



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN  
INGENIERÍA EN EL ÁREA DE  
ESTRUCTURAS**

***“Uso de dispositivos de control para edificios en zonas de  
moderada y alta sismicidad”***

**TESIS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS**

**PRESENTA**

***Ing. Esteban Josué Hernández Mazariegos***

**ASESOR**

***Dr. José Manuel Jara Guerrero***

***Morelia, Michoacán, mayo del 2019***



## AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amigos por su confianza y apoyo. A mis maestros y compañeros por su paciencia y enseñanzas. Al Doctor José Manuel Jara Guerrero y a la Doctora Bertha Alejandra Olmos Navarrete, por el tiempo que invirtieron en este trabajo y compartir generosamente su conocimiento. A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al CONACYT.



## ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	2
ÍNDICE.....	3
ÍNDICE DE TABLAS .....	5
ÍNDICE DE FIGURAS .....	5
RESUMEN. ....	12
ABSTRACT .....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE DISIPADORES DE ENERGÍA Y AISLADORES SÍSMICOS. ....	14
1.1. Una alternativa viable para reducir el costo de los terremotos. ....	14
1.2. Investigación y aplicaciones en México. ....	18
1.3. Teoría para disipadores de energía por fluencia de material. ....	19
1.4. Teoría para aislamiento sísmico mediante apoyos laminados con núcleo de plomo. ....	20
1.5. Aspecto normativo.....	22
2. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA SÍSMICA EN MÉXICO COMO FUNCIÓN DE LA LOCALIZACIÓN Y TIPO DE FUENTE SÍSMICA. ....	24
2.1. Procedimiento para la selección de registros sísmicos.....	27
2.2. Criterio de escalamiento de registros sísmicos.....	29
3. MODELOS DE LOS EDIFICIOS A ESTUDIAR.....	37
3.1. Sistemas estructurales .....	37
3.2. Estructuración general. ....	38
3.3. Sistema de piso. ....	40
3.4. Filosofía de diseño sísmico basada en fuerzas.....	42
3.5. Análisis y dimensionamiento del sistema a base de marcos. ....	42
3.6. Análisis y dimensionamiento del sistema con contravientos. ....	60
4. DISEÑO DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES CON DISPOSITIVOS DE CONTROL.....	62
4.1. Análisis y dimensionamiento del sistema con aislamiento de base. ....	62
4.2. Análisis y dimensionamiento del sistema con disipadores.....	68
5. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES.....	77
5.1. Características del modelo y análisis no lineal.....	77
5.2. Software utilizado. ....	77
5.3. Articulaciones plásticas.....	78



5.4.	Periodos fundamentales de los modelos estructurales.....	79
5.5.	Demanda de distorsión y cortante.....	84
5.6.	Demanda de velocidad y aceleración.....	93
5.7.	Demanda de ductilidad en los disipadores.....	102
5.8.	Demanda de ductilidad en los aisladores.....	105
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	111
6.1.	Demandas normalizadas grupo G1.....	112
6.2.	Demandas normalizadas grupo G2.....	114
6.3.	Demandas normalizadas grupo G3.....	116
6.4.	Demandas normalizadas grupo G4.....	118
6.5.	Demandas normalizadas grupo G5.....	120
6.6.	Demandas normalizadas grupo G6.....	122
6.7.	Demandas normalizadas grupo G7.....	124
6.8.	Demandas normalizadas grupo G8.....	126
6.9.	Sensibilización sobre los resultados.....	128
6.10.	Mapas de demandas.....	130
7.	CONCLUSIONES .....	133
8.	REFERENCIAS.....	135
	ANEXO. Código Matlab para la extracción de datos del PERFORM.....	138



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Costo en millones de dólares debido a sismos fuertes en las últimas décadas. ....	14
Tabla 2. Investigaciones analíticas realizadas en México. ....	18
Tabla 3. Tipos de suelo considerados como terreno duro para la depuración de los registros. ....	28
Tabla 4. Registros seleccionados para eventos de subducción. ....	30
Tabla 5. Relación de los modelos y sitios de estudio. ....	47
Tabla 6. Tabla de reacciones en la base de las columnas bajo carga de servicio. ....	62
Tabla 7. Resumen de iteraciones para hacer coincidir los desplazamientos. ....	66
Tabla 8. Comparación de resultados considerando distintas relaciones de resistencia. ....	69
Tabla 9. Propuestas de estados límite de daño basados en distorsión angular. ....	84
Tabla 10. Demanda normalizada para los ocho grupos de edificios. ....	128
Tabla 11. Demanda normalizada para los ocho grupos de edificios, aplicando escala de color ....	129
Tabla 12. Demanda normalizada para los ocho grupos de edificios, ordenados con respecto a T/Tdom. ....	129

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Crecimiento de aplicaciones de sistemas de control en China. ....	17
Figura 2. Cantidad de edificios con aisladores de base en los países más activos (datos a septiembre del 2013) (imagen tomada de Martelli et al. 2014). ....	18
Figura 3. Espectros de diseño para una estructura fija en su base y para una estructura asilada, en terreno firme y en terreno blando. ....	21
Figura 4. Modelo bilineal de comportamiento histerético. ....	22
Figura 5. Curvas de nivel de profundidad de la placa que subduce. ( <a href="http://www.tectonics.caltech.edu/outreach/highlights/mase/">http://www.tectonics.caltech.edu/outreach/highlights/mase/</a> ). ....	24
Figura 6. Sección epicentral perpendicular a la trinchera mesoamericana. El hipocentro del sismo se representa con una estrella roja, los puntos negros son hipocentros de otros eventos sísmicos en la región. ....	25
Figura 7. Sección epicentral perpendicular a la trinchera mesoamericana. El hipocentro del sismo principal se representa con un círculo-estrella azul y se observan las tendencias de dos fallas paralelas casi verticales. Los puntos negros son hipocentros de otros. ....	26
Figura 8. Geometría de las zonas de subducción y ubicación de los principales sismos normales. ( <a href="http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/images/EQ_map_2013_es_clear.jpg">http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/images/EQ_map_2013_es_clear.jpg</a> ). ....	27
Figura 9. Localización de los epicentros del conjunto de 5 873 registros. ....	28
Figura 10. Epicentros de sismos con magnitud mayor que 6, distancias a la línea de contacto considerada. ....	31
Figura 11. Mapa de intensidades de diseño PRODISIS, grupos y ubicación de los principales centros urbanos en estudio. ....	32
Figura 12. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 1, sin escala (izquierda) y escalados (derecha). ....	33
Figura 13. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 2, sin escala (izquierda) y escalados (derecha). ....	33
Figura 14. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 3, sin escala (izquierda) y escalados (derecha). ....	34



Figura 15. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 4, sin escala (izquierda) y escalados (derecha).....	34
Figura 16. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 5, sin escala (izquierda) y escalados (derecha).....	35
Figura 17. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 6, sin escala (izquierda) y escalados (derecha).....	35
Figura 18. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 7, sin escala (izquierda) y escalados (derecha).....	36
Figura 19. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 8, sin escala (izquierda) y escalados (derecha).....	36
Figura 20. Sistema estructural a base de marcos (izquierda) y a base de marcos con contravientos (derecha).....	37
Figura 21. sistema estructural con disipadores (izquierda) y con aislamiento de base (derecha).....	38
Figura 22. Estructuración en planta.....	39
Figura 23. Estructuración en elevación para los edificios con contravientos.....	39
Figura 24. Hoja de diseño para losa de azotea.....	40
Figura 25. Hoja de diseño para losa de entrepiso.....	41
Figura 26. Procedimiento de diseño y refinamiento.....	42
Figura 27. Mecanismo de colapso para el edificio en la primera etapa.....	43
Figura 28. Mecanismo de colapso para el edificio en la segunda etapa.....	44
Figura 29. Mecanismo de colapso para el edificio en la tercera etapa.....	44
Figura 30. Comparación de curvas de capacidad para el sistema en las tres etapas de diseño.....	45
Figura 31. Interface del programa PRODISIS y espectros de diseño.....	47
Figura 32. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo PE-10.....	48
Figura 33. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo SC-10.....	49
Figura 34. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo OAX-10.....	50
Figura 35. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo HUA-10, TEH-10, PUE-10, COR-10 y XAL-10.....	51
Figura 36. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo PE-05.....	52
Figura 37. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo SC-05.....	53
Figura 38. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo OAX-05.....	54
Figura 39. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo HUA-05, TEH-05, PUE-05, COR-05 y XAL-05.....	55
Figura 40. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo PE-02.....	56
Figura 41. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo SC-02.....	57



Figura 42. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo OAX-02. ....	58
Figura 43. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo HUA-02, TEH-02, PUE-02, COR-02 y XAL-02. ....	59
Figura 44. Mecanismo de colapso para un sistema con contravientos (izquierda y sin contravientos (derecha). ....	60
Figura 45. Curva de capacidad para el sistema con contravientos y sin contravientos. ....	61
Figura 46. Tabla 4. Espectro de diseño modificado por el factor de amortiguamiento equivalente. ....	65
Figura 47. Resumen de diseño para los aisladores de los edificios en Puerto Escondido y Salina Cruz. ....	68
Figura 48. Resumen de diseño para los aisladores de los edificios en Oaxaca y Huajimalpan. ....	68
Figura 49. Comparación de curva de capacidad del análisis simplificado y el análisis estático no lineal. ....	69
Figura 50. Curva de capacidad del conjunto sistema-disipador. ....	70
Figura 51. Croquis de dispositivo disipador TADAS. ....	74
Figura 52. Disposición de placas para los edificios de Puerto Escondido. ....	74
Figura 53. Disposición de placas para los edificios de Salina Cruz. ....	75
Figura 54. Disposición de placas para los edificios de Oaxaca. ....	75
Figura 55. Disposición de placas para los edificios de Huajupán de León. ....	76
Figura 56. Etapas principales del modelado en PERFORM 3D. ....	78
Figura 57. Deformaciones aproximadas para definir la envolvente tri-lineal de los elementos estructurales. ....	78
Figura 58. Factores de degradación para los elementos estructurales. ....	78
Figura 59. Comparación de lazos histeréticos de una prueba experimental y del modelo idealizado. ....	79
Figura 60. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios PE-10. ....	80
Figura 61. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios PE-05. ....	80
Figura 62. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios PE-02. ....	80
Figura 63. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios SC-10. ....	81
Figura 64. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios SC-05. ....	81
Figura 65. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios SC-02. ....	81
Figura 66. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios OAX-10. ....	82
Figura 67. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios OAX-05. ....	82
Figura 68. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios OAX-02. ....	82
Figura 69. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios HUA-10. ....	83
Figura 70. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios HUA-05. ....	83
Figura 71. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios HUA-02. ....	83
Figura 72. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos de los modelos PE-10. ....	85
Figura 73. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo PE-05. ....	85
Figura 74. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo PE-02. ....	85
Figura 75. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo SC-10. ....	86
Figura 76. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo SC-05. ....	86
Figura 77. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo SC-02. ....	86



Figura 78. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo OAX-10.....	87
Figura 79. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo OAX-05.....	87
Figura 80. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo OAX-02.....	87
Figura 81. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo HUA-10. ....	88
Figura 82. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo HUA-05. ....	88
Figura 83. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo HUA-02. ....	88
Figura 84. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo TEH-10. ....	89
Figura 85. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo TEH-05. ....	89
Figura 86. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo TEH-02. ....	89
Figura 87. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo PUE-10. ....	90
Figura 88. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo PUE-05. ....	90
Figura 89. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo PUE-02. ....	90
Figura 90. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo COR-10.....	91
Figura 91. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo COR-05.....	91
Figura 92. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo COR-02.....	91
Figura 93. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo XAL-10.....	92
Figura 94. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo XAL-05.....	92
Figura 95. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo XAL-02.....	92
Figura 96. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo PE-10. ....	94
Figura 97. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo PE-05. ....	94
Figura 98. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo PE-05. ....	94
Figura 99. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo SC-10. ....	95
Figura 100. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo SC-05. ....	95
Figura 101. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo SC-02. ....	95
Figura 102. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo OAX-10. ....	96
Figura 103. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo OAX-05. ....	96
Figura 104. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo OAX-02. ....	96
Figura 105. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo HUA-10. ....	97
Figura 106. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo HUA-05. ....	97
Figura 107. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo HUA-02. ....	97
Figura 108. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo TEH-10. ....	98
Figura 109. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo TEH -05. ....	98
Figura 110. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo TEH -02. ....	98
Figura 111. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo PUE-10.....	99
Figura 112. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo PUE-05.....	99
Figura 113. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo PUE-02.....	99
Figura 114. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo COR-10. ....	100
Figura 115. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo COR-05. ....	100
Figura 116. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo COR-02. ....	100
Figura 117. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo XAL-10. ....	101
Figura 118. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo XAL-05. ....	101
Figura 119. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo XAL-02. ....	101
Figura 120. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos PE-10, PE-05 y PE-02.....	102
Figura 121. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos SC-10, SC-05 y SC-02.....	102



Figura 122. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos OAX-10, OAX-05 y OAX-02.....	103
Figura 123. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos HUA-10, HUA-05 y HUA-02.....	103
Figura 124. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos TEH-10, TEH-05 y TEH-02.....	103
Figura 125. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos PUE-10, PUE-05 y PUE-02.....	104
Figura 126. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos COR-10, COR-05 y COR-02.....	104
Figura 127. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos XAL-10, XAL-05 y XAL-02.....	104
Figura 128. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo PE-10.....	105
Figura 129. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo PE-05.....	105
Figura 130. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo PE-02.....	105
Figura 131. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo SC-10.....	106
Figura 132. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo SC-05.....	106
Figura 133. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo SC-02.....	106
Figura 134. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo OAX-10.....	106
Figura 135. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo OAX-05.....	106
Figura 136. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo OAX-02.....	107
Figura 137. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo HUA-10.....	107
Figura 138. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo HUA-05.....	107
Figura 139. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo HUA-02.....	107
Figura 140. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo TEH-10.....	108
Figura 141. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo TEH-05.....	108
Figura 142. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo TEH-02.....	108
Figura 143. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo PUE-10.....	108
Figura 144. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo PUE-05.....	109
Figura 145. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo PUE-02.....	109
Figura 146. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo COR-10.....	109
Figura 147. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo COR-05.....	109
Figura 148. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo COR-02.....	110
Figura 149. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo XAL -10.....	110
Figura 150. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo XAL -05.....	110
Figura 151. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo XAL-02.....	110
Figura 152. Cortante basal.....	112
Figura 153. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha).....	112
Figura 154. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha).....	112
Figura 155. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles.....	113
Figura 156. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles.....	113
Figura 157. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles.....	113
Figura 158. Cortante basal.....	114
Figura 159. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha).....	114
Figura 160. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha).....	114
Figura 161. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles.....	115



Figura 162. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles. ....	115
Figura 163. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles. ....	115
Figura 164. Cortante basal. ....	116
Figura 165. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha). ....	116
Figura 166. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha). ....	116
Figura 167. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles. ....	117
Figura 168. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles. ....	117
Figura 169. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles. ....	117
Figura 170. Cortante basal. ....	118
Figura 171. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha). ....	118
Figura 172. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha). ....	118
Figura 173. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles. ....	119
Figura 174. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles. ....	119
Figura 175. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles. ....	119
Figura 176. Cortante basal. ....	120
Figura 177. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha). ....	120
Figura 178. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha). ....	120
Figura 179. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles. ....	121
Figura 180. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles. ....	121
Figura 181. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles. ....	121
Figura 182. Cortante basal. ....	122
Figura 183. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha). ....	122
Figura 184. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha). ....	122
Figura 185. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles. ....	123
Figura 186. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles. ....	123
Figura 187. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles. ....	123
Figura 188. Cortante basal. ....	124
Figura 189. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha). ....	124
Figura 190. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha). ....	124



Figura 191. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles. ....	125
Figura 192. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles. ....	125
Figura 193. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles. ....	125
Figura 194. Cortante basal. ....	126
Figura 195. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha). ....	126
Figura 196. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha). ....	126
Figura 197. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles. ....	127
Figura 198. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles. ....	127
Figura 199. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles. ....	127
Figura 200. Demanda normalizada de cortante basal (izquierda) y de cortante en las columnas (derecha) para el sistema con contravientos. ....	131
Figura 201. Demanda normalizada de cortante basal (izquierda) y de cortante en las columnas (derecha) para el sistema con aislamiento de base. ....	131
Figura 202. Demanda normalizada de cortante basal (izquierda) y de cortante en las columnas (derecha) para el sistema con disipadores. ....	132
Figura 203. (a) Demanda normalizada de distorsión en sistema con contraviento, (b) del sistema aislado y (c) del sistema con disipadores. ....	132



## RESUMEN.

En el presente trabajo se estudia la eficiencia de contravientos y dos tipos de dispositivos de control (disipadores histeréticos y aisladores de base) colocados en edificios de concreto soportados por marcos resistentes a momento. Las variables principales del estudio son: la altura del edificio y su distancia a la trinchera de subducción entre la Placa del Pacífico y la Placa Norteamericana. Se determinaron ocho zonas, cada una con ancho de 50 kilómetros, la primera zona se encuentra a menos de 50 kilómetros de la trinchera, y la octava a más de 350 kilómetros. Para cada zona, se analizaron 12 edificios regulares (cuatro sistemas estructurales y tres alturas), sometiéndolos a un conjunto de 28 acelerogramas representativos del peligro sísmico de la zona. Un total de 96 edificios, 224 registros sísmicos y 2688 análisis no lineales. Finalmente se comparan los valores máximos de demanda de distorsión angular, fuerza cortante, velocidad y aceleración de cada entrepiso, como función de la altura de los edificios y de la distancia a la trinchera de subducción, y se discuten los resultados.

