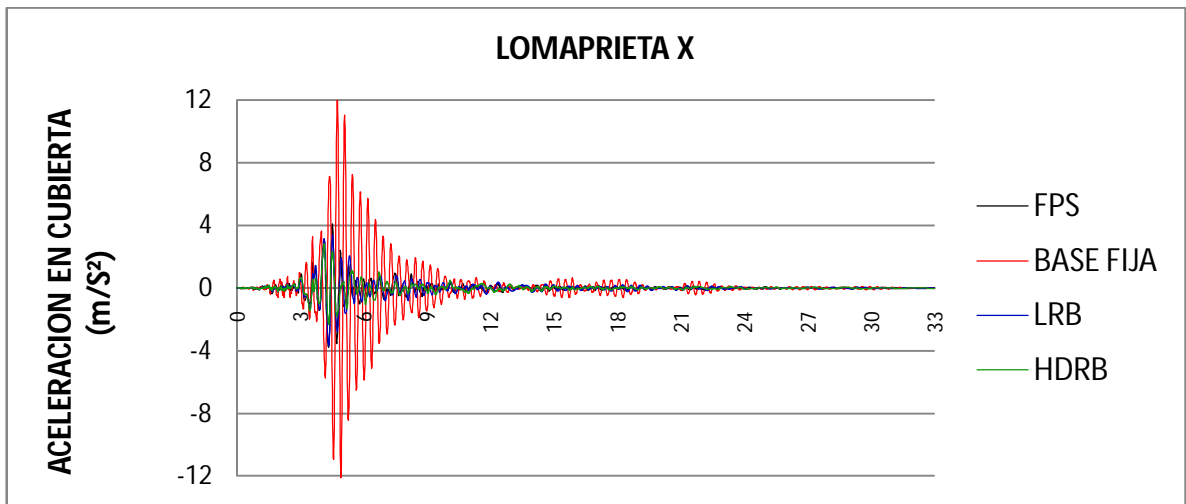
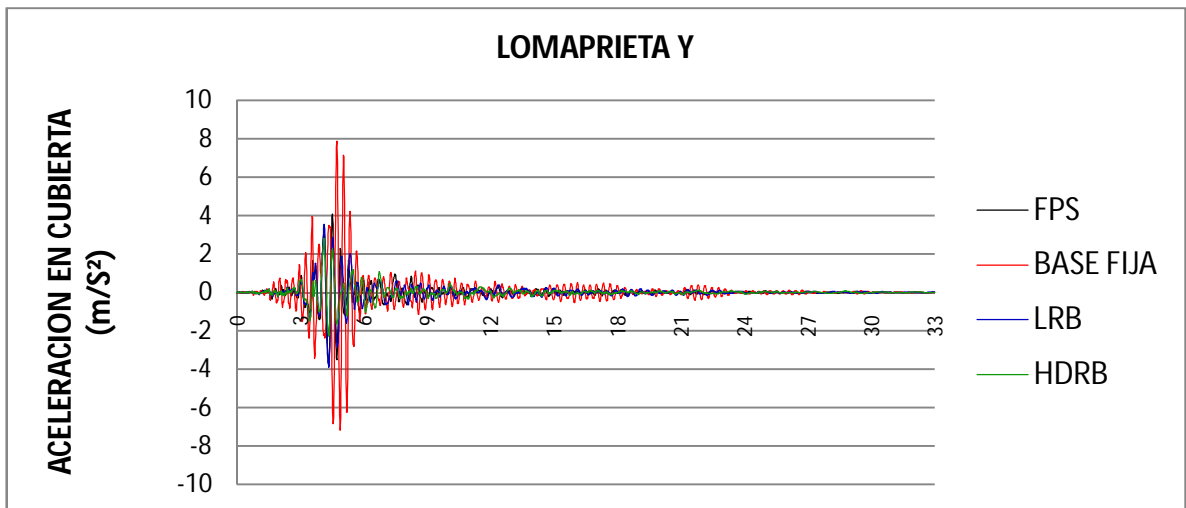


Figura 172: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Helena Y



**Figura 173: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Loma prieta X**



**Figura 174: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Loma prieta Y**

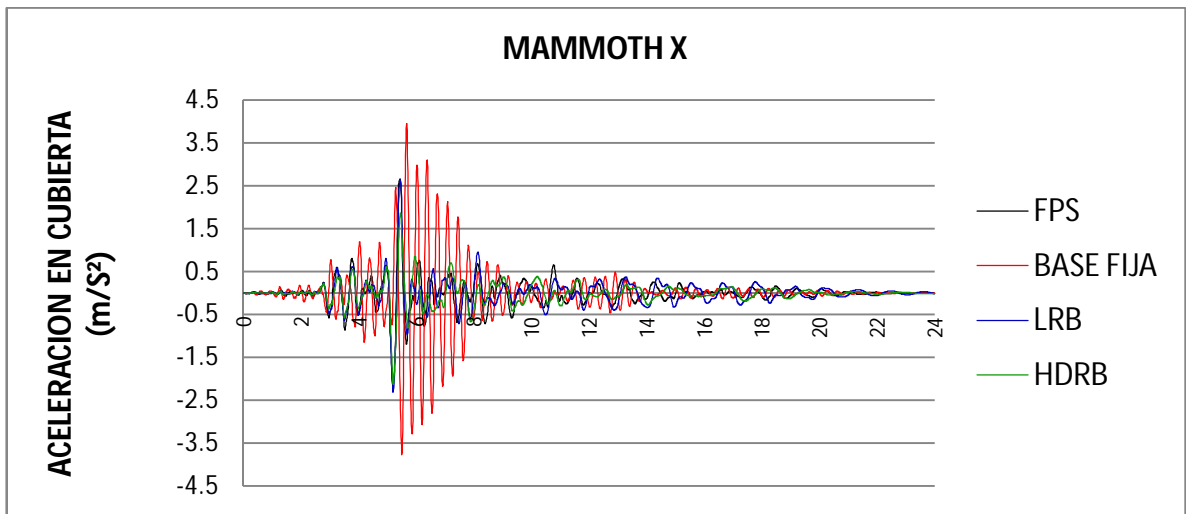


Figura 175: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Mammoth X.

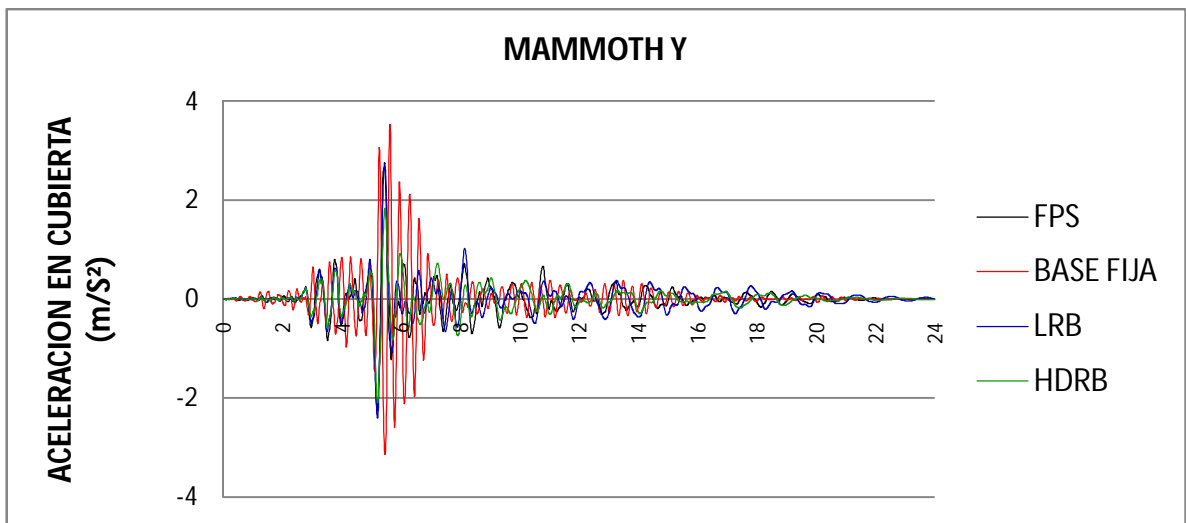
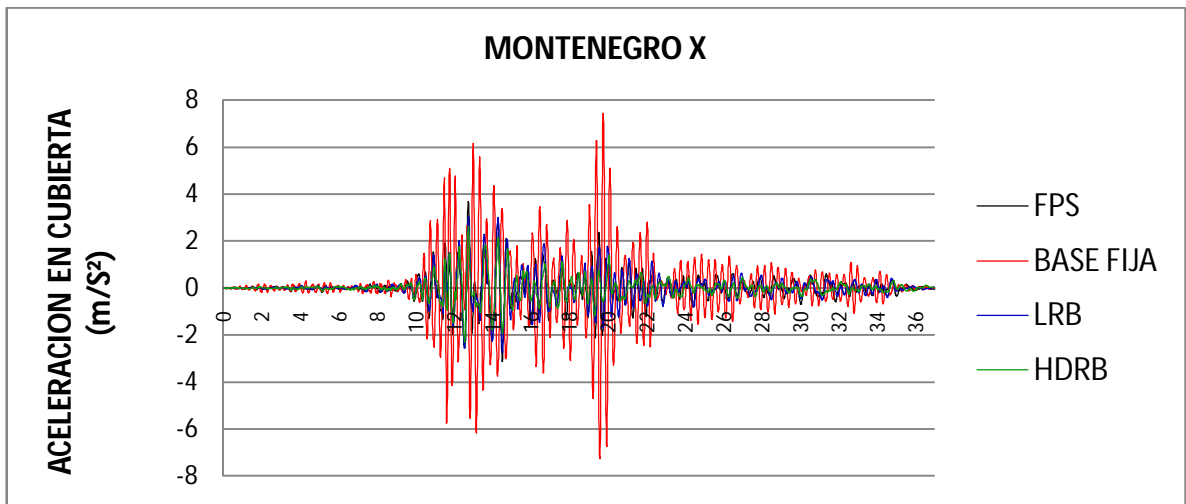
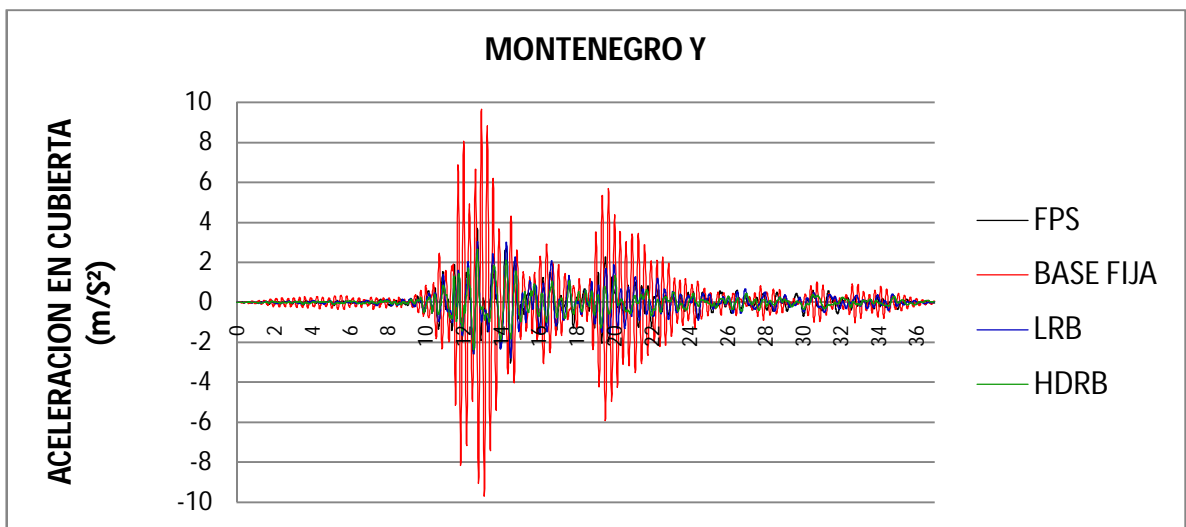


Figura 176: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Mammoth Y.