## ABSTRACT

In the present work, the efficiency of braces and two types of control devices (hysteretic dampers and base isolators) placed in concrete moment resistant frame buildings is studied. The main variables of the study are: the building height and the epicentral distance of the subduction trench in Mexico to the buildings location. Eight seismic zones, 50 kilometers wide were analyzed. The first seismic zone is located less than 50 kilometers from the trench, and the eighth one is situated more than 350 kilometers away. For each zone, 12 regular buildings (four structural systems and three heights) are subjected to a group of 28 accelerograms representing the seismic hazard of the area. A total of 96 buildings, 224 seismic records and 2688 non-linear analyses were carried out. Finally, maximum demands of drift ratio, shear force, velocity and acceleration are analyzed and discussed.

**PALABRAS CLAVE:** Marcos de concreto, contravientos, aisladores de base, disipadores, acelerogramas.



## INTRODUCCIÓN

Las enormes pérdidas anuales que produce la ocurrencia de temblores en el mundo han mostrado que la filosofía actual de diseño y las estructuraciones tradicionales de edificios, conducen a daños mayores a los esperados por los reglamentos de construcción. Por ello, desde hace algunas décadas se ha iniciado el desarrollo de sistemas de control pasivo. En el presente trabajo se realiza una comparación del comportamiento de tres tipologías de edificios regulares:

- Con base empotrada (como generalmente se analizan y diseñan en la práctica).
- Con base empotrada y disipadores de energía tipo TADAS.
- Con aislamiento de base, mediante apoyos de elastómero con núcleo de plomo.

Modificando la altura del edificio, se analizan tres diferentes periodos fundamentales de vibración para cada tipología, con lo que se abarca las tres zonas características del espectro (zona sensible a aceleración, a velocidad y a desplazamiento).

La demanda a la que se ven sometidos los modelos es representativa de la máxima demanda esperada en los principales centros urbanos de la zona sísmica de México. Se emplean ocho diferentes demandas correspondientes a ocho zonas, según su distancia a la trinchera de subducción en la costa del Pacífico.

Este estudio se enfoca en los dispositivos de disipación de energía por fluencia del material y en aisladores de base de elastómero con núcleo de plomo, debido a su economía, fiabilidad y facilidad de implementación en la práctica, además que este tipo de sistemas tienen un mayor desarrollo teórico y tecnológico.



## 1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE DISIPADORES DE ENERGÍA Y AISLADORES SÍSMICOS.

### 1.1. Una alternativa viable para reducir el costo de los terremotos.

De todas las acciones a las que se verá sometido un edificio a lo largo de su vida útil, las cargas por sismo tienden a presentar un grado de incertidumbre mucho mayor, no solo en cuanto al momento en que ocurrirán, sino también en su intensidad, y la forma en que esta acción hará interacción con la estructura. Además, el estudio de este tipo de cargas es de especial interés debido a que tienen el mayor potencial para dañar las estructuras, principalmente los sismos fuertes.

Los desastres naturales como los producidos por los sismos tienen un gran costo para la sociedad. Este costo se puede subdividir en tangible e intangible, el costo tangible involucra el costo directo, que es el daño provocado físicamente a la infraestructura, a las construcciones y su contenido, y al costo indirecto que es el que se debe por la interrupción de producción de bienes y servicios. El costo intangible, es aquel que no tiene que ver con el mercado, como las muertes humanas, afectaciones a la salud de las personas, pérdidas de bienes ambientales o recursos naturales, interrupción del ecosistema, etc. (Meyer et al. 2013).

A partir del análisis de daños de 48 sismos mayores de 5.5 grados, ocurridos entre 1985 y 2015, en Japón, Rusia, Corea del Sur, EU, Nueva Zelanda, Grecia, Islandia e Italia, se reporta que los costos varían desde dos millones hasta más de 232 000 millones de dólares (del 2015), la variación no solo se debe a la diferencia de magnitudes de los sismos, sino que también influyen factores como la diferencia geológica, la densidad de población, las prácticas constructivas y la ubicación del epicentro. En Tabla 1 se muestra el costo promedio para los 48 sismos estudiados (<https://www.kansascityfed.org/publications/research/oke/articles/2016/economic-damage-large-earthquakes>) :

*Tabla 1. Costo en millones de dólares debido a sismos fuertes en las últimas décadas.*

<b>Sismos en países desarrollados</b>	<b>Costo promedio en millones de dólares del 2015</b>
Magnitud > 5.5	\$ 12,146.00
Magnitud > 6.5	\$ 23,966.00
Magnitud entre 5.5 y 6.5	\$ 2,145.00
Población > 250,000	\$ 20,705.00
Población < 250,000	\$ 172.00



La variabilidad de los factores que se involucran hace que estimar a futuro daños y costos para sismos de gran magnitud, sea una tarea casi imposible.

De los desastres ocurridos en México entre 1980 y 1999, entre sismos, explosiones, heladas, ondas cálidas, inundaciones, huracanes, erupciones volcánicas, etc. se tienen contabilizados aproximadamente 9108 muertos, de los cuales 3480 son debidos a eventos sísmicos, lo que representa el 38% (Bitrán 2001). En 2008 el terremoto Wenchuan al sur de China causo 70000 muertes y 800 billones de yuanes en pérdidas (128 billones de dólares). (Pan et al. 2012).

Efectivamente, es difícil catalogar a los sismos como desastres naturales, debido a que no es el fenómeno como tal el que produce las muertes de las personas, sino los edificios mal construidos o diseñados. Los códigos de diseño contemplan intensidades sísmicas considerablemente altas que tienen baja probabilidad de excederse, sin embargo, también permiten reducciones en dichas intensidades debidas al comportamiento inelástico de las estructuras, por lo que es posible reducir la demanda más allá de un 75%, siempre y cuando se cumplan los requisitos de desplazamientos bajo la demanda total. Las reducciones en las intensidades de diseño implican un ahorro económico, pero también un daño considerable en la estructura si se ve sometida a la demanda de diseño, mientras mayor sea la reducción a la demanda mayor será el daño esperado sobre la estructura. Los códigos evolucionan, asumiendo filosofías de desempeño, en las que se hace medible el daño esperado y se tiene mayor control para evitar el colapso de las estructuras. Estas filosofías exigen de los ingenieros diseñadores mayor conocimiento de los métodos de análisis y comportamiento no lineal, también exige a los dueños atención a los criterios básicos de ingeniería sísmica y estructural.

Ante un evento sísmico repentino, los daños estructurales en las construcciones se presentan principalmente debido a alguna de las seis causas siguientes (Jara et al. 2006):

1. Ocurrencia de sismos con intensidades superiores a las previstas por los códigos de construcción.
2. Presencia de fallas activas cercanas a las estructuras que dan origen a movimientos no previstos en el diseño.
3. Distribución irregular de la rigidez y/o resistencia de los elementos de la estructura.
4. Falta de confinamiento adecuado y poca capacidad de rotación en las zonas de formación de articulaciones plásticas.
5. Similitud entre la frecuencia de vibración de la estructura y las frecuencias dominantes del movimiento del terreno.
6. Edificios viejos, construidos bajo criterios de diseño sísmico que no satisfacen los requerimientos actuales.

Dichas causas pueden mitigarse mediante las siguientes acciones (Jara et al. 2006):

1. Estimar de mejor manera la intensidad sísmica de diseño en cada región.



2. Considerar los niveles de daño asociados a distintos niveles de intensidad sísmica.
3. Mejorar las características de disipación de energía del sistema, así como reducir la energía de entrada sísmica, mediante la incorporación de **sistemas de control**, como dispositivos de aislamiento y/o disipación.
4. Incrementar la capacidad ante carga lateral y de ductilidad de los elementos y del conjunto estructural.

El presente estudio está enfocado a la acción tres, que consiste en incorporar sistemas de control para mejorar las características del sistema. Los sistemas de control se pueden clasificar en (Jara et al. 2006):

1. Dispositivos de control pasivo.
  - a. Disipadores de energía
    - i. Por fluencia del material
    - ii. Por extrusión
    - iii. Por fricción
    - iv. Por comportamiento viscoso y viscoelástico
  - b. Aisladores de base.
  - c. Amortiguadores de masa resonante.
2. Dispositivos de control activo.
  - a. Masa activa
  - b. Tendones activos
  - c. Dispositivos de fricción a activo
  - d. Materiales inteligentes.
3. Dispositivos de control semiactivo

Los disipadores de energía por fluencia de material y aisladores de base son dispositivos de control que colocados adecuadamente en las estructuras son capaces de reducir la demanda a la que se ven sometidos los elementos estructurales que la componen, proporcionando mayor seguridad contra el colapso. Este tipo de dispositivos también son utilizados para reducir las vibraciones producidas por ráfagas de viento o por sismos de baja intensidad que causan incomodidad en los usuarios o que pueden dañar equipos costosos muy sensibles instalados en el inmueble. El aumento en el costo de entre 5% y 10% de una construcción equipada con este tipo de dispositivos, queda justificado por el incremento a la seguridad del edificio y su contenido. (Kelly 1988, Zhou 2015).

La primera estructura aislada en Japón fue construida en 1982 y consiste en una pequeña casa habitación (Kelly 1988). En su investigación de campo titulada "Aislamiento de base en Japón", Kelly reporta 20 construcciones (la más alta de 10 niveles) con aisladores de base, entre las que se encuentran: una casa habitación, siete edificios de oficinas, dos centros de investigación, un laboratorio, cuatro edificios de departamentos, un museo y dos dormitorios. Entre los sistemas de aislamiento que se utilizaron se tienen apoyos de caucho con amortiguadores de fricción, apoyos de caucho con amortiguadores por fluencia de



acero, apoyos de caucho con amortiguadores de aceite, apoyos de caucho con amortiguadores viscosos y apoyos de caucho con núcleo de plomo.

La tecnología del aislamiento sísmico tuvo una rápida acogida en Japón, debido a la frecuencia con que ocurren sismos de magnitud fuerte en dicho país, la población en general tiene bien asimilado el peligro que estos fenómenos representan. Por lo que pronto las industrias invirtieron bastante dinero tanto en investigación como en marketing. (Kelly 1988).

En China, las primeras estructuras con dispositivos, tanto aislamiento de base como disipadores de energía, fueron construidas alrededor de 1993 (Pan et al. 2012), en 2001 había cerca de 450 estructuras con aisladores sísmicos (Zhou 2001), para el año 2007 habían alrededor de 600 estructuras aisladas y alrededor de 100 con disipadores de energía. (Pan et al. 2012), en 2014 ya eran 5000 estructuras con aislamiento de base y 2000 con amortiguadores (Zhou 2015), para el 2018 se reportaron 6500 estructuras con aislamiento y alrededor de 3500 con dispositivos disipadores de energía. (Zhou y Tan 2018). A continuación, se puede apreciar gráficamente este crecimiento en el uso de dispositivos de control en China.

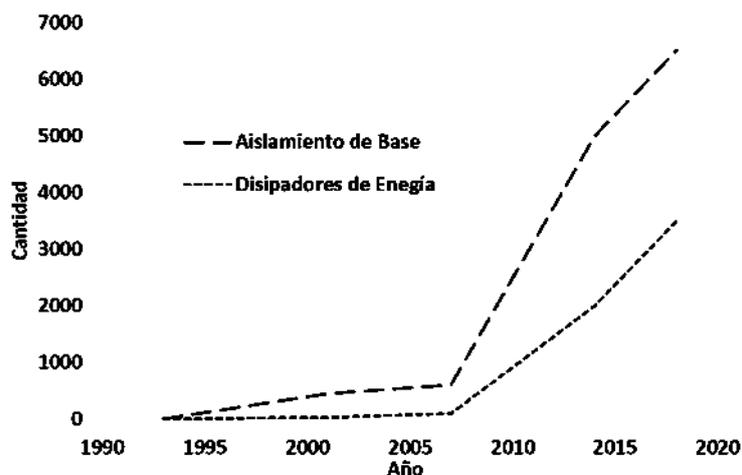


Figura 1. Crecimiento de aplicaciones de sistemas de control en China.

Tanto el aislamiento de base como los disipadores de energía es una tecnología en una etapa inicial en cuanto a la aplicación en estructuras reales, a continuación, se muestra una gráfica donde se compara la cantidad de edificios con aislamiento de base en los países con más aplicaciones prácticas:

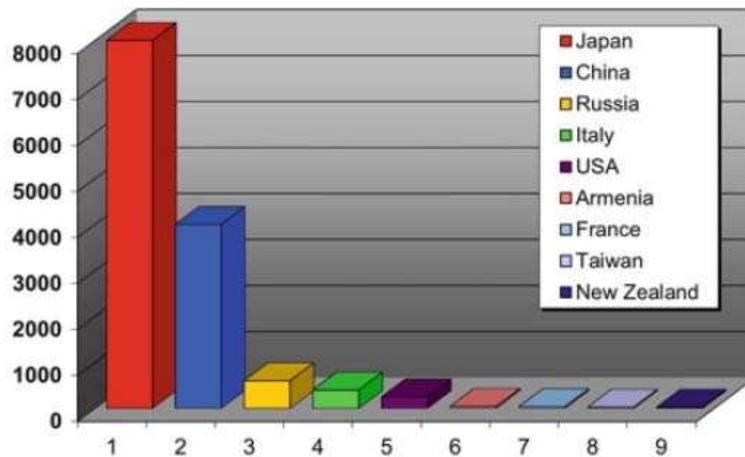


Figura 2. Cantidad de edificios con aisladores de base en los países más activos (datos a septiembre del 2013) (imagen tomada de Martelli et al. 2014).

1.2. Investigación y aplicaciones en México.

Tena-Colunga (2007) Realiza un estado del arte de dispositivos de control en México. En cuanto a investigación experimental reporta tres casos para aislamiento de base y cinco para disipadores pasivos. En cuanto a investigación analítica reporta la cantidad de trabajos mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 2. Investigaciones analíticas realizadas en México.

<b>Investigación en disipadores de energía pasivos</b>	<b>No. de Trabajos.</b>
Estudios paramétricos usando sistemas de un grado de libertad.	5
Estudios usando sistemas de múltiples grados de libertad.	8
Propuestas para el modelado analítico de dispositivos.	7
Evaluación y validación de modelos usando análisis no lineales.	4
Rehabilitación y optimación de estructuras mediante dispositivos pasivos disipadores de energía.	5
Procedimientos de diseño y códigos.	9
Estudios para puentes.	1
<b>Investigación para aislamiento de base</b>	<b>No. de Trabajos.</b>
Estudios para edificios usando modelos de un grado de libertad equivalentes.	1
Estudios para edificios usando modelos de marco equivalente.	3
Estudios para edificios usando modelos 3D	5
Estudios para puentes.	6
Estudios para aplicaciones existentes.	7
Estudios para nuevos desarrollos.	3
Procedimiento de diseño y códigos.	11
Estudios paramétricos	8



Para aplicaciones en México, Tena enlista seis casos de aislamiento de base y 25 de disipadores de energía.

Ruiz (2017) presentó en el XXI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, celebrado en septiembre del 2017 en Guadalajara Jalisco, seis aplicaciones más de dispositivos de control en edificios:

Torre Pardo (CDMX)	Sistema SLB
Torre Cuarzo (CDMX)	Sistema Megapall
Torre Telmex (CDMX)	Disp viscosos
Torre Alfonso Reyes 30 (CDMX)	Dispositivos viscosos
Torre Urbana (Gdl)	Sistema SLB
Torre Midtown (Gdl)	Sistema CRP

### 1.3. Teoría para disipadores de energía por fluencia de material.

El equilibrio de un oscilador de un grado de libertad se representa con la ecuación de movimiento definida como:

$$ma + cv + kd = F$$

Donde la masa del sistema (m) se multiplica por su aceleración (a), el coeficiente de amortiguamiento viscos (c) por la velocidad de la masa (v) y la rigidez del sistema (k) por el desplazamiento de la masa (d), para equilibrar la fuerza externa (F) aplicada en la masa.