**Figura 177: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Montenegro X**



**Figura 178: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Montenegro Y.**

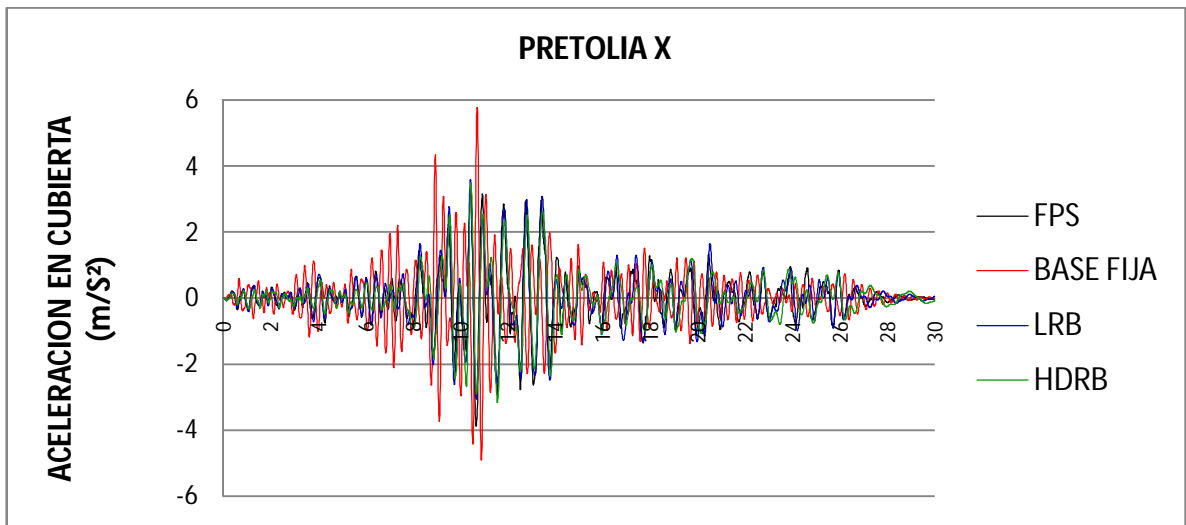


Figura 179: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Pretolia X

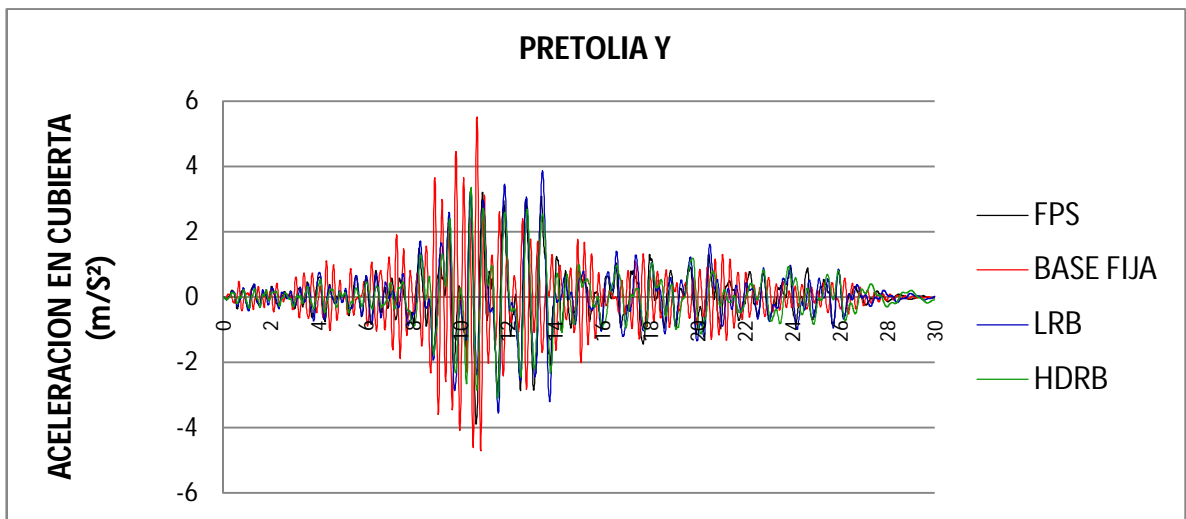


Figura 180: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Pretolia Y.

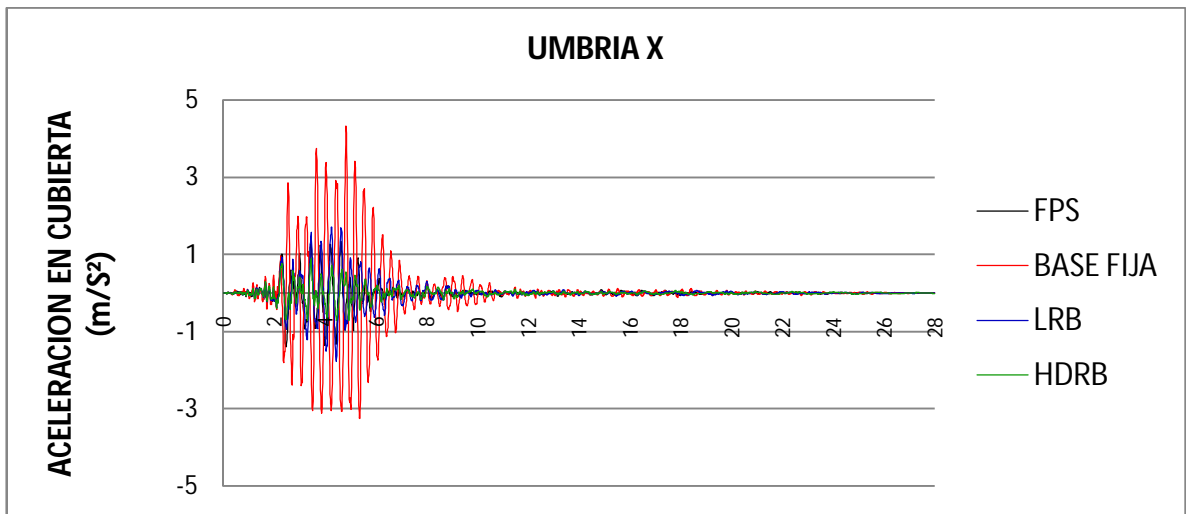


Figura 181: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Umbria X

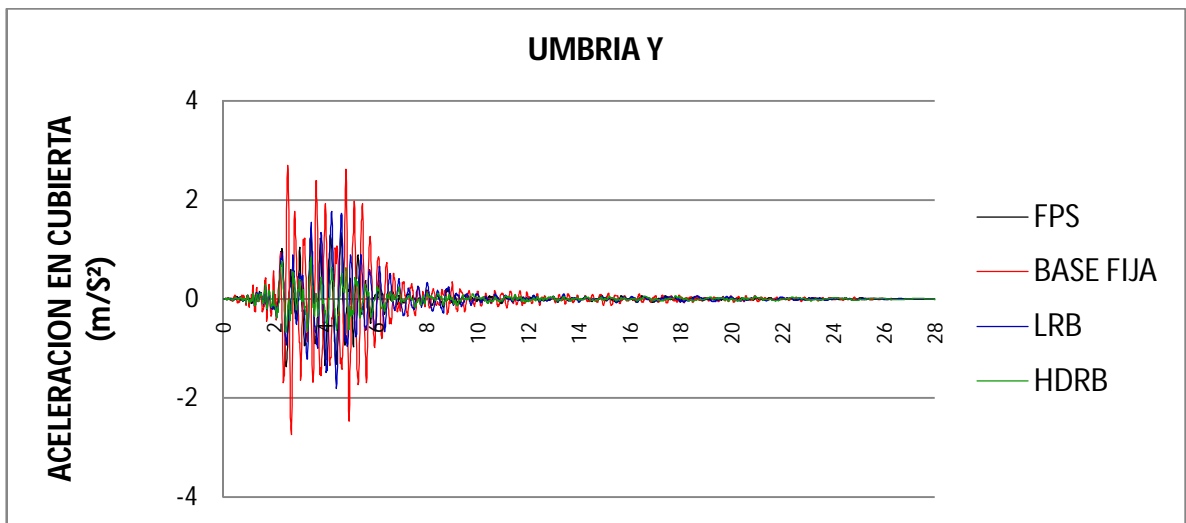


Figura 182: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Umbria Y.