Si se incorpora un dispositivo de disipación de energía en el sistema, la ecuación se transforma en:

$$ma + cv + kd + pd = F$$

Donde p es la rigidez del dispositivo. Este tipo de dispositivos transforman energía cinética en trabajo a través de la plastificación del metal, concentrando el daño en elementos especialmente diseñados para recibirlo y protegiendo así a la estructura principal, por lo que también son conocidos como dispositivos tipo fusible. El dispositivo puede llegar a la fluencia ya sea por la acción de un momento flexionante distribuido uniformemente, o creciente como el producido en voladizos, o por la acción de un momento torsionante.

La geometría de los dispositivos está en función de mantener el mayor volumen de material bajo el mismo nivel de deformación. Las características que deben tener este tipo de dispositivos son (Jara et al. 2006):

1. Estabilidad en su comportamiento histerético.
2. Alta capacidad por fatiga ante cargas cíclicas.
3. Poca sensibilidad al cambio de la temperatura ambiental.

También recomienda tener precaución en los siguientes aspectos:



1. Utilizar elementos con sección compacta para evitar problemas de inestabilidad.
2. Limitar la concentración de esfuerzos en la conexión dissipador-estructura
3. Evitar posibles fallas en soldadura debido a fatiga y concentración de esfuerzos.
4. Diseñar dispositivos que experimenten deformaciones iguales sobre gran parte del material.
5. Limitar las incursiones plásticas. De forma que resistan varios sismos de diseño y un sismo extremo en su vida útil. Valores típicos de deformación son 3% para eventos de diseño y 5% para eventos extremos.

En un análisis dinámico tradicional el objetivo es la determinación de desplazamientos, velocidades, aceleraciones y fuerzas; sin embargo, para estructuras con amortiguadores, resulta mejor un enfoque basado en energía, en el que se determina la forma como se disipa la energía inducida por el sismo.

Los dispositivos de disipación de energía están basados en el concepto de plastificación del material, por lo que es muy importante caracterizar fielmente su comportamiento histórico, el cual pueden calibrarse adecuadamente mediante un modelo bilineal.

#### 1.4. Teoría para aislamiento sísmico mediante apoyos laminados con núcleo de plomo.

Al aislar sísmicamente un edificio con apoyos laminados con núcleo de plomo (LRB, por sus siglas en inglés), lo que se busca es alargar el periodo fundamental de vibración de la estructura alejándola de las frecuencias altas del movimiento, donde generalmente se presentan las demandas de cortante más grandes. Este tipo de aisladores cuenta con un núcleo de plomo el cual disipa energía a través del comportamiento histórico, con lo que se incrementa su eficiencia al reducir la demanda de energía que requiere disipar la estructura a través de daño estructural. Los dispositivos además de hacer más flexible el sistema, también aumentan el porcentaje de amortiguamiento, los códigos de diseño limitan este aumento hasta un 30% del amortiguamiento crítico.

Por ejemplo, si una estructura con 5% de amortiguamiento tiene un periodo fundamental corto  $T_1$ , donde el espectro de diseño presenta sus mayores ordenadas, al colocar los dispositivos de aislamiento se alarga el periodo hasta  $T_2$  y se aumenta el amortiguamiento 15%, la demanda sísmica se reduce, como se muestra en la Figura 3 izquierda. Sin embargo, si el espectro presenta grandes ordenadas en periodos mayores como el caso de terrenos blandos, el uso de aislamiento puede aumentar la demanda sobre la estructura a pesar de incrementar el amortiguamiento, situación no deseable.

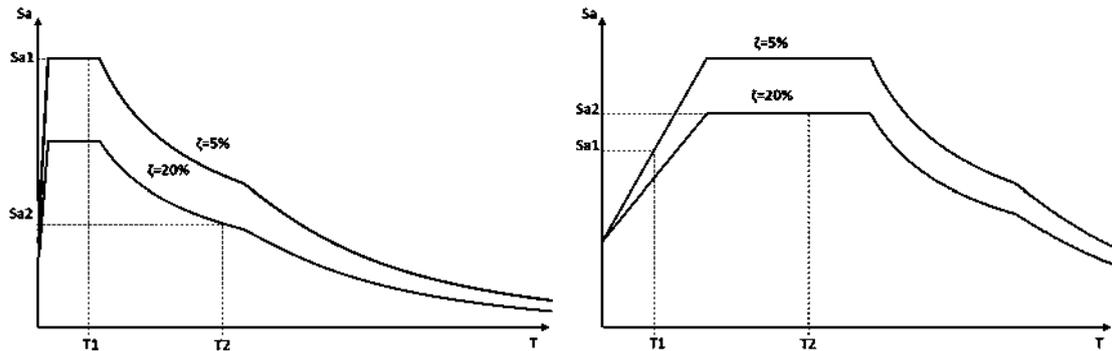


Figura 3. Espectros de diseño para una estructura fija en su base y para una estructura aislada, en terreno firme y en terreno blando

Si se presenta un sismo fuerte debido a una falla cercana al edificio, los aisladores no significan beneficio debido a que este tipo de falla presenta pulsos grandes de velocidad, tipo de energía que no son capaces de disipar. Otro factor que evita el uso de aisladores de base en terreno blando como el de la Ciudad de México es la propensión de sufrir asentamientos diferenciales y el poco control que se tiene sobre ellos con este tipo de sistema.

Si las frecuencias dominantes del terreno son altas, y los aisladores resultan benéficos para reducir la demanda de cortante, debe tenerse en cuenta que la aplicación de los dispositivos implica un aumento en la demanda de desplazamiento, por lo que las holguras entre edificios deben ser mayores que las que generalmente se practican.

La selección del sistema de aislamiento debe basarse en los siguientes aspectos (Jara et al. 2006):

1. Su capacidad de modificar el periodo de vibración del sistema.
2. El incremento que produce en el amortiguamiento del sistema.
3. Su capacidad de deformación ante cargas cuasi-estáticas frecuentes.
4. Su fuerza y desplazamiento de fluencia.
5. Su comportamiento después de la falla.
6. Su capacidad de auto centrado.
7. Su rigidez vertical.

Los dispositivos aisladores disipadores LRB presentan un comportamiento histerético que puede representarse razonablemente mediante un modelo bilineal, como el de la Figura 4.

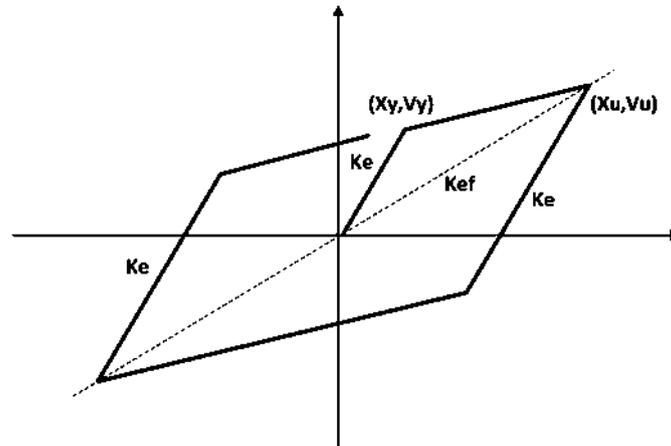


Figura 4. Modelo bilineal de comportamiento histerético.

Este modelo se caracteriza por presentar una rigidez elástica ( $K_e$ ) y una rigidez inelástica ( $K_y$ ), sin embargo, para fines prácticos se define la rigidez efectiva, un periodo efectivo y un amortiguamiento viscoso equivalente, el cual se compone de la contribución histerética de los dispositivos y del amortiguamiento viscoso que presenta el sistema:

$$K_{ef} = \frac{V_u}{X_u}$$

$$T_{ef} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_{ef}}}$$

$$\zeta = \frac{A_h}{2\pi X_u V_u} + \zeta_{sis}$$

Donde  $m$  es la masa del edificio, y  $A_h$  es el área de histéresis.

#### 1.5. Aspecto normativo.

Puesto que el funcionamiento de este tipo de dispositivos se basa principalmente en su comportamiento inelástico, el diseño definitivo de un edificio equipado con dispositivos de control, requiere necesariamente de un proceso de retroalimentación entre la campaña de pruebas experimentales en laboratorio y la campaña de modelado y análisis no lineal, esto con el fin de garantizar un buen comportamiento del conjunto estructura-dispositivos. Si se desea expandir el uso de sistemas de control en la práctica profesional, es necesario fortalecer las especificaciones de construcción en estas dos campañas mencionadas, sobre todo en la campaña de modelo y análisis no lineal.



Actualmente los reglamentos proporcionan metodologías simplificadas de análisis no lineal, mediante el uso de rigideces y periodos equivalentes, lo cual solamente puede considerarse como una metodología de predimensionamiento, pero nunca una solución seria y optimizada del problema.

Sonia E Ruiz (2018), Compara los requerimientos generales, la selección de procedimiento de análisis, las acciones de diseño, la inspección y el protocolo de campaña experimental, de la sección dedicada a estructuras equipadas, de los siguientes códigos:

1. Cargas de diseño mínimas para edificios y otras estructuras. E.U. (ASCE/SEI 7-16)
2. Especificaciones europeas de dispositivos antisísmicos. Europa. (EN 15129)
3. Normas Técnicas complementarias del código mexicano (NTCS-17)

Finalmente señala los siguientes aspectos en que puede mejorarse el código mexicano:

1. La consideración de la variabilidad en las propiedades mecánicas de los dispositivos. En el reglamento americano y el eurocodigo consideran además de las propiedades nominales, combinaciones de propiedades máximas y mínimas, con lo se asegura contemplar los casos más desfavorables de diseño.
2. Recomendaciones específicas para el análisis no lineal de edificios con dispositivos. y fortalecer la metodología basada en desplazamientos.
3. Consideración de un cortante mínimo resistente, congruente con la condición de que el amortiguamiento adicional está limitado a cierto valor.

## 2. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA SÍSMICA EN MÉXICO COMO FUNCIÓN DE LA LOCALIZACIÓN Y TIPO DE FUENTE SÍSMICA.

Debido al ciclo geológico de nuestro planeta, existe el fenómeno de subducción, en que la corteza oceánica es empujada por fuerzas convectivas, debajo de la corteza continental hasta fundirse nuevamente en el manto terrestre, este fenómeno ocurre en Alaska, México, Perú, Chile, Japón y Nueva Zelanda. Este es el principal fenómeno que origina sismos en México.

La placa que subduce en la zona central de México permanece casi horizontal hasta una distancia cercana a los 250 km, lo cual no es común y recibe el nombre de “subducción de placa plana”, hace 30 millones de años, el fenómeno de subducción era normal en la costa del pacífico con volcanes activos a lo largo de la costa. Sin embargo, hace 22 millones de años los volcanes se apagaron porque la subducción comenzó a ir horizontalmente. Nuevos volcanes comenzaron a surgir, en la costa del golfo, lo que indica que la placa se extendía cerca de dicha costa. Desde entonces la línea de volcanes activos ha ido retrocediendo. El fenómeno se explica por la acción de un manto de baja viscosidad debido a la presencia de agua, el cual fluye con mayor facilidad (<http://www.tectonics.caltech.edu/outreach/highlights/mase/>). Este fenómeno propicia la ocurrencia de sismos de fallamiento normal en zonas centrales del país.

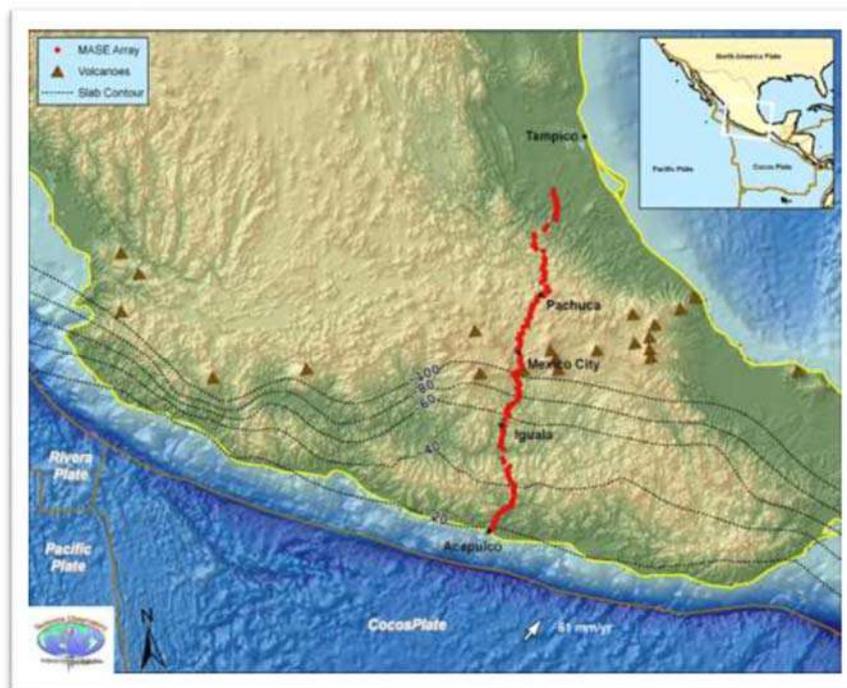
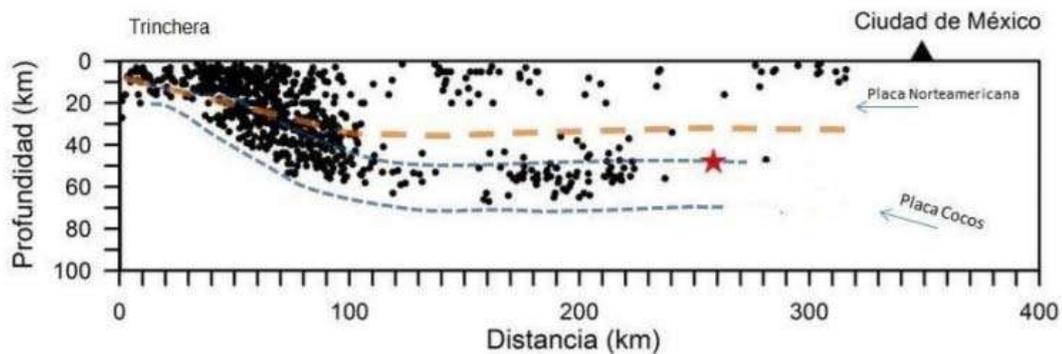


Figura 5. Curvas de nivel de profundidad de la placa que subduce. (<http://www.tectonics.caltech.edu/outreach/highlights/mase/>).



En la Figura 5, se muestra en rojo, una red de monitoreo que cuenta con 100 sismómetros colocados cada cinco kilómetros, cruzando el territorio mexicano desde Acapulco, pasando por la Ciudad de México y llegando casi hasta Tampico, esta red se utilizó para localizar las interfaces entre la corteza y el manto. También se muestran las curvas de nivel de profundidad para la placa que subduce. Se observa que bajo la Ciudad de México la placa tiene apenas 100 kilómetros de profundidad. En la Figura 6, se muestra el perfil de subducción para la zona central del país, el cual se obtuvo del reporte especial del Servicio Sismológico Nacional (SSM) para el sismo del 19 de septiembre del 2017 en Puebla-Morelos (M7.1).



*Figura 6. Sección epicentral perpendicular a la trinchera mesoamericana. El hipocentro del sismo se representa con una estrella roja, los puntos negros son hipocentros de otros eventos sísmicos en la región.*

En el perfil de subducción para la zona sur del país que se muestra en la Figura 7, se puede observar la diferencia geométrica del fenómeno y la diferencia en la posición de los hipocentros registrados, en el fenómeno de subducción plana que ocurre en el centro del país, la mayoría de hipocentros se concentran en una distancia menor a 100 kilómetros de la trinchera y a una profundidad menor de 60 kilómetros, mientras que en la subducción normal, la mayoría de hipocentros se concentra a una distancia de entre 100 y 200 kilómetros de la trinchera y a una profundidad de entre 50 y 100 kilómetros. La Figura 7 se obtuvo del reporte especial del sismo de Tehuantepec (M8.2) ocurrido el 7 de septiembre del 2017 del Servicio Sismológico Nacional (SSM).

Existen dos tipos de sismos, los de “subducción” y los de “fallamiento normal”. El primer tipo se refiere a los movimientos ocurridos debido a la interacción entre las placas (interplaca). En la zona cercana a la trinchera de contacto, se acumula energía, debido a la fricción generada por la superficie irregular de las placas, cuando dicha fricción es vencida por la presión que ejerce el empuje de la placa oceánica bajo la continental se produce un movimiento repentino que libera la energía acumulada y da origen a un sismo de subducción. El segundo tipo, se deben al ablandamiento de la corteza oceánica una vez que alcanza profundidades y temperaturas considerables por debajo de la corteza continental, la placa que subduce sufre fracturas y/o se rompe bajo la acción de su propio peso,



produciendo así un movimiento repentino que libera energía y da origen a los sismos de fallamiento normal.