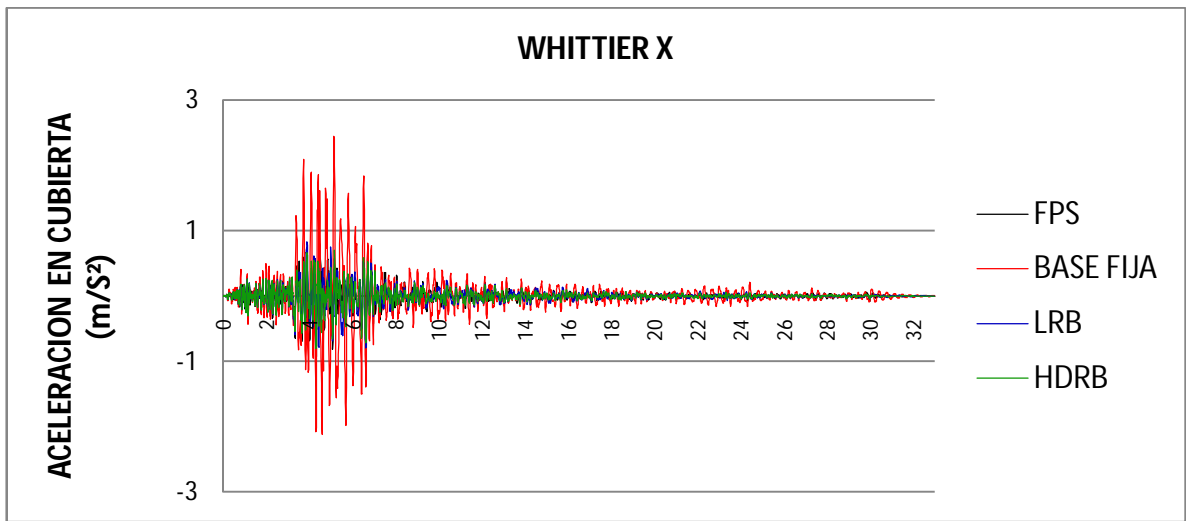


Figura 183: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Whittier X

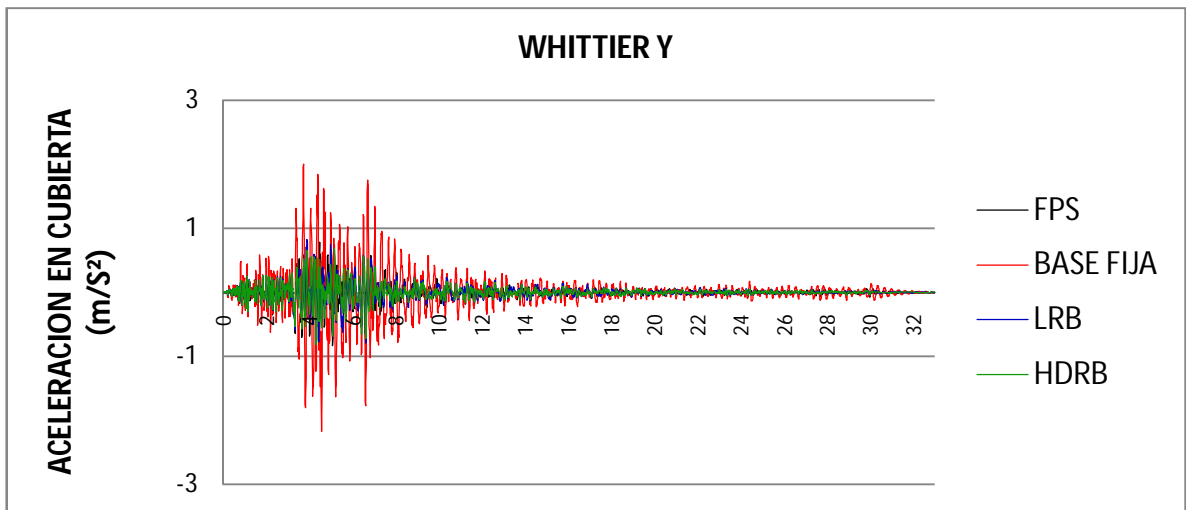


Figura 184: Aceleración en la cubierta Vs tiempo Whittier Y

12.2.4. Grafica desplazamientos de los nodos por piso vs tiempo.

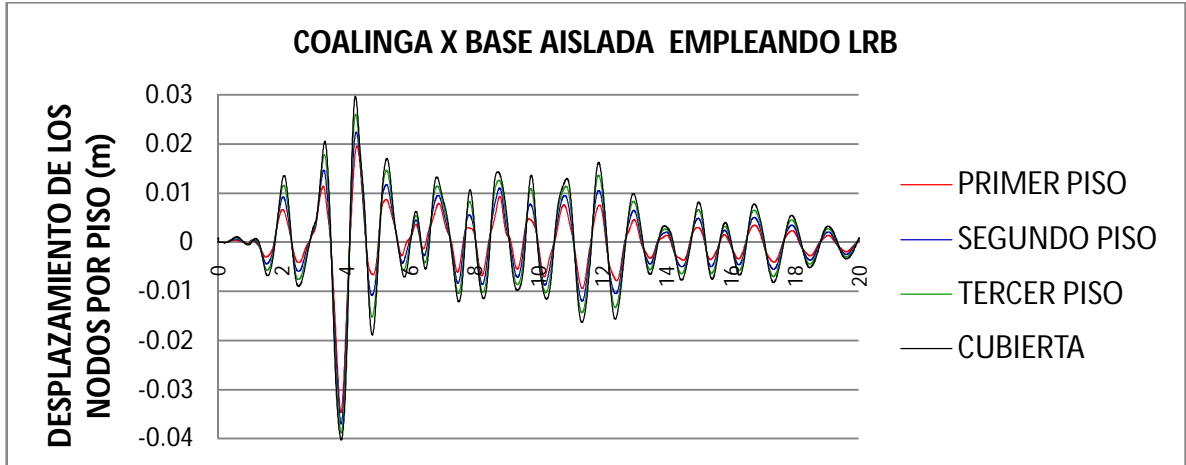


Figura 185: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo LRB

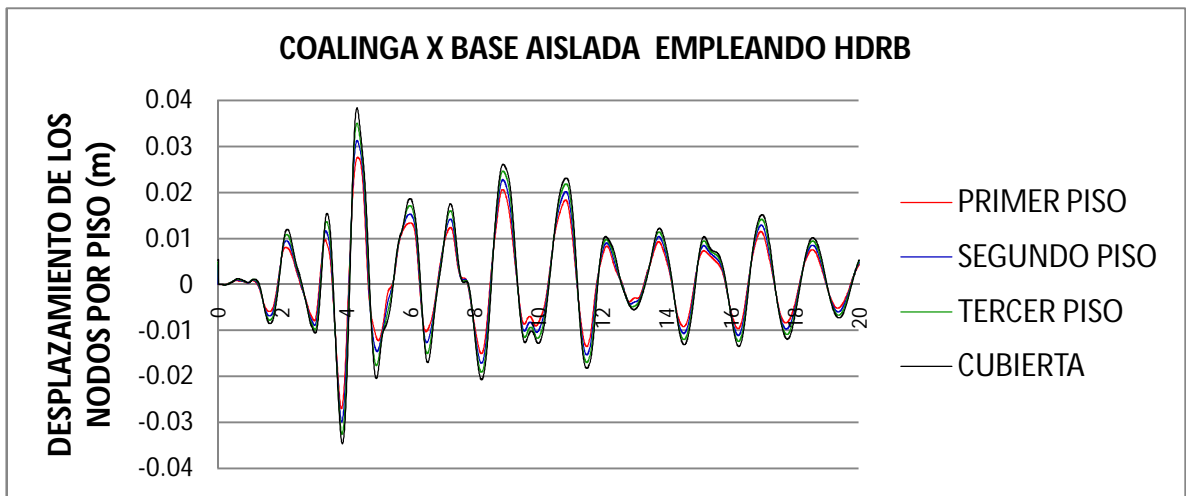


Figura 186: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo HDRB

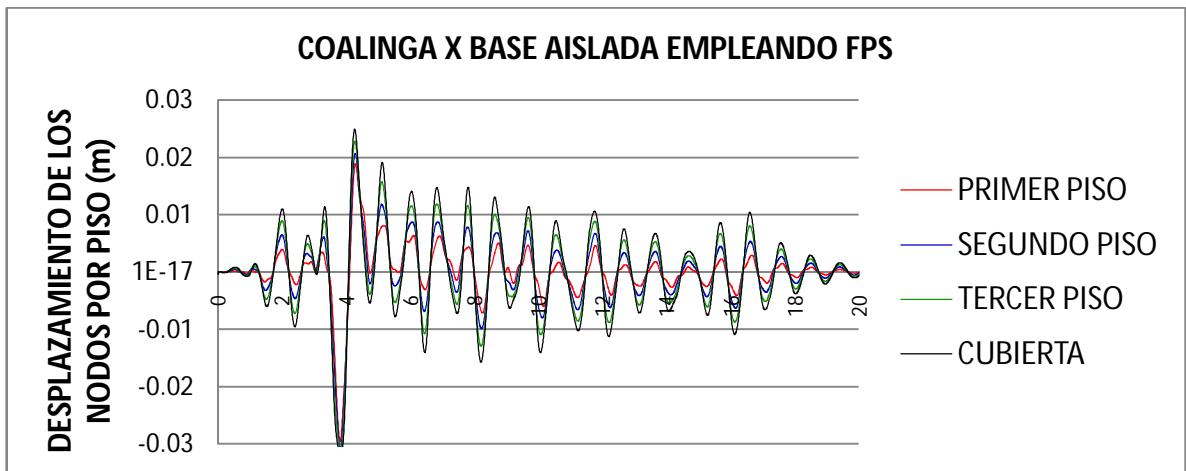


Figura 187: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo FPS.

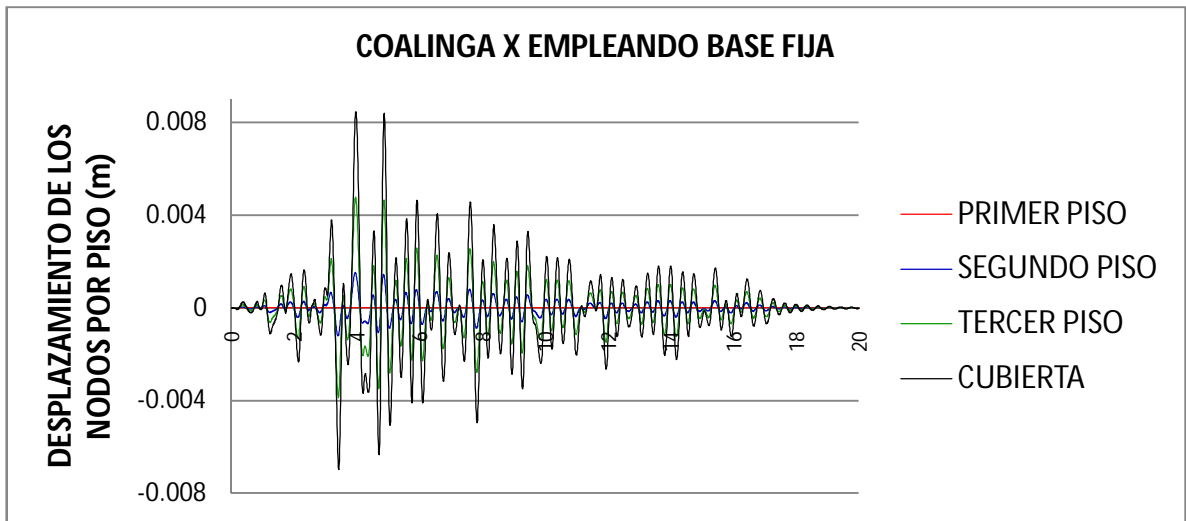
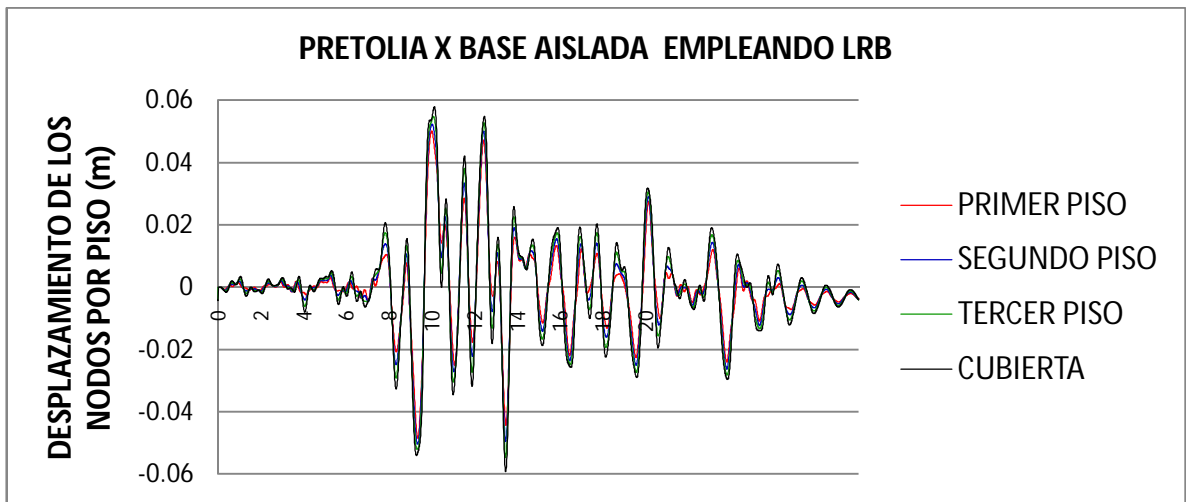
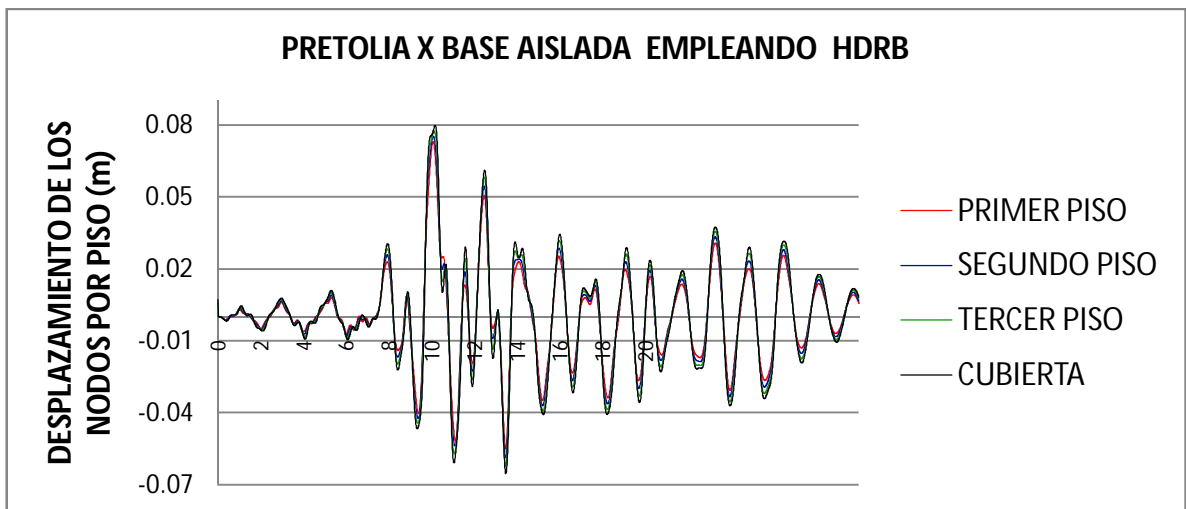


Figura 188: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo Base fija.



**Figura 189: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo LRB**



**Figura 190: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo HDRB.**

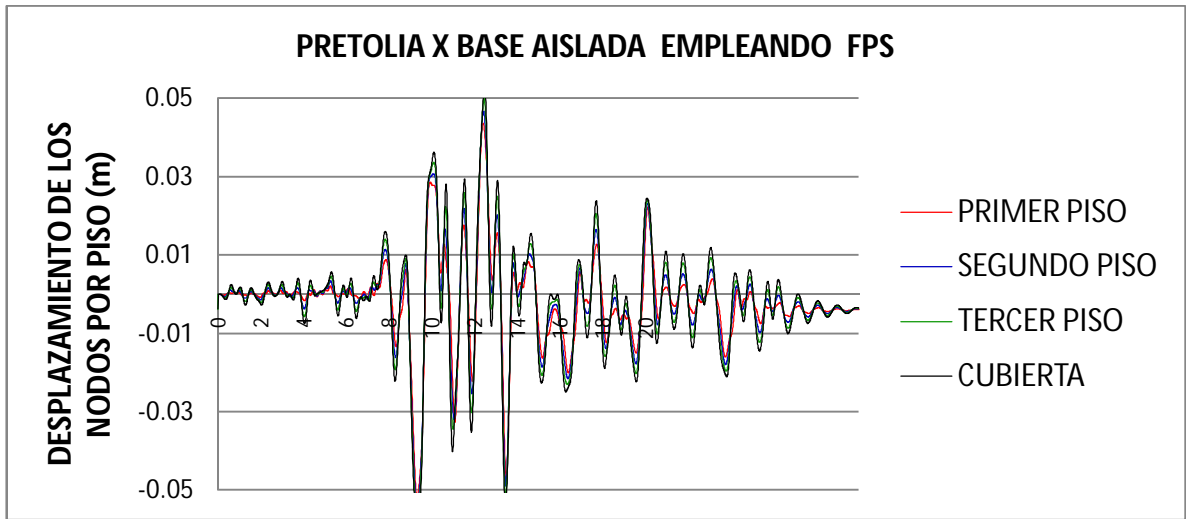


Figura 191: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo FPS.

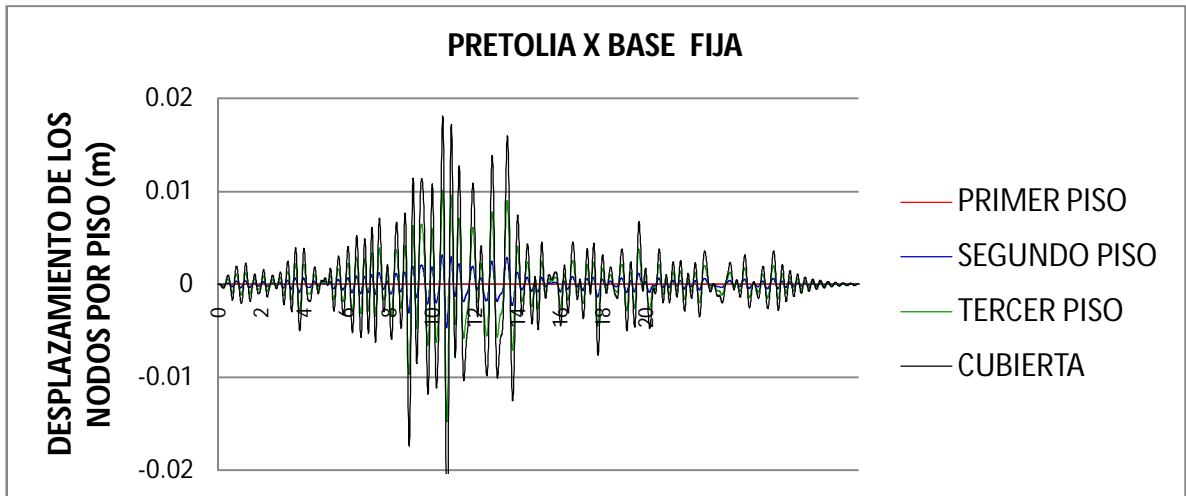


Figura 192: Desplazamiento de los nodos sobre un mismo eje vertical Vs tiempo Base fija

Nuevamente podemos ver los desplazamientos correspondientes a los nodos de una columna y su variación debida al sismo para comparar la base fija con los diferentes sistemas de aislación y observar que con un sistema de aislación se reducen las derivas. En estas graficas también se puede observar con un poco mas de detalle ya que el cortante basal que actúa en esta sollicitación es más alto, haciendo más evidente la distancia a puntos

### 12.2.5. Grafica cortante en la base vs desplazamiento.

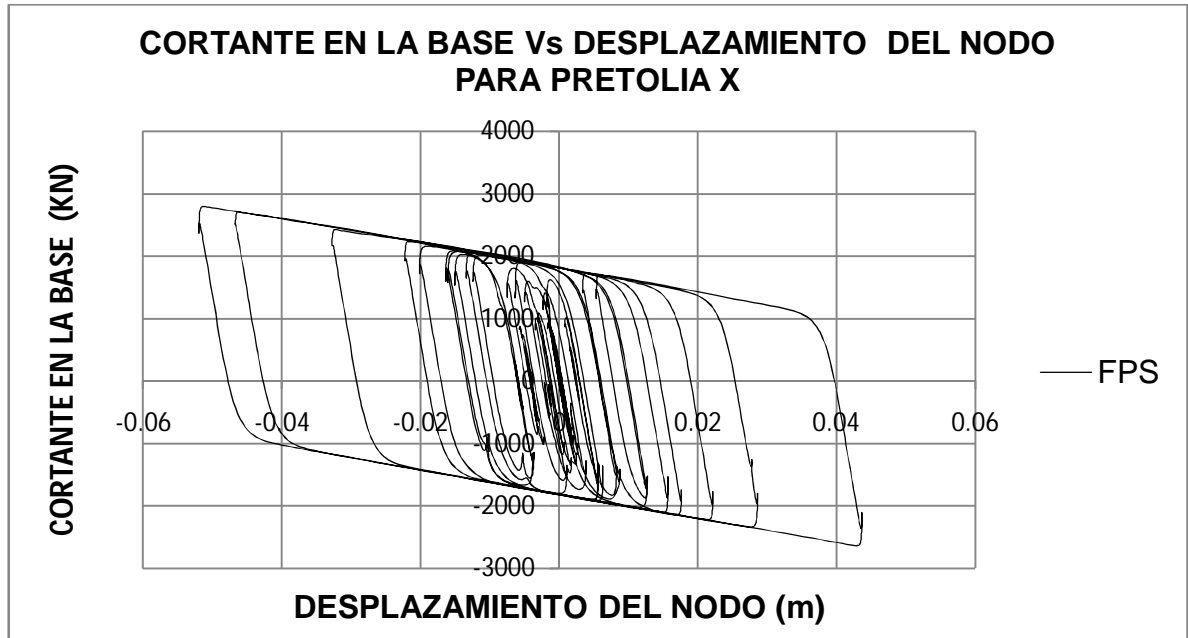
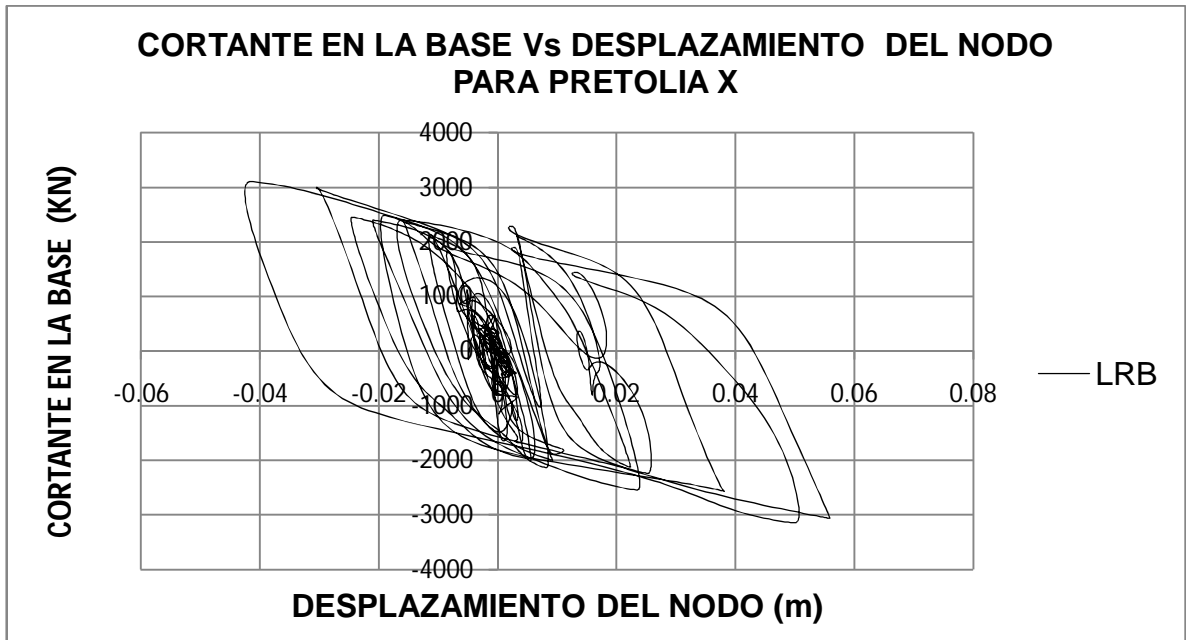


Figura 193: Cortante en la base Vs Desplazamiento de un nodo en el plano de aislación. FPS.

La variación de la fuerza cortante genera estos trazos que representan el desplazamiento del nodo estudiado durante el sismo, este comportamiento está coherente con el definido en la teoría bilineal.

Se observa que el comportamiento del aislador es no lineal.



**Figura 194: Cortante en la base Vs Desplazamiento de un nodo en el plano de aislaci3n.  
LRB.**

La variaci3n de la fuerza cortante genera estos trazos que representan el desplazamiento del nodo estudiado durante el sismo, este comportamiento esta coherente con el definido en la teor3a bilineal para el LEAD RUBER BEARING.

Se observa que el comportamiento de este tipo de dispositivo es no lineal.