Aunque la placa de cocos es una, no se mueve toda completa uniformemente, sino por tramos, o zonas, estas zonas se han determinado gracias a los epicentros de las réplicas después de grandes sismos. En la Figura 8 se pueden apreciar estas zonas de movimiento independiente que se han detectado. También es interesante notar como la mayoría de los sismos profundos intraplaca se ubican en el centro del país justo siguiendo la geometría descrita anteriormente.

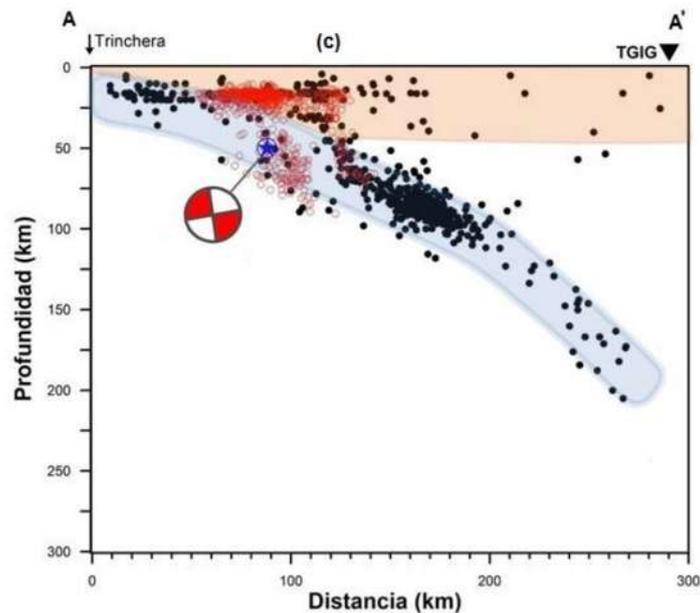


Figura 7. Sección epicentral perpendicular a la trinchera mesoamericana. El hipocentro del sismo principal se representa con un círculo-estrella azul y se observan las tendencias de dos fallas paralelas casi verticales. Los puntos negros son hipocentros de otros.

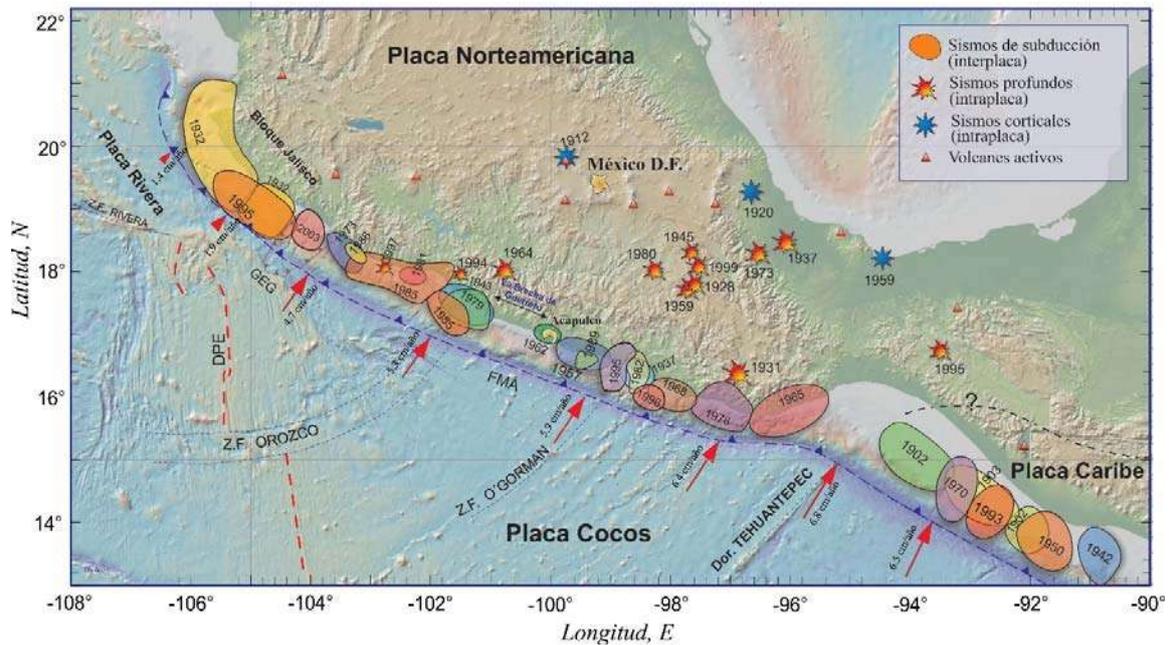


Figura 8. Geometría de las zonas de subducción y ubicación de los principales sismos normales.

([http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/images/EQ\\_map\\_2013\\_es\\_clear.jpg](http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/images/EQ_map_2013_es_clear.jpg)).

### 2.1. Procedimiento para la selección de registros sísmicos.

Para el presente trabajo se seleccionó un conjunto de registros sísmicos, a fin de llevar a cabo los análisis no lineales sobre edificios de varias alturas. El procedimiento y los criterios utilizados en dicha selección se describen a continuación:

1. De la Base Nacional de Sismos Fuertes Vol.2 del SMIS (13 545 registros) se seleccionaron los registros que presentan magnitudes mayores o iguales que 5, lo que resulta en 8819 registros. De la Base de Datos de Registros Acelerográficos de la Red Sísmica Mexicana (<http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/Inicio.aspx>) se trabajó con los registros disponibles (5246 registros, en febrero del 2018), pertenecientes a 466 eventos sísmicos. Los últimos registros de esta base de datos corresponden al sismo ocurrido a 56km al suroeste de Cihuatlán, Jalisco, el 23 de octubre del 2016. El conjunto total de registros que se usaron fue de 13 043, debido a que 1022 registros están en ambas bases de datos.
2. Del conjunto de 13 043 registros, se eligieron aquellos que fueron registrados en terreno duro según la Tabla 3, lo que resulta en 6191 registros.



Tabla 3. Tipos de suelo considerados como terreno duro para la depuración de los registros.

TIPOS DE SUELO CONSIDERADOS COMO TERRENO DURO.		
ARENISCA LUTITA	GRANITE :	ROCA GRANITICA
ARENISCAS DE	DOMO SALINO	ROCA FRACTURADA
BASALTO :	GRANITO ALTERADO	ROCA FRAGMENTADA
BRECHA ANDESITICA	GRANITO :	ROCA DIFERENCIADA
BRECHAS CONGLOMERADOS	IGNIMBRITA :	ROCA GRANITO
CALIZA :	IGNIMBRITA AGUAMILPA	ROCA SEDIMENTARIA
CALIZA ARCILLOSA	IGNIMBRITA COLORINES	ROCA, CANTERA
CALIZA LUTITA	IGNIMBRITA AGUAMILPA	ROCA VOLCANICO
COLADA LAVA	LIMOLITAS ARENISCA	ROCA METAMORFICA
CONGLOMERADO LUTITAS	LUTITAS :	ROCA GRANITO
CUARZOMONZITA :	LUTITAS ARENISCAS	ROCAS GRANÍTICAS
CUARZOMONZONITA :	ROCA :	ROCAS BATOLITICAS
DIORITA :	ROCA BASALTICA	SUELO DURO
	ROCA CALIZA	TRAVERTINO :

3. Del conjunto de 6191 registros, se desecharon aquellos en que no se especifica la profundidad focal, resultando en 5 873 registros.
4. Del conjunto de 5 873 registros, se desecharon aquellos en que el epicentro tiene una latitud mayor de 20.00° como se muestra en la Figura 9, por considerarse diferente fuente sísmica del fenómeno de subducción y fallamiento normal que interesa en el presente estudio, a continuación, se muestra el mapa usado para realizar dicha selección. Con lo que el conjunto de registros se reduce a 5 667 registros.

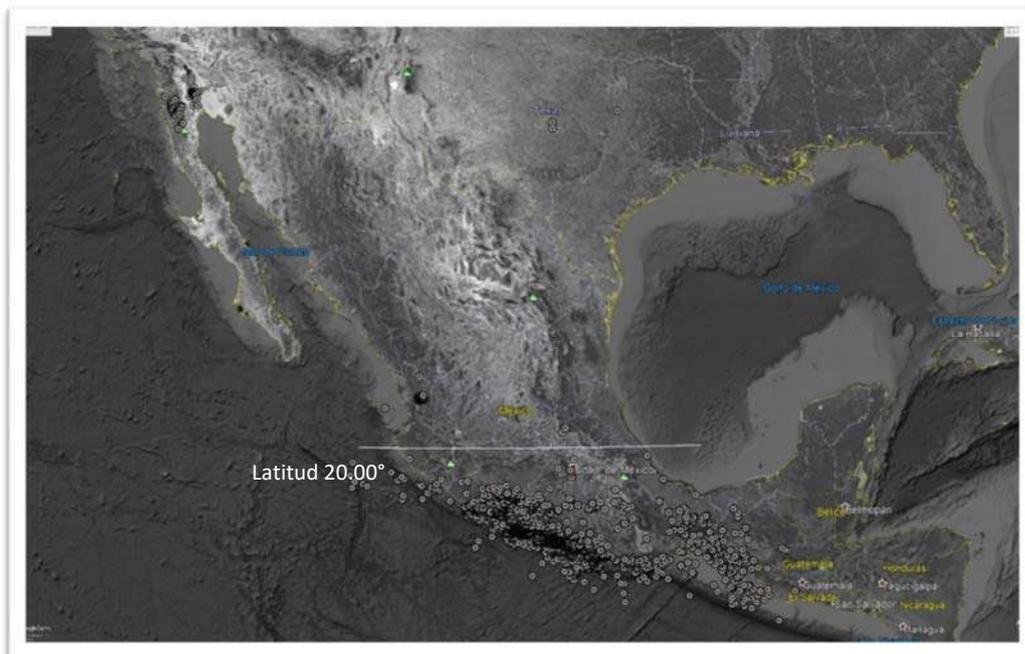


Figura 9. Localización de los epicentros del conjunto de 5 873 registros.



5. Del conjunto de 5 667 registros, se seleccionan aquellos con una profundidad menor a 40 km por considerarse de origen del proceso de subducción, con lo que el conjunto queda de 4187 registros, los cuales se dividieron en 8 grupos según su distancia epicentral:
  - Grupo 1. Eventos con distancia epicentral menor que 50 km.
  - Grupo 2. Eventos con distancia epicentral entre 50 y 100 km.
  - Grupo 3. Eventos con distancia epicentral entre 100 y 150 km.
  - Grupo 4. Eventos con distancia epicentral entre 150 y 200 km.
  - Grupo 5. Eventos con distancia epicentral entre 200 y 250 km.
  - Grupo 6. Eventos con distancia epicentral entre 250 y 300 km.
  - Grupo 7. Eventos con distancia epicentral entre 300 y 350 km.
  - Grupo 8. Eventos con distancia epicentral mayor que 350 km.
  
6. De cada grupo se seleccionan los 28 registros que requieren menor factor de escalamiento (escala ASI, explicada a continuación) para alcanzar la intensidad de demanda máxima probable correspondiente a su posición con respecto a la trinchera de subducción. Los registros seleccionados se enlistan en la Tabla 4.

## 2.2. Criterio de escalamiento de registros sísmicos.

El escalamiento de las señales sísmicas se realiza con el método basado en la intensidad de aceleración espectral (ASI por sus siglas en inglés) definida como la integral bajo el espectro de respuesta elástica, en el intervalo de 0.1 a 0.5 segundos. El escalamiento de la señal se realiza al igualar la ASI del espectro de respuesta debido a la señal sísmica con la ASI del espectro de peligro uniforme, para determinado sitio. Dicho sitio tiene una distancia a la trinchera de subducción, similar a distancia epicentral del registro en cuestión. El espectro de peligro uniforme se obtiene del programa PRODISIS desarrollado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y considera un periodo de retorno de 1000 años según especifica el Manual de Obras Civiles (MDOC) de la CFE, para estructuras clasificadas como tipo B.

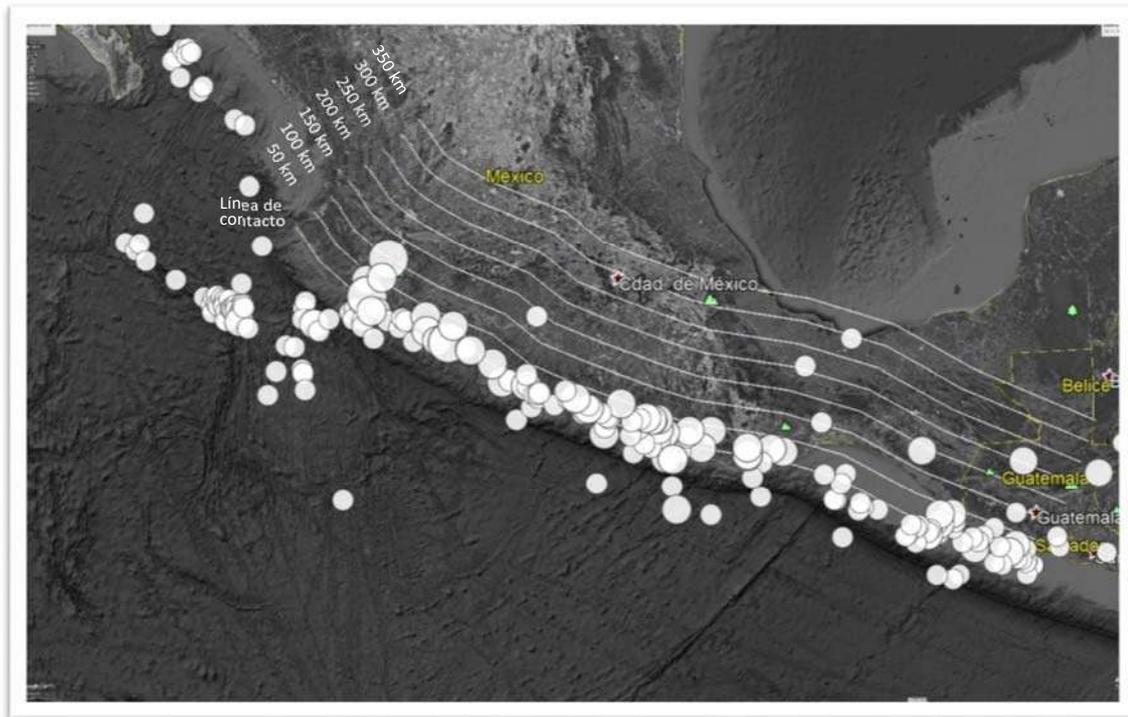
La trinchera de subducción se trazó con la mediana geométrica de los epicentros de sismos con magnitud mayor que 6 grados, según el catálogo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), como se muestra en la Figura 10. A partir de la trinchera se ubicaron las distancias a cada 50 km.

Para la determinación del espectro de peligro uniforme, se considera la ubicación de los principales centros urbanos según su distancia a la trinchera de subducción.



Tabla 4. Registros seleccionados para eventos de subducción.