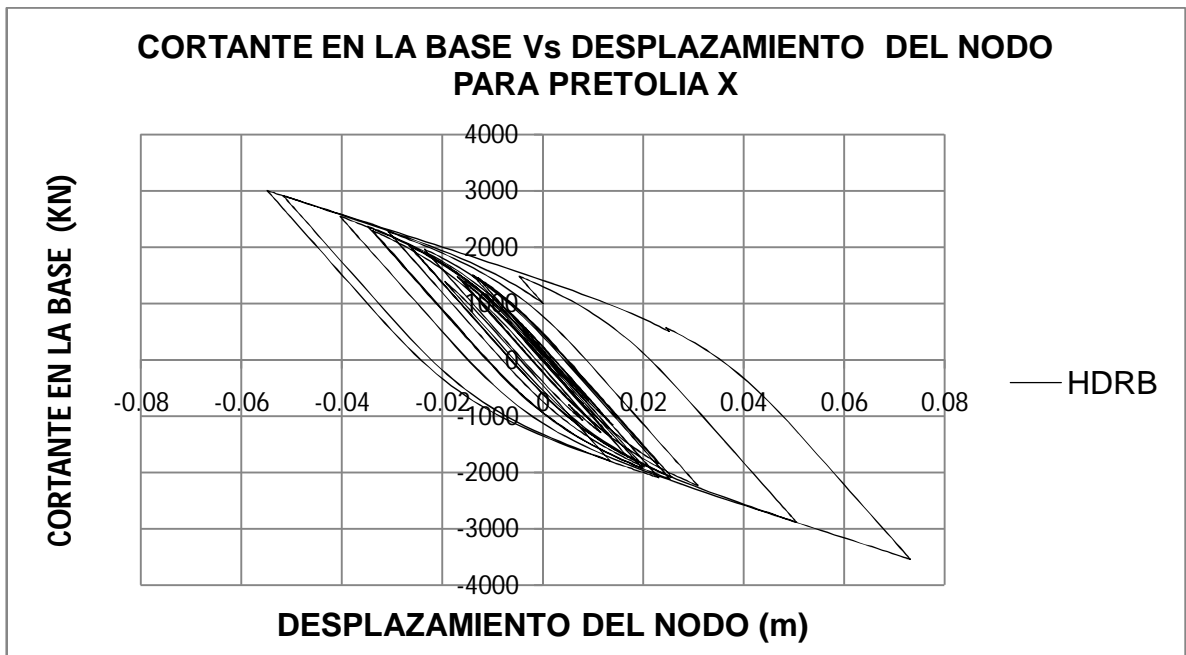
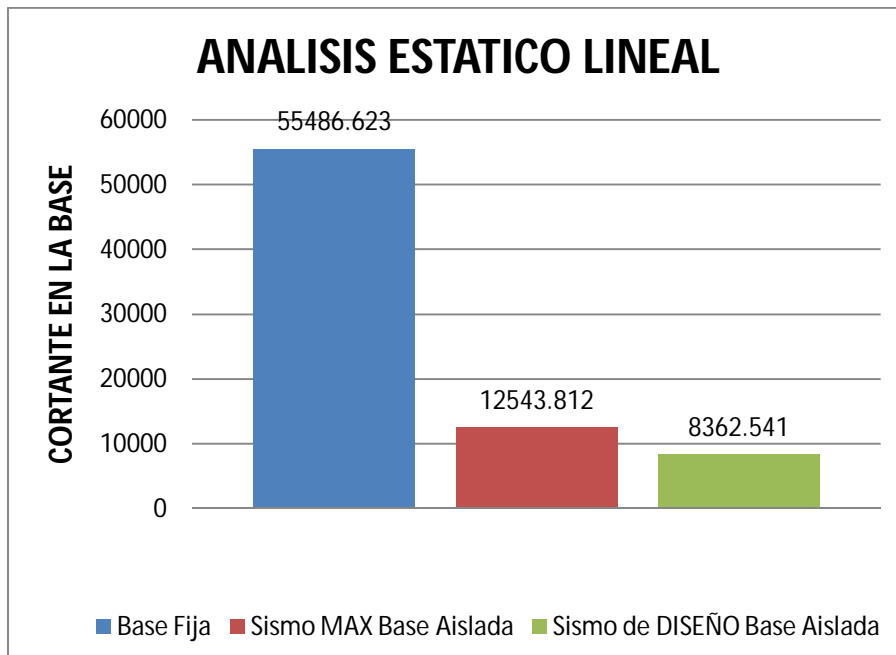


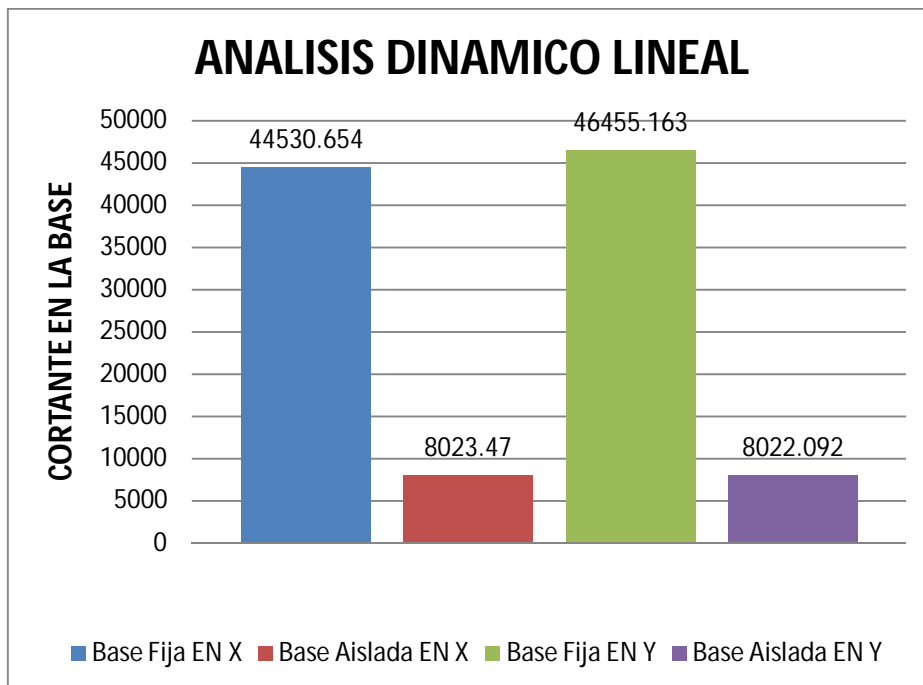
Figura 195: Cortante en la base Vs Desplazamiento de un nodo en el plano de aislación.  
HDRB.

La variación de la fuerza cortante genera estos trazos que representan el desplazamiento del nodo estudiado durante el sismo, este comportamiento está coherente con el definido en la teoría bilineal para el HDRB.

Se observa que el comportamiento de este tipo de dispositivo es no lineal, sin embargo este dispositivo se podría llegar a modelar definiéndolo como un aislador de comportamiento lineal.



**Figura 196: Comparación de análisis estático lineal Modelo 2.**



**Figura 197: Comparación de análisis dinámico lineal Modelo 2**

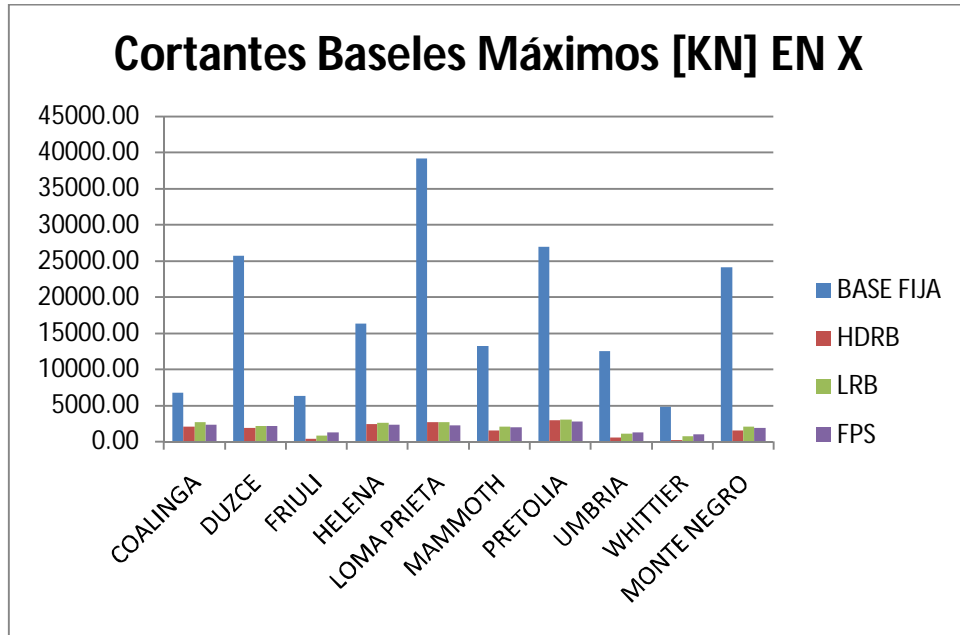


Figura 198: Cortante basal para base fija y empleando aisladores modelo 2.

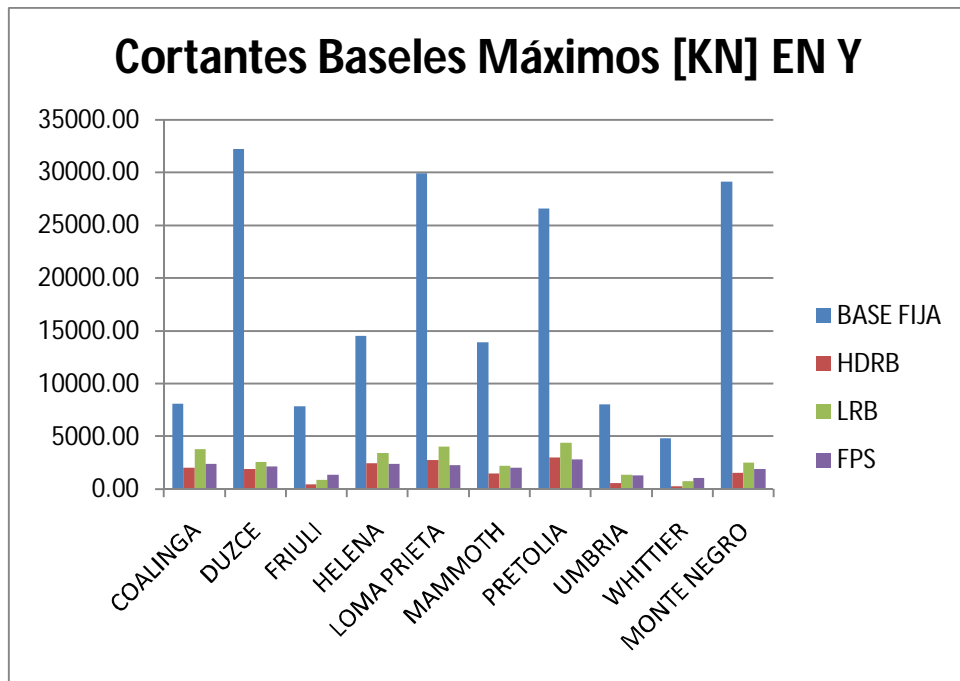


Figura 199: Cortante basal para base fija y empleando aisladores modelo 2

## CONCLUSIONES.

- Se ha determinado la reducción de la demanda sísmica en estructuras aporticadas para diferentes casos de análisis mediante la comparación de modelos con base fija y modelos con base aislada.
- Se emplearon diferentes tipos de análisis y mediante ellos se evidencio que la disipación pasiva mejora el desempeño estructural añadiendo amortiguamiento y aumentando el periodo de la estructura.
- El análisis dinámico cronológico definido para cada modelo y realizado por SAP2000, permitió mostrar el comportamiento sísmico de una estructura con base aislada.
- Al compararse la respuesta de los aisladores se puede concluir que los desplazamientos en la base son menores pero las derivas entre los pisos aumentan para los aisladores de fricción respecto a los elastoméricos.
- Al compararse la respuesta de los aisladores se puede concluir que los desplazamientos en la base son mayores pero las aceleraciones en la superestructura menores para los aisladores elastoméricos respecto de los aisladores de fricción.
- Los aisladores empleados han logrado desacoplar la estructura de los movimientos horizontales alcanzando un alto porcentaje de participación de masas en los primeros modos y logrando que la estructura se comporte en un periodo definido.

- Al emplearse los aisladores de base se disminuyen las aceleraciones en la superestructura y con esto se minimiza el riesgo de daño de los elementos no estructurales y los contenidos.
- Si el sismo es leve y no genera desplazamiento o deformación el comportamiento de estructuras será similar al de una estructura con base fija, no obstante estas fuerzas inducidas no serán suficientes para causar daos en la superestructura o en el sistema de aislación.
- El diafragma rígido ubicado sobre el sistema de aislación es fundamental para lograr que los aisladores trabajen en conjunto evitando concentrar deformaciones y esfuerzos en algunos dispositivos.
- El amortiguamiento de las estructuras permite controlar los desplazamientos, como en el caso del péndulo de fricción simple permite reducciones de cortantes al tiempo que reduce los desplazamientos
- Los sistemas de aislación son más efectivos en estructuras rígidas y de bajas alturas logrando mayores beneficios que en estructuras flexibles ya que la reducción de las fuerzas sísmicas se hace mayor para aquellas con periodos de vibración cortos.
- El diseño convencional de estructuras empleando base fija tiene limitaciones en cuanto a la reducción del daño en la estructura y a la funcionalidad de estas después de un sismo fuerte, mientras que una estructura aislada de la base supera ampliamente este desempeño.
- La reducción de la demanda sísmica para una estructura con aisladores de base, comparada con una estructura de base fija depende de la aceleración que el sismo le induzca a la estructura, es decir que para sismos de bajas

aceleraciones la reducción no será grande, mientras que en sismos de altas aceleraciones la reducción será mayor.

## BIBLIOGRAFIA.

Asociación Colombiana de ingeniería sísmica, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

CASPE, M.S. Earthquake isolation of multi-storey concrete structures, En: *J. Am. Concr. Inst.* 1970, vol. 11, pp. 923-933.

Computer and structures, CSI Analysis Reference Manual For SAP2000, ETABS, and SAFE.

CONSTANTINO, M. C., JOHN, C., and HARRIS, G. H. Frictional characteristics of Teflon –steel interfaces under dynamic conditions. *Earthquake Engineering & Structures Dynamic*, 19987, vol. 15, pp. 751-759

CONSTANTINO, M. C., MOKHA, A., and REINHORN, A. M. Teflon bearings in base isolation II: Modeling, En: *J. Struct. Engineering am. Soc. Civil Engineers*, 1990, 116, pp. 455-474

CONSTANTINO, M.C., and TADJBAKHS, I.G. Optimum characteristic of isolated structures. En: *J. Struct. Engng Am. Soc. Civ. Engrs.* 1985, vol. 111 N° 12, pp. 2733-2750.

DERHAM, C.J., KELLY, J.M., and THOMAS, A.G. Nonlinear natural rubber bearings for seismic isolation. En: *Nucl. Engng. & Design.* 1985, vol. 84, pp. 417-428.

DOWRICK, D. J., et al. Recent developments in seismic isolation in New Zealand, *10th world Conference on Earthquake Engineering, Madrid*, 1992, pp. 2305-2310

FAN, F. and AHMADI, G. Floor response spectra for base-isolated multi-storey structures. *Earthquake Engineering & Structures Dynamic*, 1990, vol. 19, pp. 377-388

FAN, F., and AHMADI, G. Random response analysis of frictional base isolation system. En: *J. Engng Mech. Am. Soc. Civ. Engrs.* 1990, vol. 116, pp. 1881-1901.

GIULIANI, G. C. Deign experience on seismically isolated buildings, *1<sup>st</sup> international Post-SMIRT conference on seismic Base isolation of Nuclear power Facilities, San Francisco*, 1989

GRANDELL, S.H., LEE, S.S., and WILLIAMS, J.H. Accumulated slip of a frictional-controlled mass excited by earthquake motions. En: *J. Appl. Mech.* 1974, vol. 14, pp. 1094-1098.

Instituto nacional de normalización, NCh2745-2003, Norma chilena, Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica, 2003

IURA, M., MATUSHI, K., and KOSAKA, I. Analytical expressions for three different modes in harmonic motion sliding structures. En: *Earthqu. Engng. & Struct. Dyn.* 1992, vol. 21, pp. 757-769.

JANGID, R.S., and DATTA, T.K. Non-linear response of torsionally coupled base isolated structure. En: *J. Struct. Engng Am. Soc. Civ. Engrs.* 1994, vol. 120, pp. 1-22.

JANGID, R.S., and DATTA, T.K. Seismic behaviour of torsionally coupled base isolated structure. En: *Eur. Earthqu. Engng.* 1992, vol. 3, pp. 2-13.

JANGID, R.S., and DATTA, T.K. Seismic response of a torsionally coupled system with a sliding support. En: *Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs.* 1993, vol. 99, pp. 271-280.

KADIR, A. (DERHAM C.J. (ed.)). Rubber properties importante in the design of bearings. En: *Int. Conf. on Natural Rubber for Earthquake Protection of Building and Vibration Isolation, Kuala Lumpur.* 1982, pp. 211-227.

KELLY, J.M. A seismic base isolation; a review and bibliography. En: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.*

KELLY, J. M. Base isolation: linear theory and design. En: *Earthquake spectra.* 1990, vol. 6, pp. 223-243

KELLY, J. M., and TSAI, H. C. Seismic response of light internal equipment in base isolated structures. *Earthquake Engineering & Structures Dynamic*, 1985, vol. 13, pp. 711-732

KELLY, J.M., and HODDER, S.B. Experimental study of lead and elastomeric damper for base isolation system in laminated neoprene bearings. En: *Bull. NZ Nat. Soc. For Earthquake Engng.* 1982, vol. 15 N° 2, pp. 53-67.

LEE, D.M Base isolation for torsion reduction in asymmetric structures under earthquake loading. En: *Earthq. Engng & Struct. Dyn.* 1980, vol. 8, pp. 349-359.

LEE, D.M., and MEDLAND, J.C. Base isolation systems for earthquake protection of multi storey shear structure. En: *Earthqu. Engng & Struct. Dyn.* 1979, vol. 7, pp. 555-568.

LUIS M. BOZZO ROTONDO, Alex H. Barbat. Diseño sismorresistente de edificios, Técnicas convencionales y avanzadas. Editorial Reverté S.A. 2000.

MOKHA, A., CONSTANTINOU, M. C., and REINHORN, A. M. Experimental study of friction-pendulum isolation system. En: *J. Struct. Engineering am. Soc. Civil Engineers*, 1991, 117-No. 4, 1201-1217

MOKHA, A., CONSTANTINOU, M. C., and REINHORN, A.M. Verification of frictional model of Teflon bearing under triaxial load. En: *J. Struct. Engineering am. Soc. Civil Engineers*, 1993, 119- No. 1, pp. 240-261

MOKHA, A., CONSTANTINOU, M. C., and REINHORN, A. M. Teflon bearings in base isolation I: Testing, En: *J. Struct. Engineering am. Soc. Civil Engineers*, 1990, 116, pp. 438-454

MORENO, DANIEL; YAMIN, L E; REYES, JUAN CARLOS, Estudio experimental de aisladores sísmicos tipo péndulo de fricción en modelos a escala reducida.

MOSTAGHEL, N., and TANBAKUCHI, J. Response of sliding structures to earthquake support motion. En: *Earthqu. Engng & Struct. Dyn.* 1983, vol. 11, pp. 355-366.

NAEIM FARZAD Ph.D S.E, KELLY JAMES M. Ph.D. DESIGN OF SEISMIC ISOLATED STRUCTURES FROM THEORY TO PRACTICE.

NAGARAJIAH, S., REINHORN, A. M., and CONSTANTINOU, M. C. Experimental study on sliding isolated structure with uplift restraint. En: *J. Struct. Engineering am. Soc. Civil Engineers*, 1992, 118, pp. 1666-1682

“NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings — Provisions and Commentary”, 2003 Edition, Federal Emergency Management Agency, FEMA 450, Building Seismic Safety Council, National Institute of Buildings Sciences, Washington, D.C., USA, 2004.

QAMARUDDIN, M., ARYA, A.S., and CHANDRA, B. Seismic response of brick buildings with sliding substructures. En: *J. Struct. Engng Am. Soc. Civ. Engrs.* 1986, vol. 112, pp. 558-572.

SIMO, J.C., and KELLY, J.M. Finite element analysis of the stability of multi-layer elastomeric bearings. En: *Engng Structs.* 1984, vol.6, pp. 3, 78-89.

SU, L., and AHMADI, G. Non-stationary earthquake response of sliding rigid structure. En: *Int. J. Engng Sci.* 1988, vol. 26, pp. 1013-1026.

SU, L., AHMADI, G., and TADJBAKHSI, I. G. Performance of sliding resilient-friction base isolation system. En: *J. Struct. Engineering am. Soc. Civil Engineers*, 1991, 117-No. 1, pp. 165-181

TADJBAKHSI, I.G., and MA, J.J: Rigid-body response of base isolated structures. En: *J. Struct. Engng Am. Soc. Civ. Engrs.* 1982, vol. 108, pp. 1806-1814.

TSAI, H. C. and KELLY, J. M. Seismic response of the superstructure and attached equipment in a base.-isolated building. *Earthquake Engineering & Structures Dynamic*, 1989, vol. 18, pp. 551-564

VESTRONI, F, et al. Dynamic behavior of isolated buildings, *10th world Conference on Earthquake Engineering, Madrid*, 1992, pp. 2473-2478

WESTERMO, B., and UDWADIA, F. Periodic response of a sliding oscillator system to harmonic excitation. En: *Earthqu. Engng & Struct. Dyn.* 1983, vol. 11, pp. 135-146.

Xavier Cahis i Carola. Desarrollo de un Nuevo disipador de energía para diseño sismo resistente. Análisis numérico y validación. Tesis Doctoral. Barcelona Octubre de 2000. *Universitat Politècnica de Catalunya.*

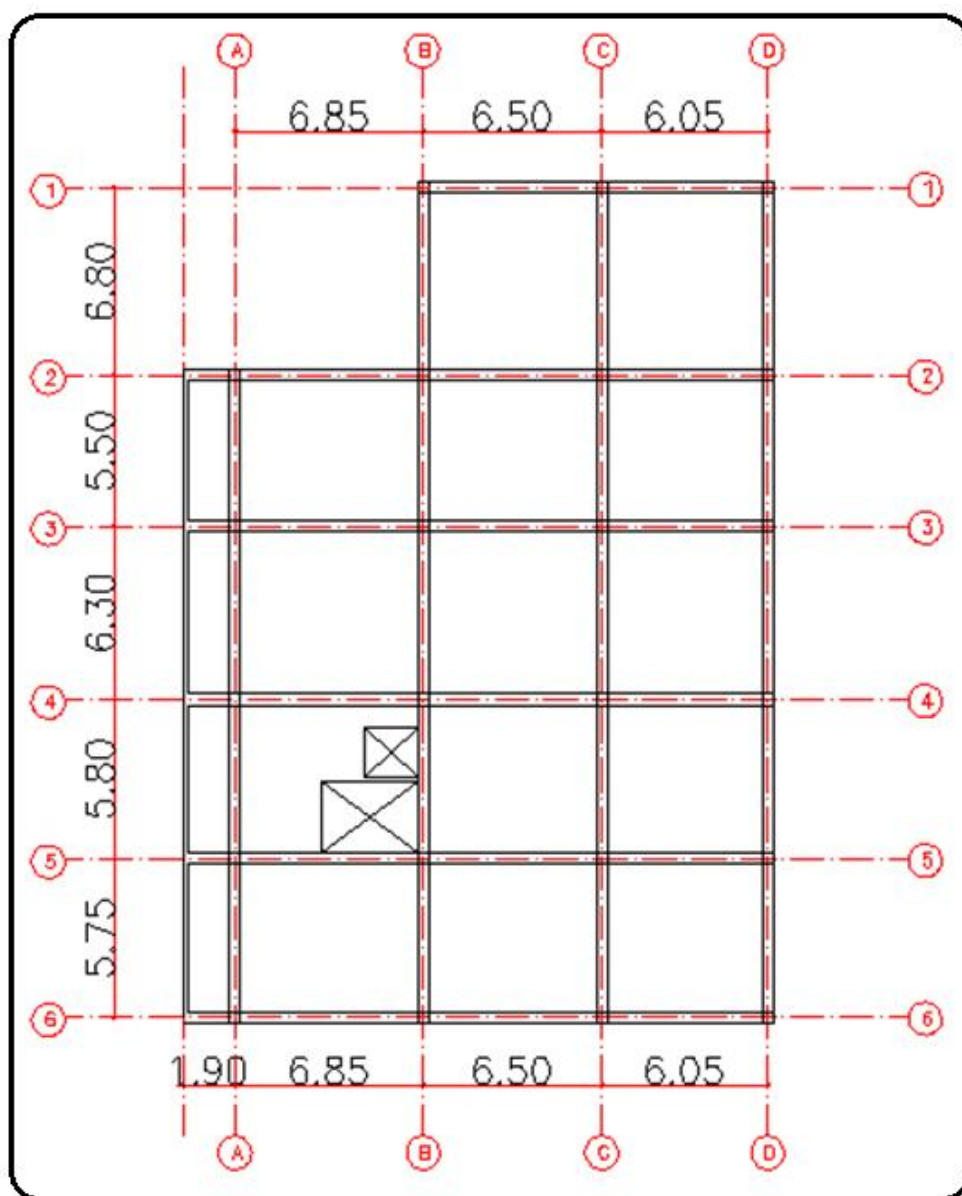
YANG, Y.B., LEE, T.Y., and TSAIR, I.C. Response of multi-degree.of.freedom structures with sliding supports. En: *Earthqu. Engng & Struct. Dyn.* 1990, vol.19, pp. 739-752.