REGISTROS SELECCIONADOS							
SUBGRUPO 1		SUBGRUPO 2		SUBGRUPO 3		SUBGRUPO 4	
0km < Dist. EPI < 50km		50km < Dist. EPI < 100km		100km < Dist. EPI < 150km		150km < Dist. EPI < 200km	
REGISTRO	FACTOR	REGISTRO	FACTOR	REGISTRO	FACTOR	REGISTRO	FACTOR
CALE9701.111	2.5	TAMA9909.301	2.0	INPT9701.111	1.2	PARS8509.211	1.4
LANE9909.301	2.8	PTSU9701.111	1.5	INMI9701.111	1.5	AZH8509.191	1.6
RIOG9909.301	2.9	OCTT8904.251	3.2	UNIO8509.191	1.7	COLI8604.301	3.7
ACP21308.211	3.4	VILD9701.111	3.4	INMD8509.191	3.6	CARI8509.211	3.9
PET21404.182	3.7	COYC1308.211	3.5	UNIO1404.181	3.8	FICA8509.211	4.2
INMI9412.101	3.2	PAPN8509.211	3.5	PARS8802.081	3.8	COYC8509.211	5.1
SLU21404.182	4.6	JAMI1203.202	2.6	INMD8509.19A	4.2	PENT9806.071	5.8
NUX21404.182	5.0	JAMI9909.301	2.8	OXL9909.301	4.2	OMTP9909.301	6.5
SJLL1204.0213	5.0	VILE9701.111	4.1	ACP21511.231	4.5	CHI18206.072	6.7
VIGA8904.251	4.8	VILI9701.111	4.4	ATYC8509.211	4.7	CARD8509.211	7.1
VIGA9310.241	3.2	SMLC9909.301	4.7	CHID8408.311	4.7	PETA9701.111	7.4
LLAV8802.081	3.3	CARD9405.231	5.3	UNIO9701.111	4.7	CALE0301.221	8.0
ACAP7803.191	3.3	SJLL1405.241	5.7	CHI18408.311	5.1	SNJE1404.181	8.8
OCTT0904.271	6.2	PTSU9412.101	6.1	ACP21405.081	5.2	CARD9412.101	9.0
COMD9405.231	6.3	ACAP8904.251	6.4	COMD1404.181	5.3	COMA1204.111	9.2
VNTA1308.211	6.4	ATYC1404.181	6.2	OCTT9509.141	5.4	NILT0111.281	9.6
AZH8509.211	5.2	OCTT9310.241	7.2	RIOG1203.201	6.2	TEMD8010.241	10.1
CALE8509.191	5.4	COYC1405.081	8.8	SUCH8509.211	6.3	CARD8904.253	10.2
PAPN9607.151	4.0	VIGA9509.141	6.5	PARS8904.251	6.3	CARS9412.101	11.4
CALE0008.091	6.9	SJLL1408.132	10.1	ACP21404.181	6.4	OCTT9607.151	11.4
PAPN8802.081	4.1	MSAS9310.241	5.0	PEND8909.161	6.5	RICA9607.151	11.5
SJLL1105.052	5.7	OXJM1410.111	7.2	COMD9412.101	6.7	ACAP7903.141	11.7
BALC9412.101	6.6	SUCH1404.181	9.3	CHID8309.151	6.9	ACP21203.201	11.8
INMD9412.101	6.1	COYC8904.251	11.2	CHII8309.151	7.6	CALE1404.181	11.8
CPDR8911.092	8.1	OCTT9410.291	11.4	SLU20810.201	7.9	PTSU9005.311	13.9
PAPN9005.311	7.1	TAMA1002.091	11.3	CARD9005.312	8.0	AGCA1404.181	13.9
PETA9607.151	9.8	SMR29310.241	7.0	INMI8604.30A	8.4	TNLP1405.081	14.3
LLAV9005.111	10.0	TEJU1211.151	12.1	RIXC9806.071	8.8	CAZO9005.312	15.2
SUBGRUPO 5		SUBGRUPO 6		SUBGRUPO 7		SUBGRUPO 8	
200km < Dist. EPI < 250km		250km < Dist. EPI < 300km		300km < Dist. EPI < 350km		350km < Dist. EPI	
REGISTRO	FACTOR	REGISTRO	FACTOR	REGISTRO	FACTOR	REGISTRO	FACTOR
PAPN8509.191	2.1	SUCH8509.191	1.3	FICA8509.191	1.7	CHI18509.191	0.5
CHI18509.211	1.3	ATYC8509.191	3.0	PARS8509.191	2.6	OCTT8509.191	1.8
NITA1404.181	3.1	CHI18110.251	3.6	CARI8509.191	2.7	TEAC8509.191	2.0
CDGU1204.111	4.7	THEZ1203.201	4.5	CSER9909.301	2.8	CU018509.191	2.7
TEJU1404.181	6.5	URUA1404.181	5.8	COYC8509.191	3.2	CUIP8509.191	2.7
OXJM0111.281	6.6	CUP20110.081	5.8	TOTO1203.201	3.7	CUMV8509.191	2.8
TNLP1404.181	7.7	VIGA9909.301	6.3	CSER1203.201	4.6	PENI9806.071	3.0
OXBJ1203.201	5.1	HMTT1404.181	7.4	SXPU1203.201	6.0	TACY8509.191	3.0
CHFL9909.301	8.2	HMTT1405.081	8.5	OXJM1203.201	6.5	SXPU8509.191	3.0
OXLC1203.201	4.2	CUMV8509.211	8.6	PZPU1203.201	6.5	XALT8509.191	3.5
COPL9909.301	10.7	RABO1203.201	9.0	UI219509.141	6.9	SXPU9909.301	3.6
ACAP8509.211	6.8	TACY8509.211	9.4	CHID9309.101	7.4	SXPU8509.211	3.8
ANGE9309.101	10.0	MEZO9607.151	9.5	CSER8904.251	7.7	CPDR8509.191	3.9
TEAC8509.211	5.6	CSER9107.251	9.5	TP138904.251	8.0	UI219909.301	4.9
ANGD9309.101	9.7	SXHO7903.141	9.9	CU017903.141	8.3	VNTA8509.191	4.9
TEAC1404.181	7.0	CUIP8509.211	10.0	CHII9309.101	9.2	ACAP8509.191	4.9
RICA9412.101	8.8	CU019210.302	10.0	RIPC9509.141	9.7	MSAS8509.191	5.4
ANGI9309.101	13.1	SXCU7903.141	10.1	TACY8904.251	9.8	CDGU1404.181	5.5
VNTA8509.211	11.0	TEAC1203.201	10.2	CUER9509.141	9.9	CUER9909.301	5.6
RIXC9410.311	19.7	CARI8407.021	10.5	CHIL9909.301	10.4	RICA9701.111	5.7
PAPN9701.111	10.3	UNIO0301.221	11.1	CARS9701.111	10.5	MEZO9701.111	5.8
ANGI9806.071	17.0	TEAC9509.141	12.7	CUP51404.181	10.5	SXPU7811.291	5.8
OCTT9412.101	18.6	SXPU1006.301	13.0	TP139509.141	11.1	PZPU1404.181	6.1
PTSU9510.091	11.2	MARU1404.181	13.4	RABO9909.301	11.2	SXPU1404.181	6.3
XALT8509.211	11.4	UI219412.101	14.1	CARI8604.30A	11.2	TOTO1404.184	6.7
TEAC1405.081	9.1	THEZ1006.301	14.5	CSE21006.301	11.5	SXPU7903.141	7.1
NITA1405.081	13.3	THEZ1204.021	15.6	TOTO1006.301	11.7	NILT1211.071	7.2
TEJU1405.081	16.9	CUER9412.101	15.7	TACY9509.141	11.8	TP139909.301	7.5



*Figura 10. Epicentros de sismos con magnitud mayor que 6, distancias a la línea de contacto considerada.*

Las ciudades de Manzanillo, Lázaro Cárdenas, Ixtapa Zihuatanejo, Acapulco, Pinotepa Nacional, Puerto Escondido y Huatulco, se encuentran a una distancia menor de 50 km de la trinchera. De estas ciudades, Puerto Escondido presenta la mayor ASI con 572.3 gal-seg.

Las ciudades de Puerto Vallarta, Colima, Apatzingán, Chilpancingo, Ocotlán de Morelos, Salina Cruz y Tapachula, se encuentran a una distancia entre 50 y 100 km de la trinchera. De estas ciudades, Salina Cruz presenta la mayor ASI con 354 gal-seg.

Las ciudades de Ciudad Guzmán, Uruapan y Oaxaca se encuentran a una distancia entre 100 y 150 km de la trinchera. De estas ciudades, Oaxaca presenta la mayor ASI con 222 gal-seg.

Las ciudades de Guadalajara, Pátzcuaro, Iguala de la Independencia, Huajupan de León y Cintalapa, se encuentran a una distancia entre 150 y 200 km de la trinchera. De estas ciudades, Huajupan de León presenta la mayor ASI con 175.8 gal-seg.

Las ciudades de Guadalajara, Morelia, Cuernavaca, Tehuacán, Tuxtepec y Tuxtla Gutiérrez se encuentran a una distancia entre 200 y 250 km de la trinchera. De estas ciudades, Tehuacán presenta la mayor ASI con 146.2 gal-seg.

Las ciudades de Tepatitlán de Morelos, Toluca, Puebla, Tehuacán y Minatitlán encuentran a una distancia entre 250 y 300 km de la trinchera. De estas ciudades, Puebla presenta la mayor ASI con 121.8 gal-seg.



Las ciudades de León, Celaya, Querétaro, Tlaxcala, Córdoba y Villahermosa se encuentran a una distancia entre 300 y 350 km de la trinchera. De estas ciudades, Córdoba presenta la mayor ASI con 114.5 gal-seg.

Las ciudades de Aguascalientes, Pachuca, Xalapa y Veracruz se encuentran a una distancia mayor de 350 km de la trinchera. De estas ciudades, Xalapa presenta la mayor ASI con 76.7 gal-seg.

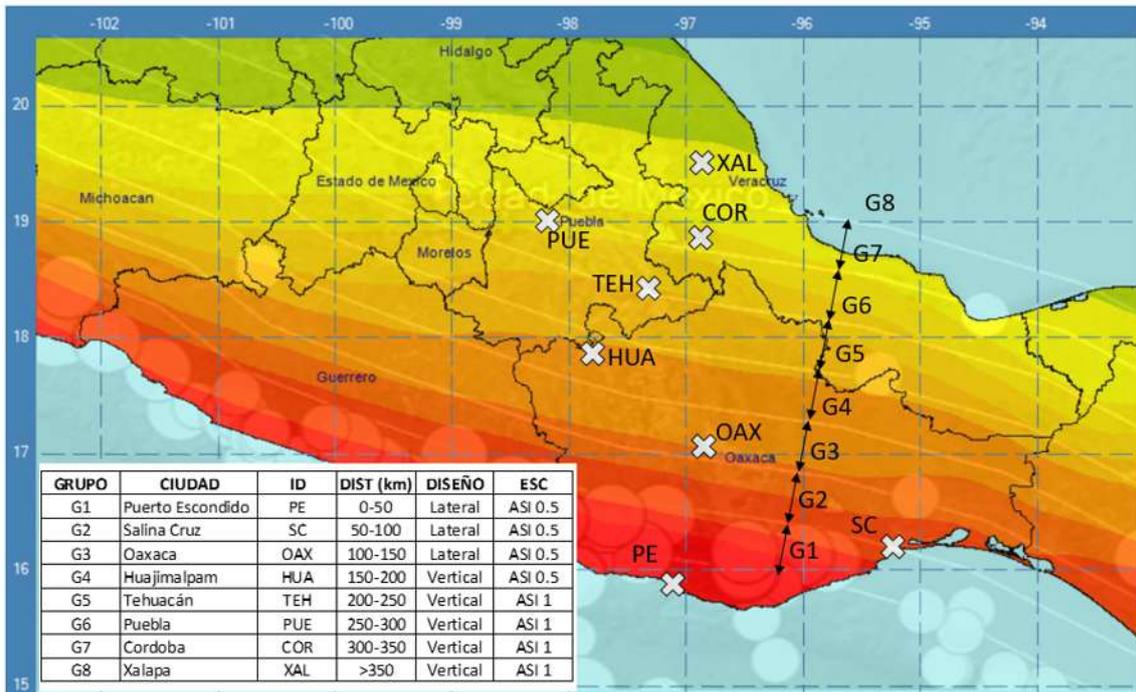


Figura 11. Mapa de intensidades de diseño PRODISIS, grupos y ubicación de los principales centros urbanos en estudio.

A continuación, para cada grupo, se muestran los espectros de respuesta de los acelerogramas seleccionados, el espectro de referencia y el espectro de diseño para la ciudad de referencia. Al comparar los espectros se puede observar cómo, conforme las ondas sísmicas se van alejando del epicentro, el contenido de frecuencias altas disminuye y las frecuencias bajas del sismo toman mayor importancia, siendo los edificios de mayor altura más susceptibles a este rango de frecuencias.

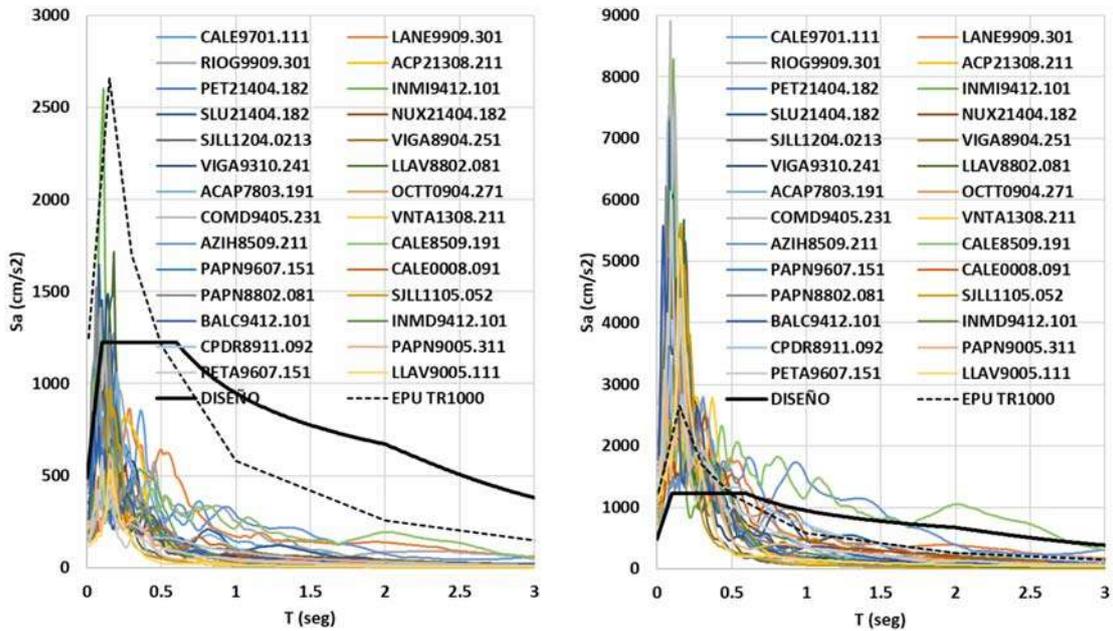


Figura 12. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 1, sin escala (izquierda) y escalados (derecha).

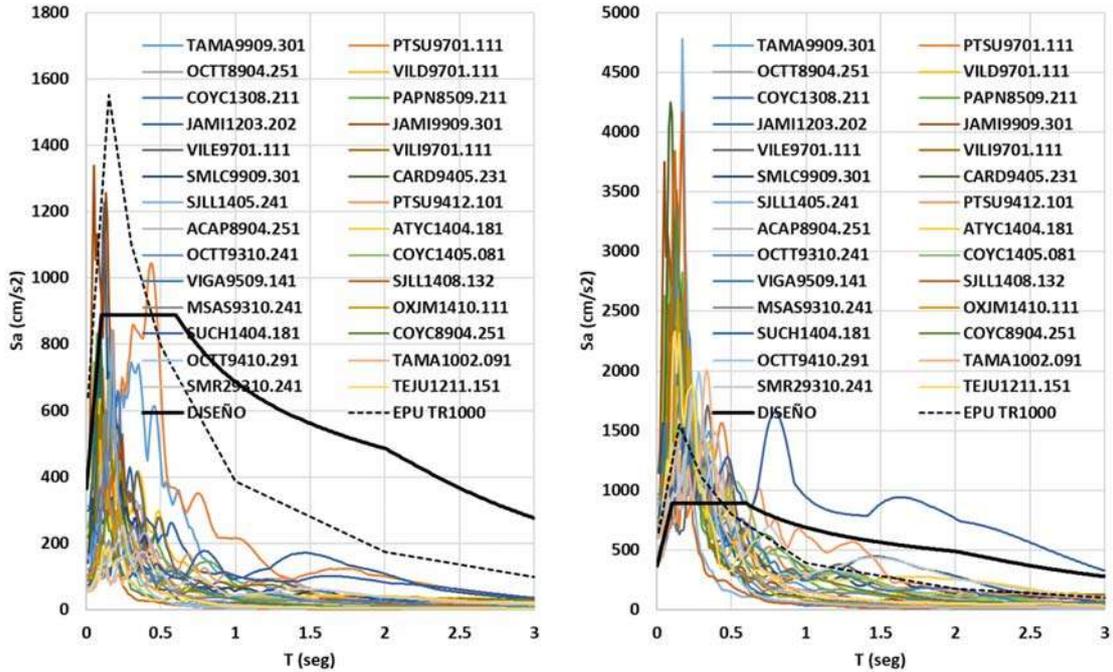


Figura 13. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 2, sin escala (izquierda) y escalados (derecha).

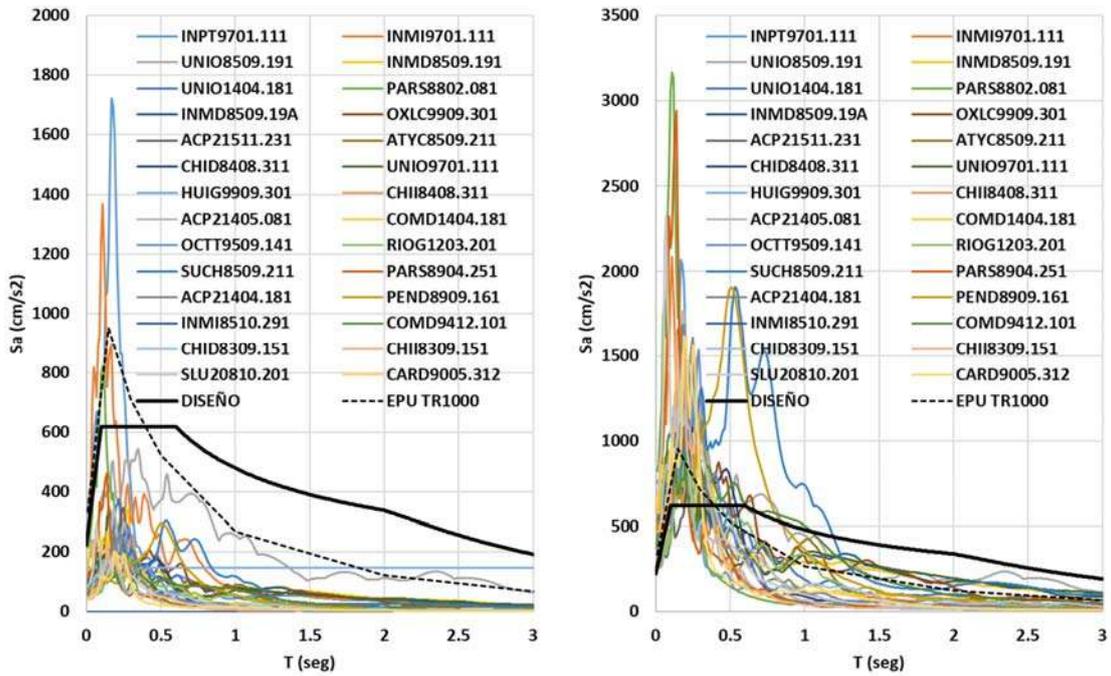


Figura 14. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 3, sin escala (izquierda) y escalados (derecha).