ZAYAS, V. A., LOW, S.S., and MAHIN, S.A. A simple pendulum technique for achieving seismic isolation. En: *Earthqu. Spectra.* 1990, vol. 6, pp. 317.334.

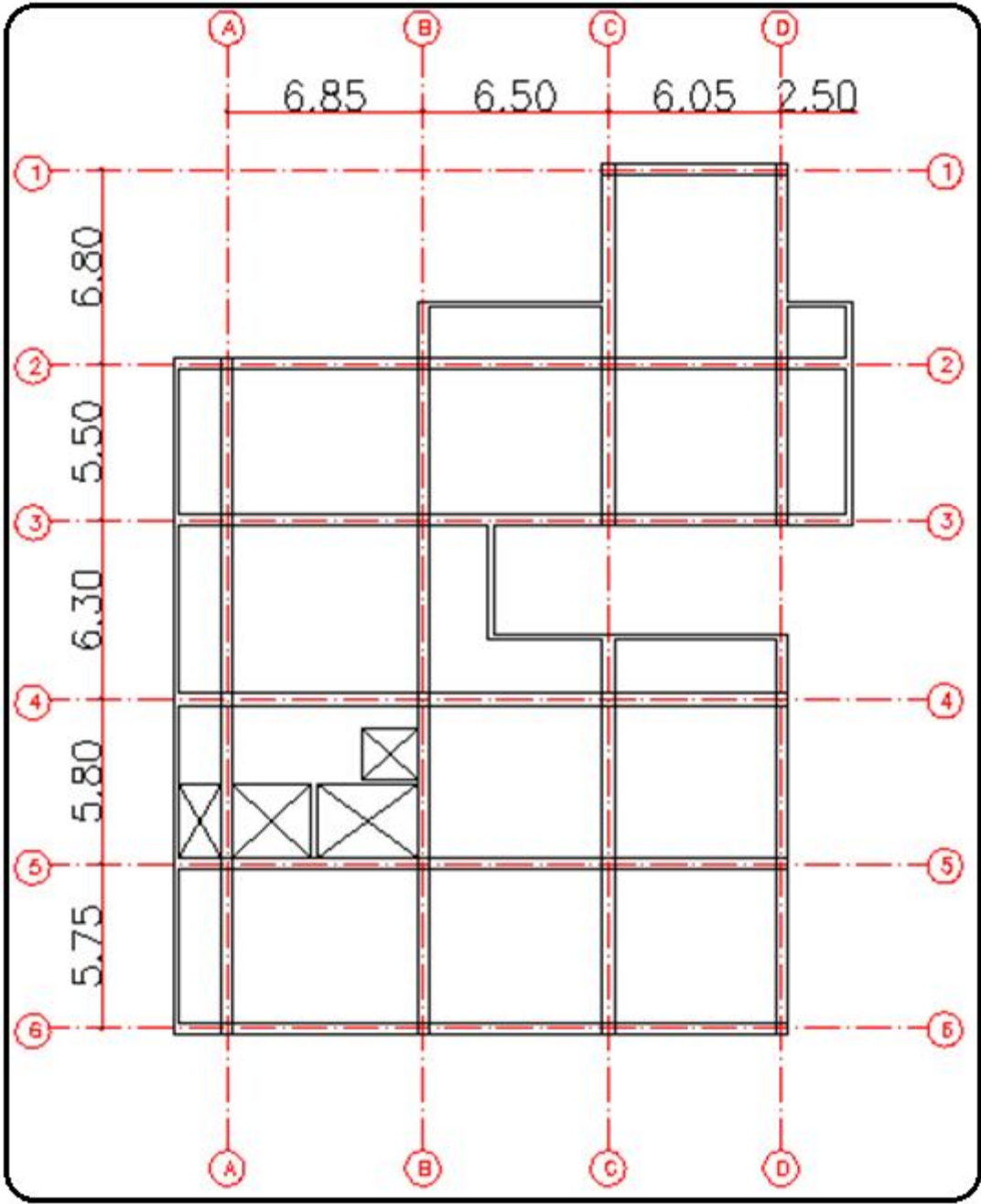
ZHOU, F. L, et al. Optimal design of seismic isolation for multi-storied buildings. *10th world Conference on Earthquake Engineering, Madrid, 1992, pp. 2449-2454*

## ANEXO A.

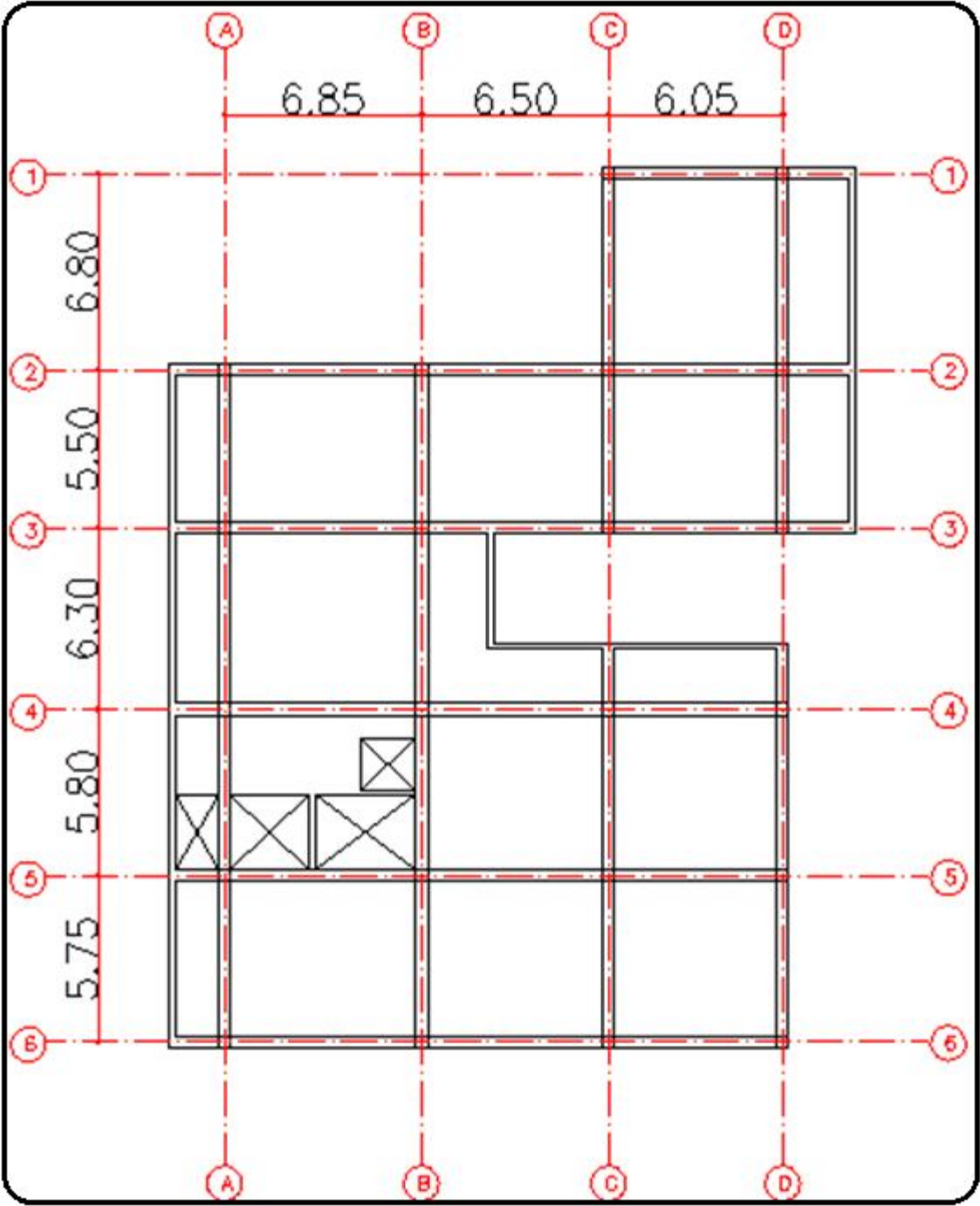
PLANTA DE DISTRIBUCIÓN DE EJES Y BORDES DE PLACA CORRESPONDIENTES AL SÓTANO Y AL PRIMER PISO.



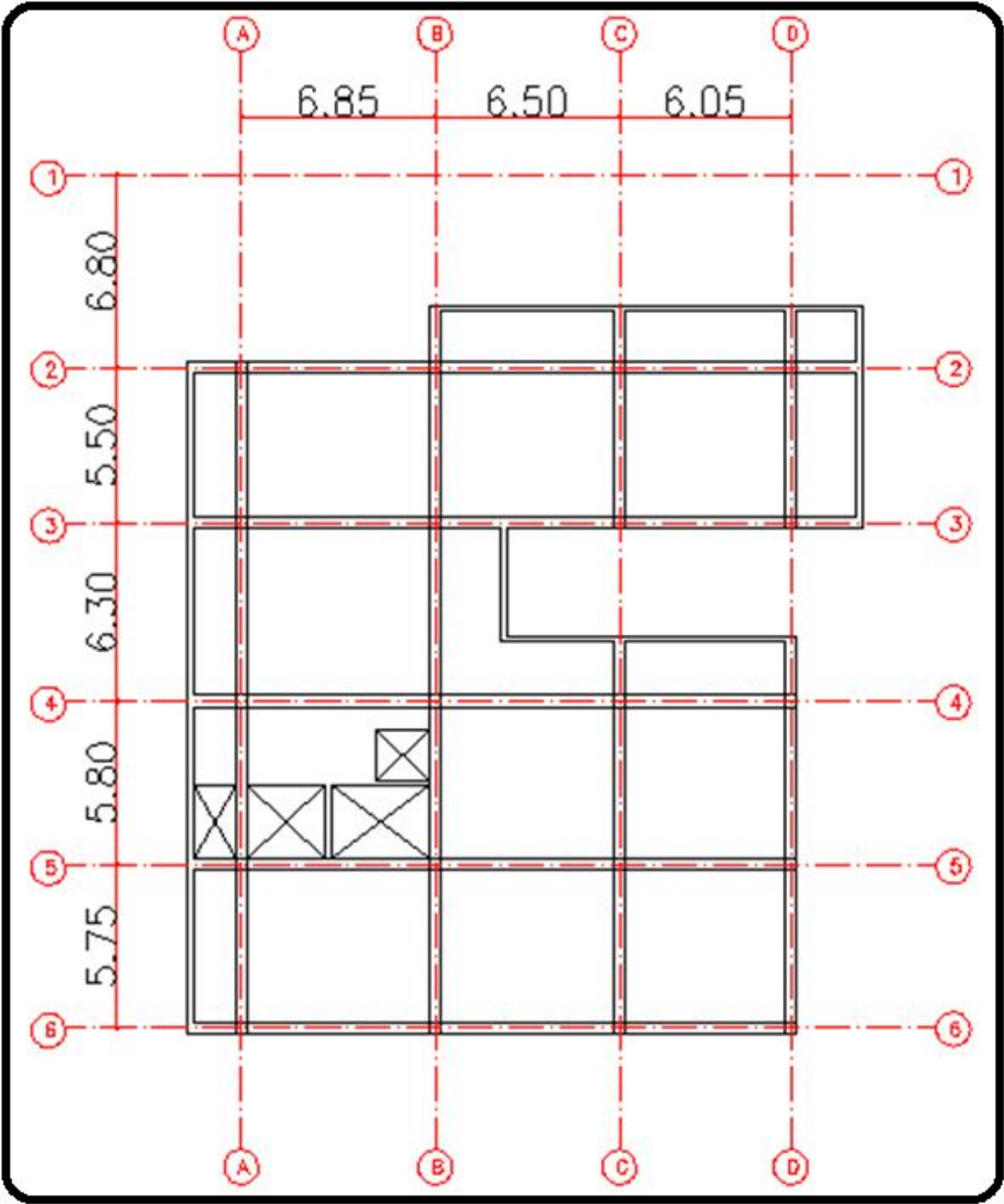
PLANTA DE DISTRIBUCIÓN DE EJES Y BORDES DE PLACA CORRESPONDIENTES AL SEGUNDO PISO.



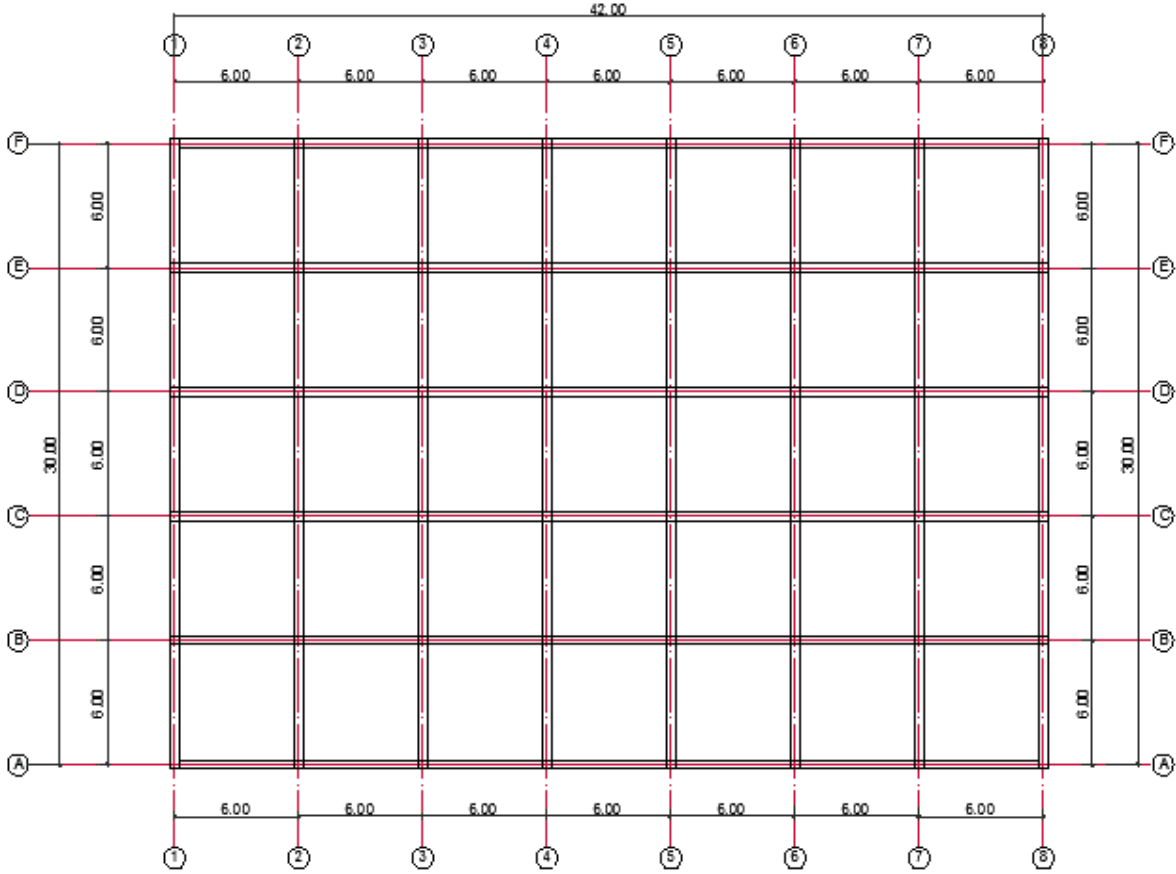
PLANTA DE DISTRIBUCIÓN DE EJES Y BORDES DE PLACA CORRESPONDIENTES AL TERCER Y CUARTO PISO



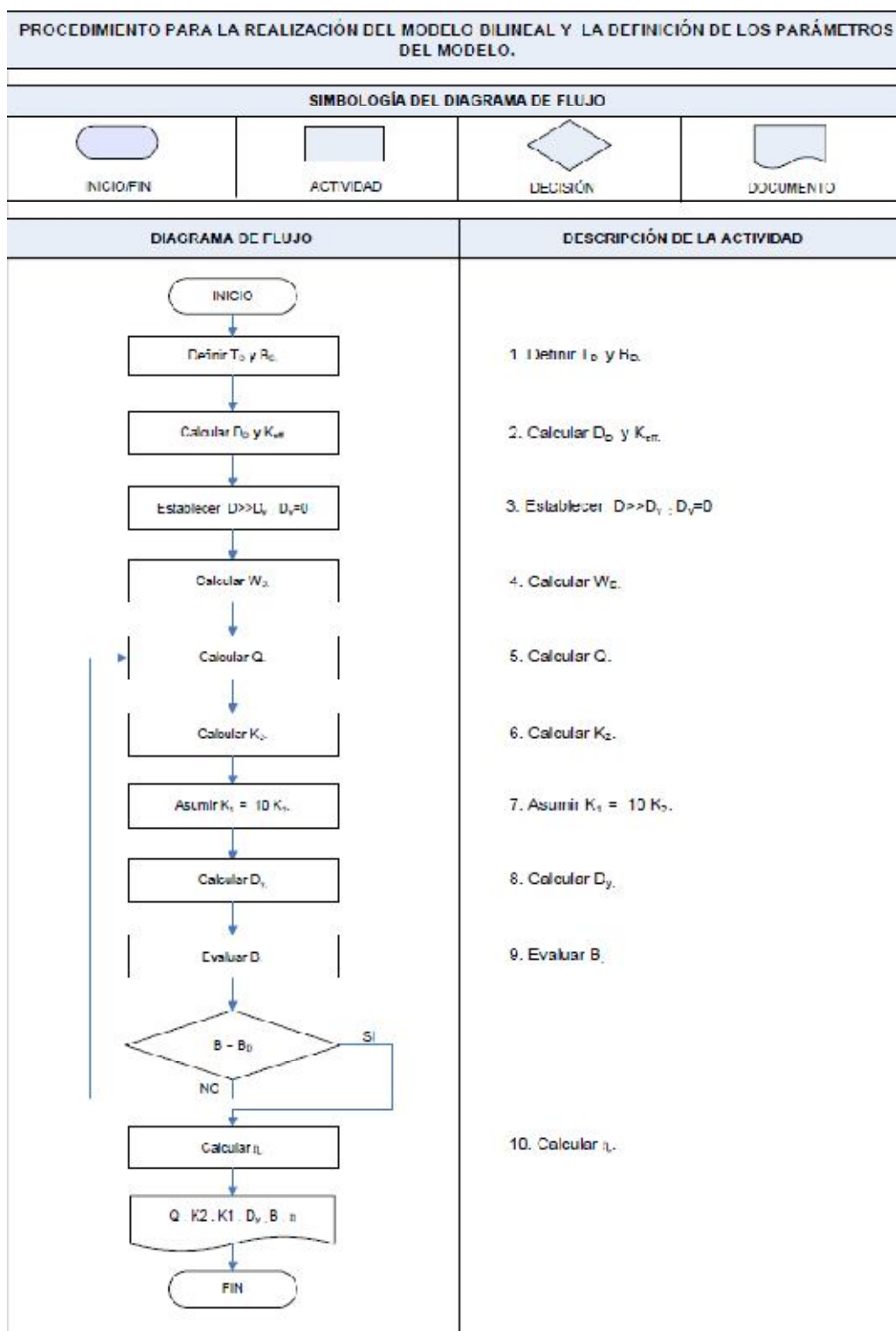
PLANTA DE DISTRIBUCIÓN DE EJES Y BORDES DE PLACA CORRESPONDIENTES A LA CUBIERTA



PLANTA DE DISTRIBUCIÓN DE EJES Y BORDES DE PLACA CORRESPONDIENTES A LAS PLANTAS Y CUBIERTA DEL MODELO 2.



## ANEXO B.



PROCEDIMIENTO PARA LA REALIZACIÓN DEL MODELO BILINEAL EMPLEANDO FPS.

SIMBOLOGÍA DEL DIAGRAMA DE FLUJO



INICIO/FIN



ACTIVIDAD



DECISIÓN

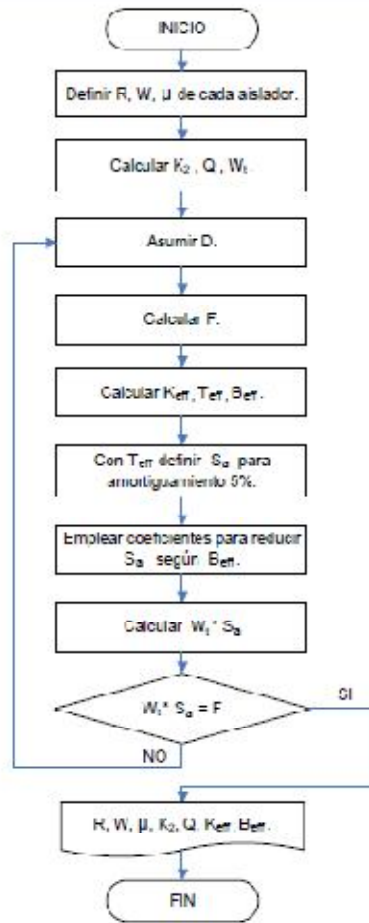


DOCUMENTO

CONVENCIONES

SIMBOLO	NOMBRE	SIMBOLO	NOMBRE	SIMBOLO	NOMBRE
$\mu$	Tensión.	$K_2$	Rigidez Plástica.	$T_{ef}$	Periodo Efectivo.
R	Radio.	Q	Fuerza Característica.	$B_{ef}$	Amortiguamiento Efectivo
W	Peso en cada aislador.	D	Desplazamiento del Sistema.	$S_d$	Aceleración Espectral.
$W_T$	Peso total	$K_{ef}$	Rigidez Efectiva.	F	Fuerza en el Sistema

DIAGRAMA DE FLUJO



DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

1. Definir R, W,  $\mu$  de cada aislador.
2. Calcular  $K_2$ , Q,  $W_T$ .
3. Asumir D.
4. Calcular F.
5. Calcular  $K_{ef}$ ,  $T_{ef}$ ,  $B_{ef}$ .
6. Con  $T_{ef}$  definir  $S_d$  para amortiguamiento 5%.
7. Emplear coeficientes para reducir  $S_d$  según  $B_{ef}$ .
8. Calcular  $W_T * S_d$ .