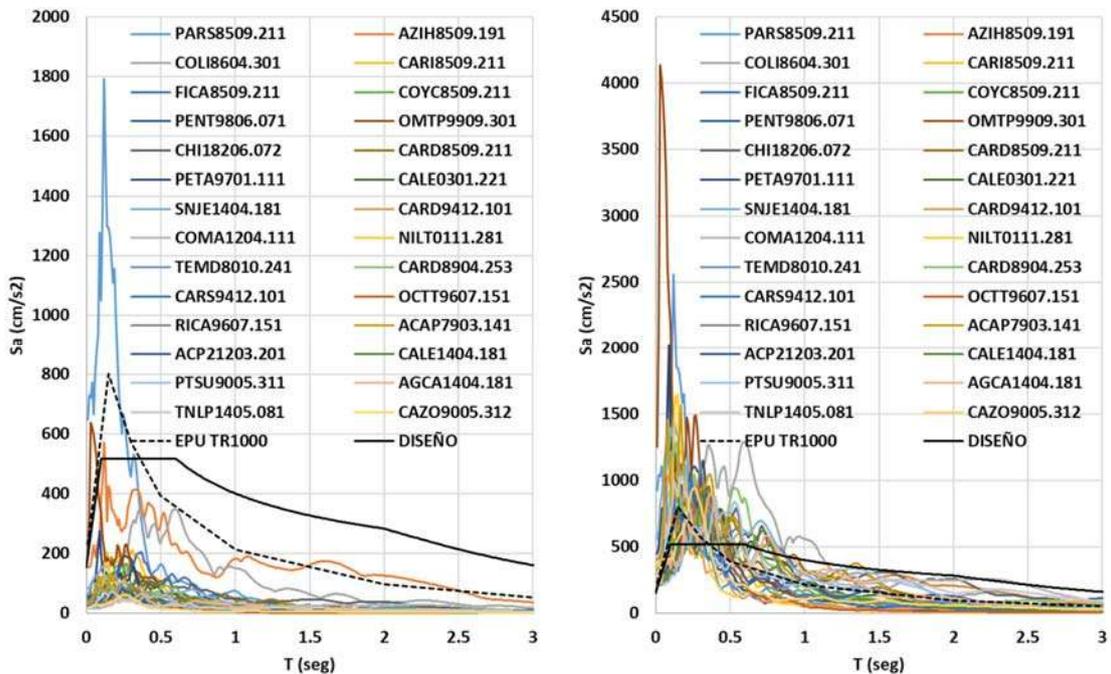


Figura 15. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 4, sin escala (izquierda) y escalados (derecha).

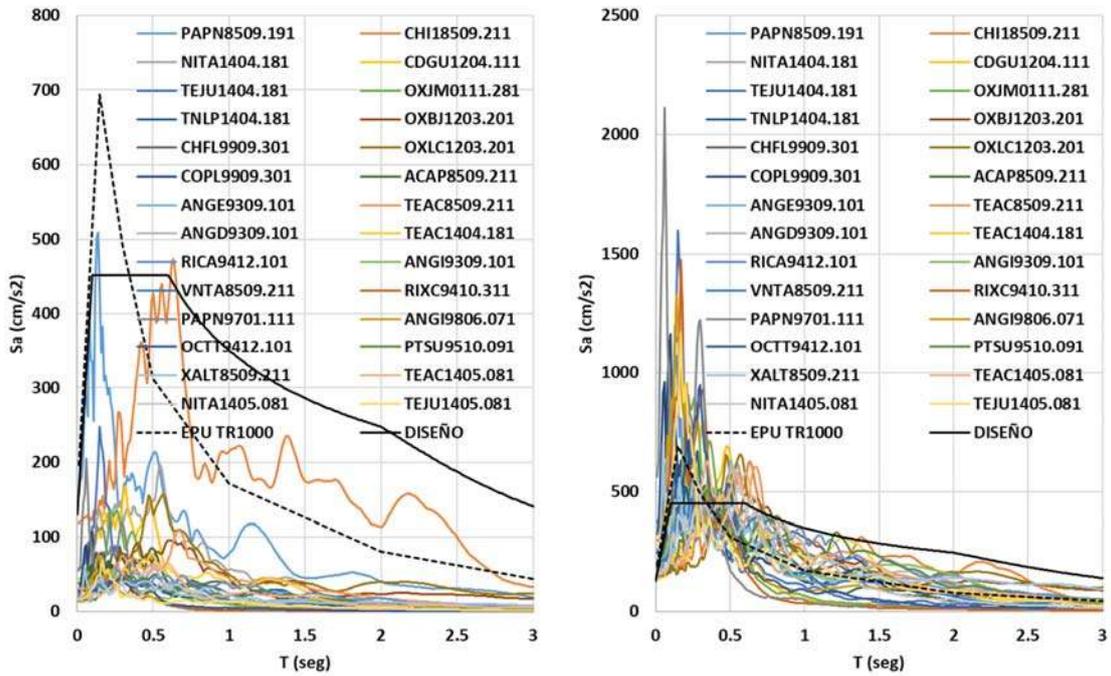


Figura 16. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 5, sin escala (izquierda) y escalados (derecha).

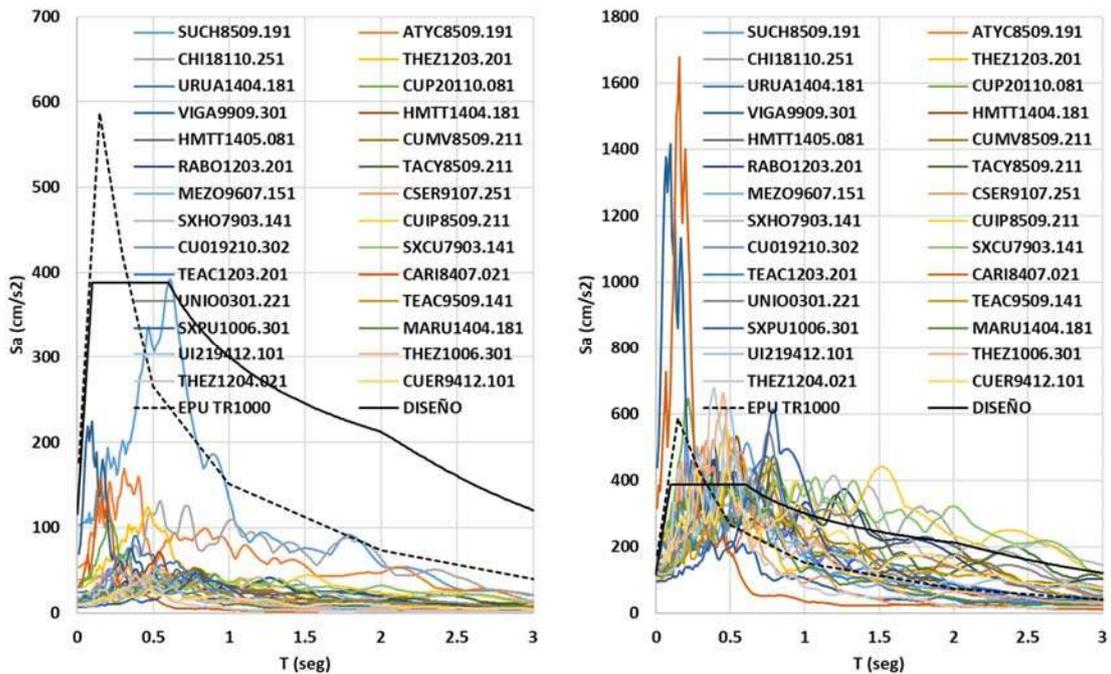


Figura 17. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 6, sin escala (izquierda) y escalados (derecha).

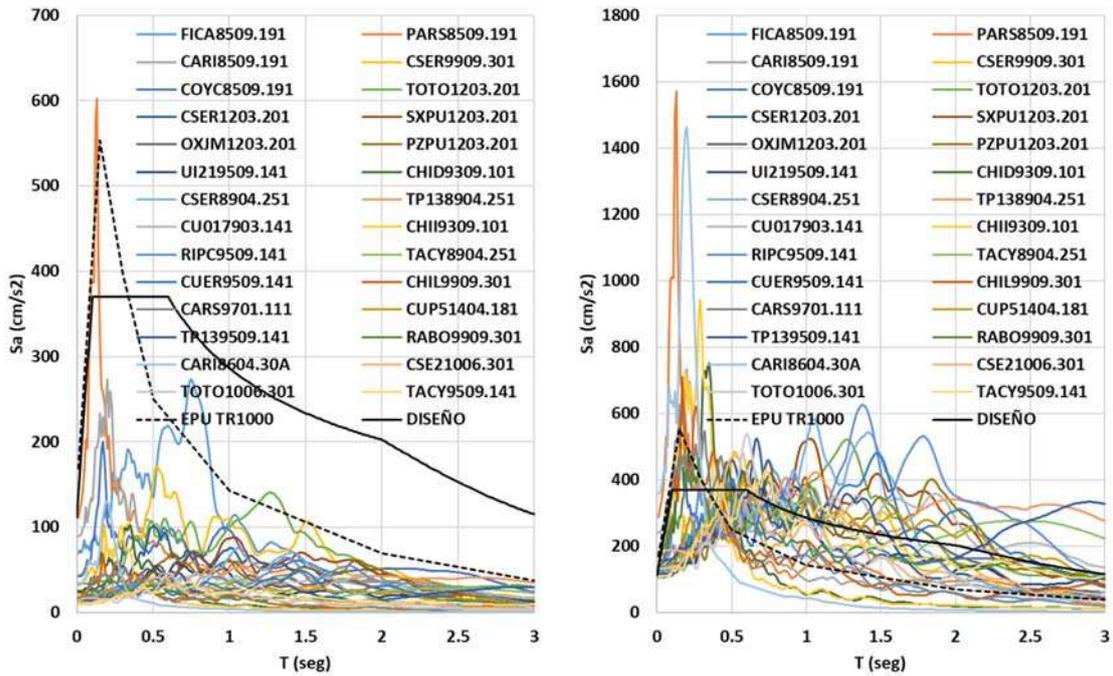


Figura 18. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 7, sin escala (izquierda) y escalados (derecha).

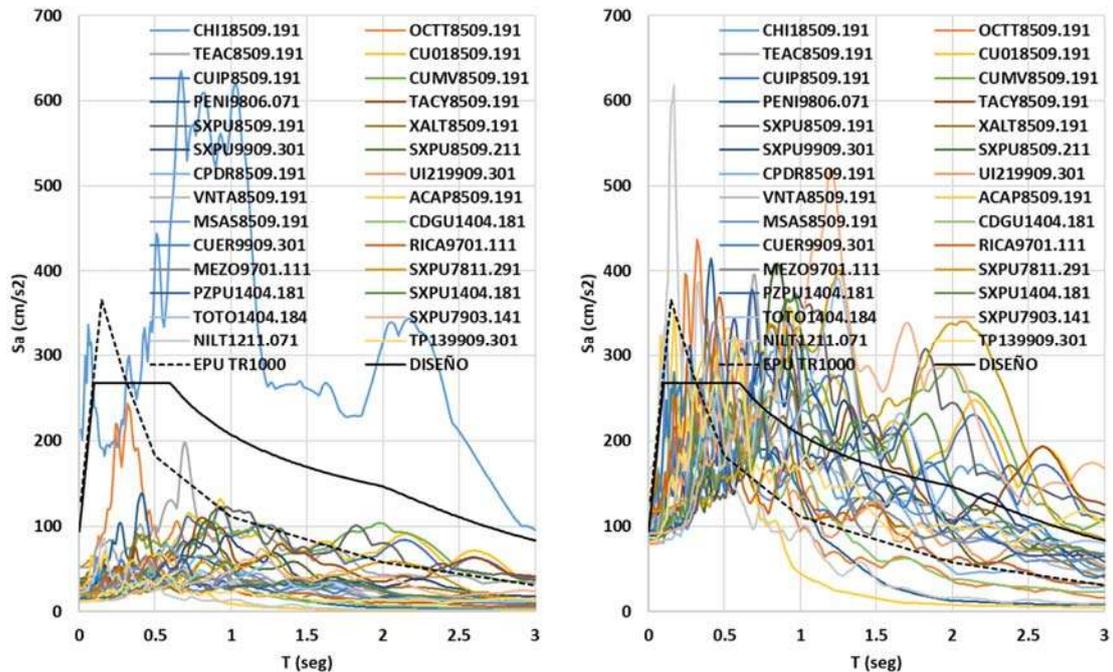


Figura 19. Espectros de diseño, de peligro uniforme y de respuesta para los acelerogramas del grupo 8, sin escala (izquierda) y escalados (derecha).



### 3. MODELOS DE LOS EDIFICIOS A ESTUDIAR

En este capítulo se describen los sistemas estructurales que serán modelados para la ejecución de los análisis no lineales, se muestra el diseño del sistema de entrepiso. También se explica brevemente la filosofía de diseño basada en fuerza y en capacidad, y se realiza el diseño del sistema principal de marcos y del sistema con contravientos.

#### 3.1. Sistemas estructurales

En México, el sistema estructural más frecuente en edificios de concreto reforzado es el que se compone de losas macizas y soportadas por marcos de concreto con o sin contravientos. Por ello, en el presente trabajo se analizan los siguientes sistemas estructurales, de acuerdo con su forma de trabajo ante cargas laterales:

1. **Sistema a base de marcos.** Es el sistema básico, que fungirá como sistema de control para la comparación de resultados de los análisis no lineales. Ante cargas laterales, sus elementos, vigas y columnas, trabajan principalmente a flexión, como marco resistente a momento.
2. **Sistema de marcos con contravientos tipo chevron.** Este sistema concentra el trabajo ante carga lateral en el perímetro del edificio donde se incrementa la rigidez de los marcos mediante contravientos metálicos tipo chevron, en las barreras de defensa los elementos de concreto, vigas y columnas, trabajan principalmente de forma axial.

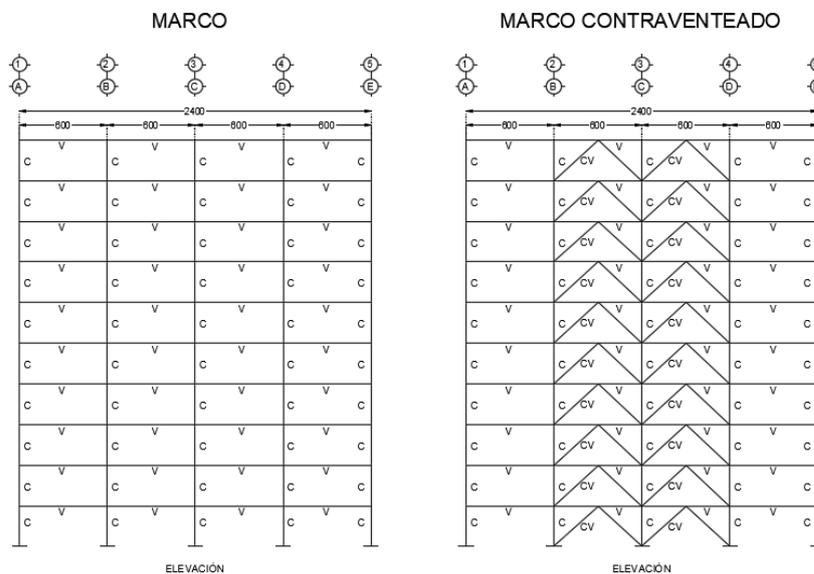


Figura 20. Sistema estructural a base de marcos (izquierda) y a base de marcos con contravientos (derecha).



3. **Sistema de marcos con disipadores.** Para este caso, se montan sobre los contravientos tipo chevron los dispositivos histeréticos por fluencia a flexión tipo TADAS. En este caso una vez que los dispositivos incursionan en el intervalo no lineal de comportamiento, el sistema principal de bigas y columnas trabajan principalmente a flexión.
4. **Sistema de marcos con contravientos y aisladores.** En este sistema la función de los contravientos es rigidizar lateralmente el sistema superior, y concentrar la mayor cantidad de energía por deformación en la base de los edificios por medio de aisladores de caucho con núcleo de plomo.

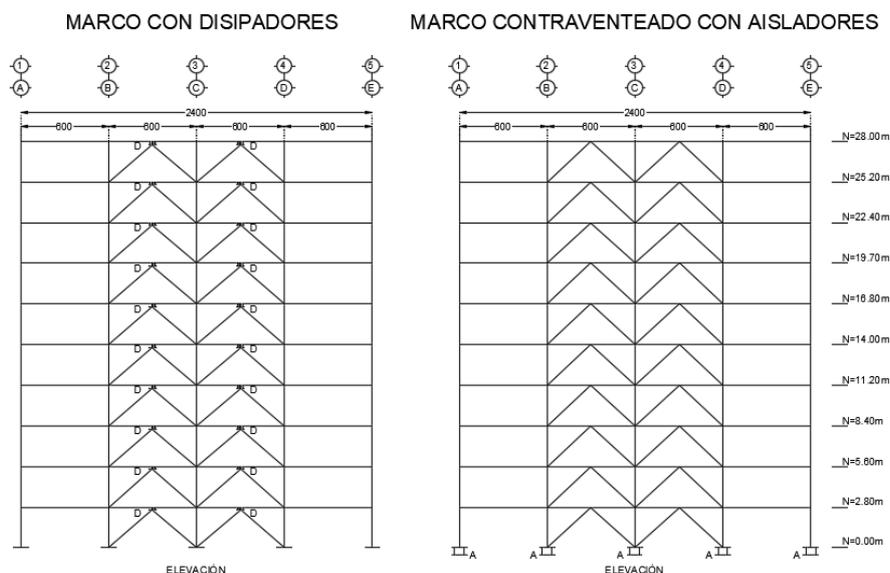


Figura 21. sistema estructural con disipadores (izquierda) y con aislamiento de base (derecha).

### 3.2. Estructuración general.

La planta de los edificios es regular con cuatro crujeas de seis metros en cada dirección, Figura 22. La estructuración de los entrepisos también se hace de forma regular, de tal manera que las vigas y columnas son de iguales dimensiones y armado.

Para realizar un estudio paramétrico, el periodo de los edificios se incrementa aumentando su altura, por lo que se estudian tres alturas diferentes: de dos, cinco y diez niveles con una altura de entrepiso de 2.8 metros medido hasta los centros de masa. Como se muestra en la Figura 23.

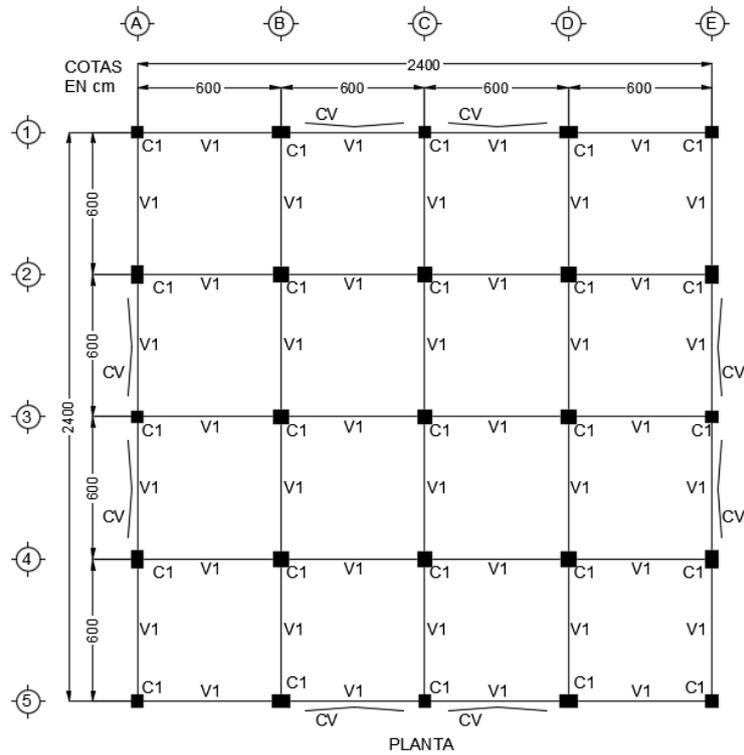


Figura 22. Estructuración en planta.

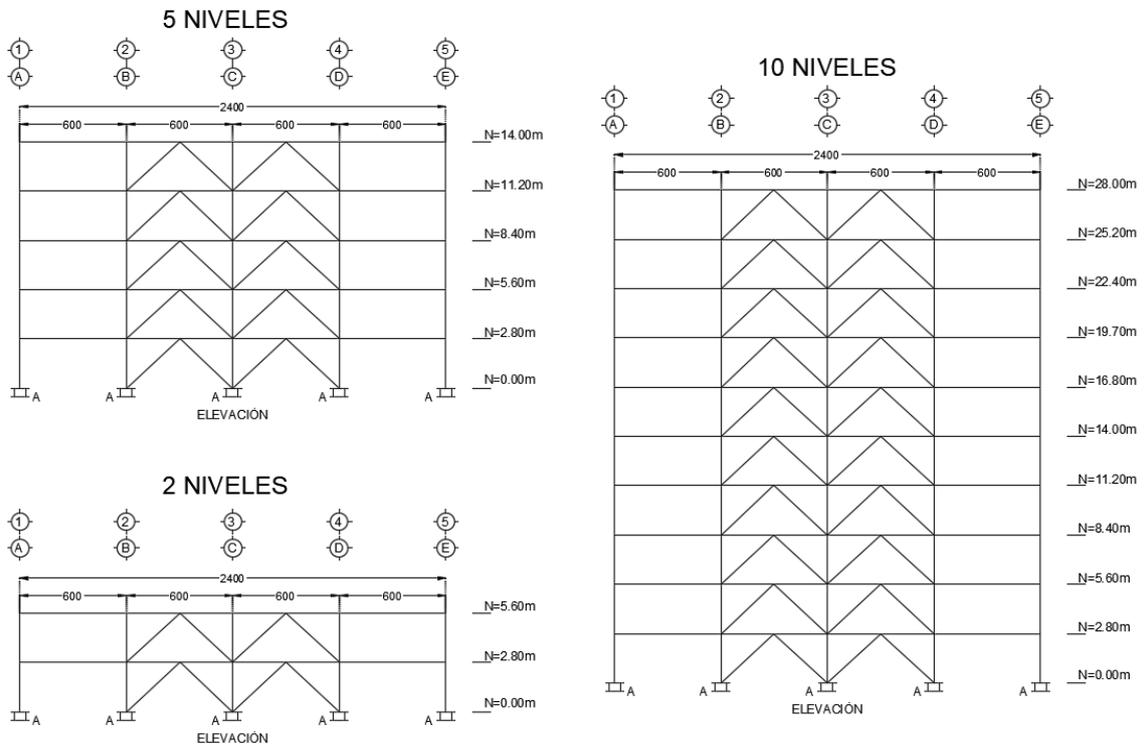


Figura 23. Estructuración en elevación para los edificios con contravientos.



3.3. Sistema de piso.

Las losas de azotea y entrepiso son losas macizas soportadas monolíticamente en vigas principales de concreto reforzado.

1. *Diseño losa de azotea*

Considerando como caso crítico el tablero perimetralmente apoyado, de esquina, con claros de 6m en ambas direcciones, requiere un peralte efectivo mínimo de 12.5 cm para cumplir con los requisitos de las NTC a fin de evitar problemas en las condiciones de servicio tales como agrietamiento o deflexiones excesivas, considerando un recubrimiento de mínimo de 2.5, resulta en una losa de concreto de 15 cm de espesor. Reforzada con varillas #3 @ 20, en ambas direcciones, para momento positivo y negativo, de acuerdo con la cuantía de acero mínimo permitido.

**Diseño de losa maciza**

Tablero **de esquina**

a1	a2	m
6	6	1.00
7.50	7.5	monolítica

concreto: **clase 1**

	perímetro (m)	peralte (cm)
Interior	24.00	11.1
Corto disc.	25.50	11.8
Largo disc.	25.50	11.8
Corto cont.	28.50	13.1
Largo cont.	28.50	13.1
Esquina	27.00	12.5

**Análisis de cargas**

	esp (m)	pesp (kg/m3)	w (kg/m2)
loseta	-	-	20
mortero	0.02	2000	40
relleno	0.05	1600	80
concreto	0.15	2400	360
plafón	0.03	1000	30

Incremento  
w viva 40  
adicional 100  
670

fy (kg/cm2)	fs (kg/cm2)	w (kg/m2)	factor
4200	2520	670	1.15

**Ancho de franjas**

	claro corto (m)	claro largo (m)	fc (kg/cm2)	f*c (kg/cm2)	f''c (kg/cm2)	fy (kg/cm2)	d (cm)
franja extrema	1.5	1.5	250	200	170	4200	12.7
franja central	3	3					

**Coefficientes**

FC= **1.4**

	m	1	1.00	1.01	Mmax (kg-cm)	Mu (kg-cm)
CONT	corto	324	324	324	78149	109408
CONT	largo	324	324	324	78149	109408
DISCONT	corto	190	190	190	45828	64159
DISCONT	largo	190	190	190	45828	64159
POSIT	corto	137	137	137	33044	46262
POSIT	largo	137	137	137	33044	46262

	Claro	Vrs No.	Sep (cm)	As (cm2)	Ro	q	MR (kg-cm)	
CONT	corto	3	20	3.56	0.0028	0.07	165108	Ok
CONT	largo	3	20	3.56	0.0028	0.07	165108	Ok
DISCONT	corto	3	20	3.56	0.0028	0.07	165108	Ok
DISCONT	largo	3	20	3.56	0.0028	0.07	165108	Ok
POSIT	corto	3	20	3.56	0.0028	0.07	165108	Ok
POSIT	largo	3	20	3.56	0.0028	0.07	165108	Ok

0.002 min en entrepiso  
0.003 min en azotea

Figura 24. Hoja de diseño para losa de azotea.



## 2. Diseño losa de entrepiso

Considerando como caso crítico el tablero perimetralmente apoyado, de esquina, con claros de 6m en ambas direcciones, requiere un peralte efectivo mínimo de 12.5 cm para cumplir con los requisitos de las NTC a fin de evitar problemas en las condiciones de servicio tales como agrietamiento o deflexiones excesivas, considerando un recubrimiento de mínimo de 2.5, resulta en una losa de concreto de 15 cm de espesor. Reforzada con varillas #3 @ 25, en ambas direcciones, para momento positivo y negativo, de acuerdo con la cuantía de acero mínimo permitido.

### Diseño de losa maciza

Tablero **de esquina**

a1	a2	m
6	6	1.00
7.50	7.5	monolítica

concreto: **clase 1**

	perímetro (m)	peralte (cm)
Interior	24.00	11.0
Corto disc.	25.50	11.7
Largo disc.	25.50	11.7
Corto cont.	28.50	13.1
Largo cont.	28.50	13.1
Esquina	27.00	12.4

### Análisis de cargas

	esp (m)	pesp (kg/m3)	w (kg/m2)
loseta	-	-	20
mortero	0.02	2000	40
relleno	0	1600	0
concreto	0.15	2400	360
plafón	0.03	1000	30

Incremento **40**  
w viva **170**  
adicional **660**

fy (kg/cm2)	fs (kg/cm2)	w (kg/m2)	factor
4200	2520	660	1.15

### Ancho de franjas

	claro corto (m)	claro largo (m)	fc (kg/cm2)	f*c (kg/cm2)	f''c (kg/cm2)	fy (kg/cm2)	d (cm)
franja extrema	1.5	1.5	250	200	170	4200	12.7
franja central	3	3					

### Coefficientes

FC= **1.4**

	m	1	1.00	1.01	Mmax (kg-cm)	Mu (kg-cm)
CONT	corto	324	324	324	76982	107775
CONT	largo	324	324	324	76982	107775
DISCONT	corto	190	190	190	45144	63202
DISCONT	largo	190	190	190	45144	63202
POSIT	corto	137	137	137	32551	45572
POSIT	largo	137	137	137	32551	45572

	Claro	Vrs No.	Sep (cm)	As (cm2)	Ro	q	MR (kg-cm)	
CONT	corto	3	25	2.85	0.0022	0.06	133035	Ok
CONT	largo	3	25	2.85	0.0022	0.06	133035	Ok
DISCONT	corto	3	25	2.85	0.0022	0.06	133035	Ok
DISCONT	largo	3	25	2.85	0.0022	0.06	133035	Ok
POSIT	corto	3	25	2.85	0.0022	0.06	133035	Ok
POSIT	largo	3	25	2.85	0.0022	0.06	133035	Ok

0.002 min en entrepiso

0.003 min en azotea

Figura 25. Hoja de diseño para losa de entrepiso.



3.4. Filosofía de diseño sísmico basada en fuerzas.

La filosofía de diseño basada en fuerzas es ampliamente usada en la práctica, consiste en analizar la estructura elásticamente, limitando las distorsiones de entrepiso a valores permisibles según la clasificación de la estructura, la estructura es clasificada en función de su estructuración e importancia. Se selecciona un factor de comportamiento sísmico Q de acuerdo con las características geométricas, dinámicas, de resistencia y detallado de refuerzo que tendrá la construcción. Las acciones sísmicas con que se analiza la estructura se reducen de manera proporcional al factor Q. Este método tiene el objetivo de representar la reducción de demanda de fuerza sísmica, una vez que la estructura incursiona en el rango inelástico, está basada en la ley de igual desplazamiento.

En el presente trabajo, el diseño de los edificios se lleva a cabo siguiendo la filosofía de “diseño por capacidad”, en la cual se busca orientar el comportamiento de la estructura dentro del intervalo inelástico, algunos criterios básicos de esta filosofía es el comportamiento “viga débil-columna fuerte” con lo que se busca que las articulaciones plásticas se generen en las vigas y no en las columnas. Otro criterio de esta filosofía es concentrar el comportamiento inelástico en elementos diseñados de manera apropiada para ello, elementos con una capacidad de ductilidad adecuada, a fin de evitar fallas repentinas y el colapso de la estructura. Para el caso de estudio se considera que las cargas gravitacionales sean soportadas por un sistema a base de marcos al interior de la planta, y las cargas laterales accidentales debidas a eventos sísmicos, sean soportadas por muros perimetrales, esto busca ayuda también a controlar los efectos de torsión en el intervalo inelástico, los cuales pueden comprometer la estabilidad de la construcción.

3.5. Análisis y dimensionamiento del sistema a base de marcos.

El dimensionamiento de los elementos componentes de este sistema estructural se realiza de acuerdo al procedimiento expresado en el siguiente diagrama:

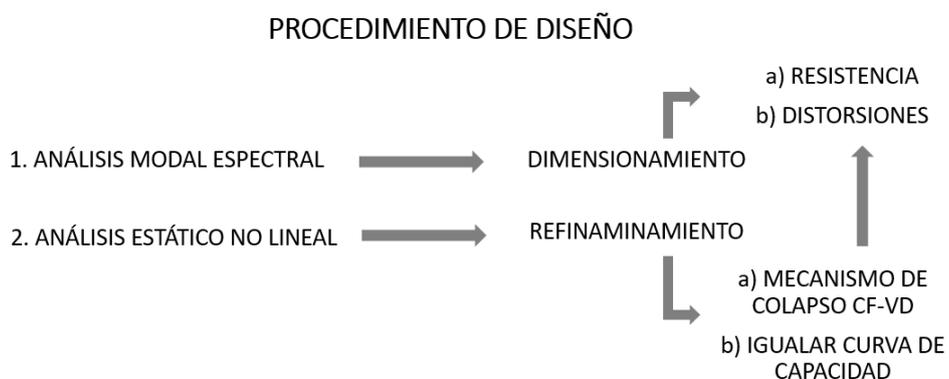


Figura 26. Procedimiento de diseño y refinamiento.



Con base en análisis modal espectral se propone un dimensionamiento preliminar que satisfaga tanto los requisitos de resistencia y servicio, para después mediante un análisis estático no lineal refinar iterativamente el dimensionamiento, de forma que se satisfaga el mecanismo columna fuerte-viga débil. El reglamento (NTC-2017) busca garantizar dicho mecanismo, mediante el cumplimiento de la siguiente relación en los nudos:

$$\frac{\sum Mc}{\sum Mv} > 1.5$$

Ecuación 1.

Lo que implica que la suma de momentos resistentes de las columnas en el paño del nudo, sea 50% superior a la suma de los momentos resistentes de las vigas que llegan a dicho nudo.

En el procedimiento de diseño de los edificios, se identificaron las siguientes etapas para el comportamiento de las estructuras:

**Primera etapa:** Los elementos estructurales del edificio cumplen con los requisitos de resistencia y de distorsiones de acuerdo con el análisis modal espectral, también cumple con los requisitos para utilizar Q=4, pero no en todos los nudos se satisface la Ecuación 1. El mecanismo de colapso para esta etapa se muestra en la Figura 27.

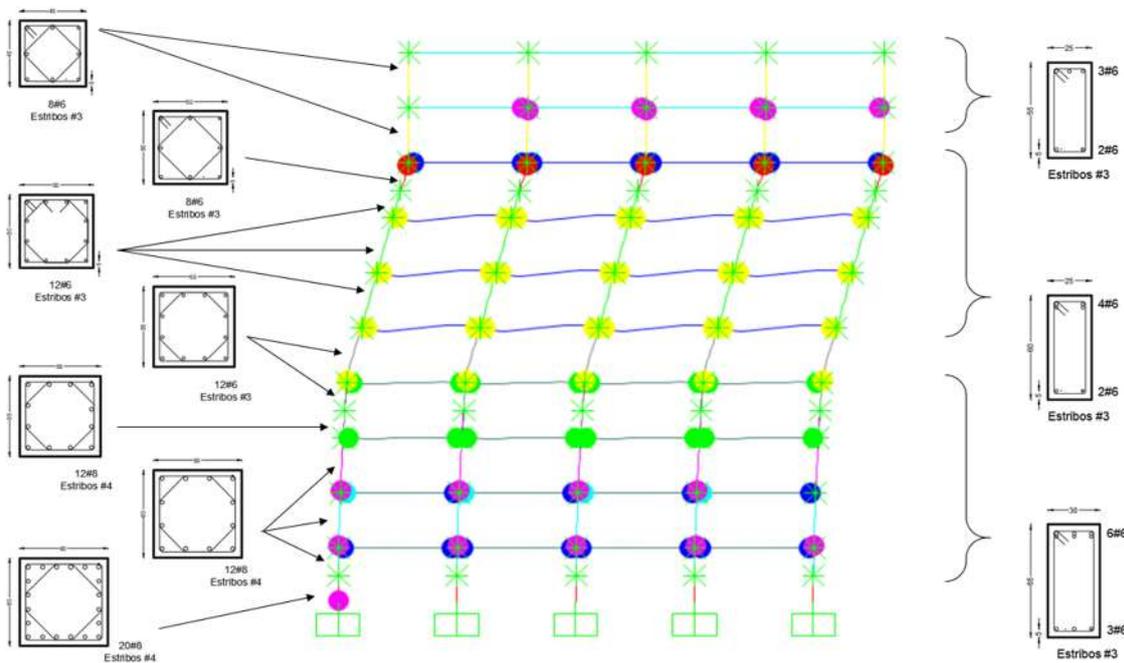


Figura 27. Mecanismo de colapso para el edificio en la primera etapa.

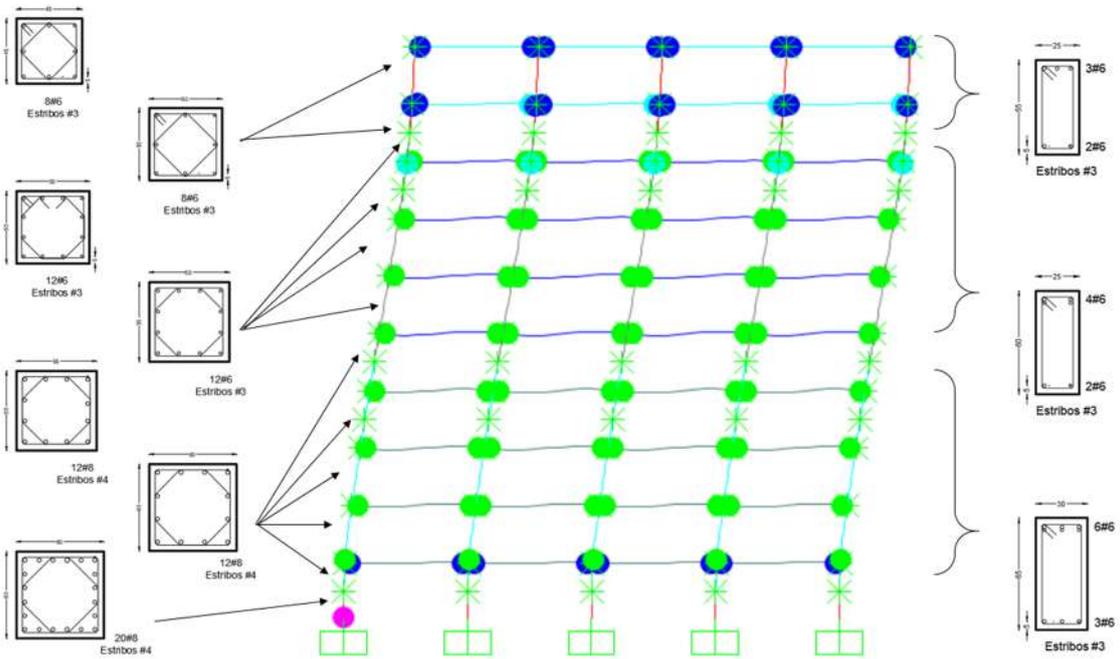


Figura 28. Mecanismo de colapso para el edificio en la segunda etapa.

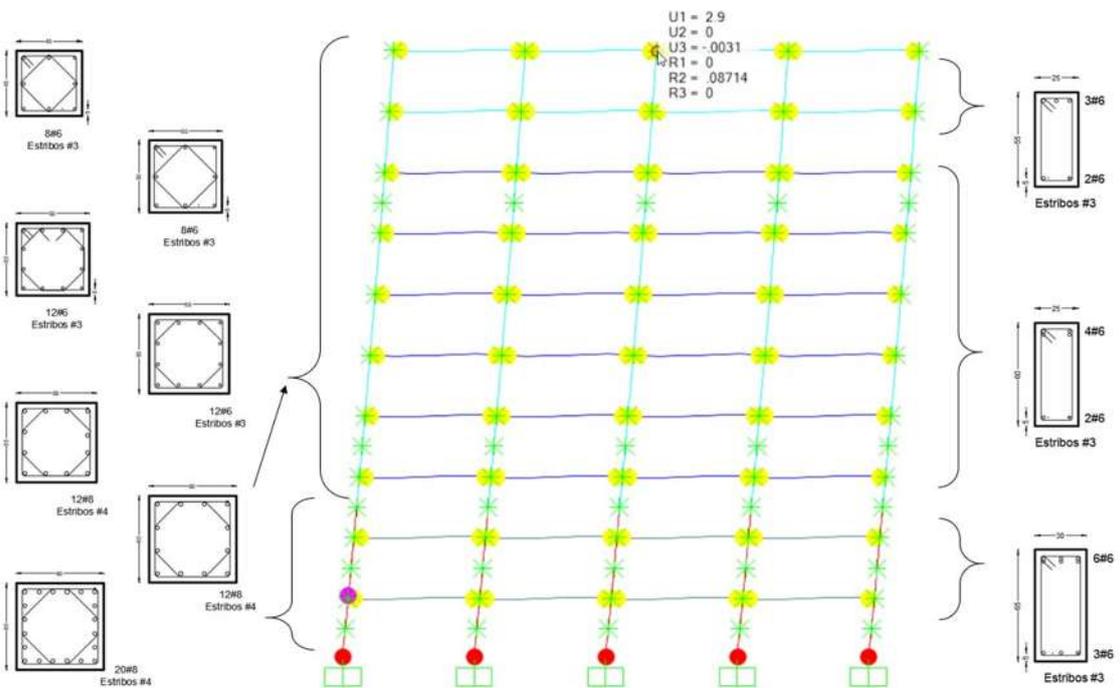


Figura 29. Mecanismo de colapso para el edificio en la tercera etapa.



**Segunda etapa:** Los elementos estructurales del edificio cumplen con los requisitos de resistencia y de distorsiones de acuerdo con el análisis modal espectral, además, en todos los nudos se satisface la Ecuación 1. El mecanismo de colapso para esta etapa se muestra en la Figura 28

**Tercera etapa:** Los elementos estructurales del edificio cumplen con los requisitos de resistencia y de distorsiones de acuerdo con el análisis modal espectral, además, se asegura el cumplimiento de mecanismo columna fuerte-viga débil, mediante análisis estáticos no lineales. El mecanismo de colapso para esta etapa se muestra en la Figura 29. Figura 28

Al comparar las curvas de capacidad del sistema para la primera etapa y la tercera etapa, Figura 30. Comparación de curvas de capacidad para el sistema Figura 30, se aprecia un incremento en la ductilidad del 215%. Este incremento de ductilidad y seguridad implica un incremento en el costo del acero y concreto de las columnas de un 20% para el ejemplo. No obstante que la resistencia en ambos diseños es similar, la capacidad dúctil es considerablemente diferente. En cuanto la segunda etapa, se presenta un pequeño incremento de resistencia y de ductilidad al compararse con la primera etapa, también se observa un mecanismo de colapso más uniforme en los niveles intermedios, sin embargo, presenta discontinuidades las articulaciones plásticas en los primeros y últimos. En la segunda etapa el análisis estático tuvo problemas de convergencia una vez que se presenta el mecanismo mostrado.

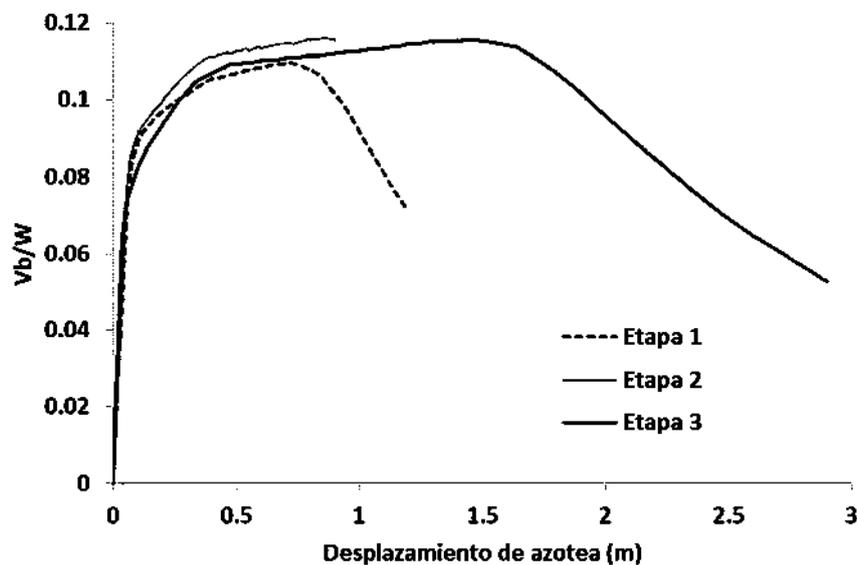


Figura 30. Comparación de curvas de capacidad para el sistema en las tres etapas de diseño.



El diseño de los edificios a base de marcos resistentes a momentos, se realizó considerando los siguientes paramentos de acuerdo con el manual de la CFE de diseño por sismo:

La estructura es TIPO 1 de acuerdo con la clasificación de estructuras según su estructuración de la CFE. Y del GRUPO B de acuerdo con la clasificación según su destino.

De acuerdo con la sección 3.3.1.1 del MDOC, se considera un factor de comportamiento sísmico  $Q=4$  en ambas direcciones del análisis, debido a que la estructura cumple con los cuatro requisitos especificados:

1. Los marcos de cada entrepiso son capaces de resistir, sin contar muros ni contravientos, cuando menos 50% de la fuerza sísmica.
2. Los marcos son capaces de resistir al menos el 80% de las fuerzas laterales totales sin la contribución de los muros de mampostería.
3. El mínimo cociente de la capacidad resistente de un entrepiso entre la acción de diseño no difiere en más de 35% del promedio de este cociente para todos los entrepisos. El último entrepiso queda excluido de este requisito.

Nivel	Capacidad	Accion	Cociente	Diferencia
1	200	156.9	1.27	33%
2	200	102.9	1.94	33%
<b>Promedio</b>			1.61	

4. Los marcos y muros de concreto reforzado cumplen con los requisitos que se fijan para marcos y muros dúctiles en las normas técnicas complementarias para estructuras de concreto vigentes. El ancho mínimo de la viga es de 25 cm.

Se toma en cuenta una sobre resistencia índice  $R_o=2.5$  de acuerdo con la sección 3.3.1.3 del MDOC debido a que el sistema estructural es a base de marcos dúctiles diseñados con  $Q=4$ . Se considera un factor por redundancia  $p=1.25$  según la sección 3.3.1.4, debido a que la estructura cuenta con más de tres crujías en sus líneas de defensa en ambas direcciones. La estructura cumple con los requisitos de regularidad por lo que se considera un factor correctivo por irregularidad  $\alpha=1$ , de acuerdo con la sección 3.3.2.4 del MDOC.

De acuerdo con los parámetros determinados previamente, y con ayuda del programa PRODISIS de la CFE, se determina el espectro de diseño en terreno duro, que se muestra a continuación:

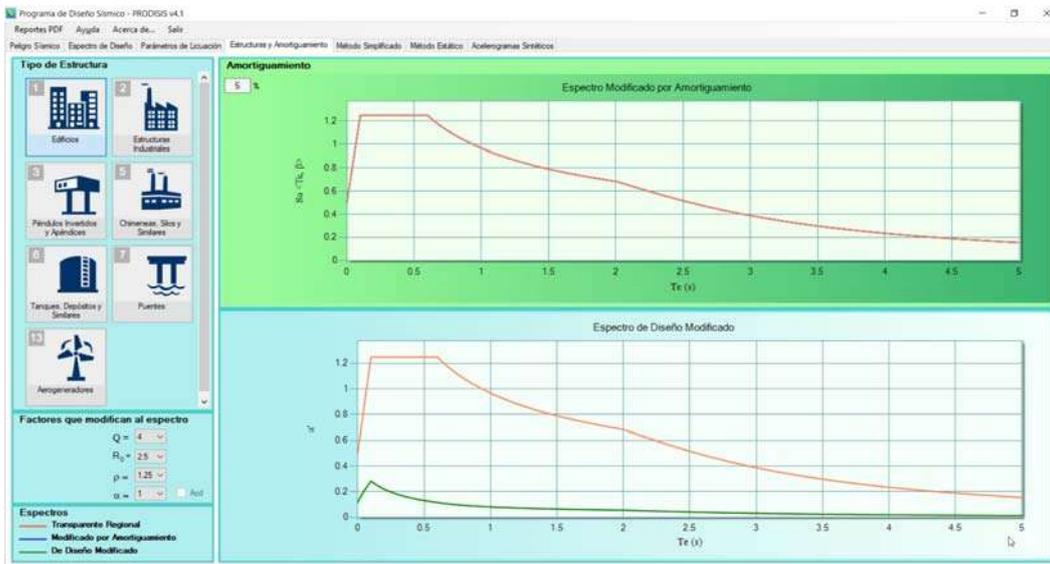


Figura 31. Interface del programa PRODISIS y espectros de diseño.

En la Tabla 5. Se presenta la relación de los modelos y sitios de estudio. Desde la Figura 32 a la Figura 43, se muestran los croquis de dimensiones y curva de capacidad para los diferentes edificios.

Tabla 5. Relación de los modelos y sitios de estudio.

MODELO ID	SITIO	NIVELES	DISTANCIA A LA LÍNEA DE CONTACTO
PE_02	Puerto Escondido, Oax.	2	< 50 km
PE_05	Puerto Escondido, Oax.	5	< 50 km
PE_10	Puerto Escondido, Oax.	10	< 50 km
SC_02	Salina Cruz, Oax.	2	50 km < d < 100 km
SC_05	Salina Cruz, Oax.	5	50 km < d < 100 km
SC_10	Salina Cruz, Oax.	10	50 km < d < 100 km
OAX_02	Oaxaca, Oax.	2	100 km < d < 150 km
OAX_05	Oaxaca, Oax.	5	100 km < d < 150 km
OAX_10	Oaxaca, Oax.	10	100 km < d < 150 km
HUA_02	Huajuapán de León, Oax.	2	150 km < d < 200 km
HUA_05	Huajuapán de León, Oax.	5	150 km < d < 200 km
HUA_10	Huajuapán de León, Oax.	10	150 km < d < 200 km
TEH_02	Tehuacán, Pue.	2	200 km < d < 250 km
TEH_05	Tehuacán, Pue.	5	200 km < d < 250 km
TEH_10	Tehuacán, Pue.	10	200 km < d < 250 km
PUE_02	Puebla, Pue.	2	250 km < d < 300 km
PUE_05	Puebla, Pue.	5	250 km < d < 300 km
PUE_10	Puebla, Pue.	10	250 km < d < 300 km
COR_02	Córdoba, Ver.	2	300 km < d < 350 km
COR_05	Córdoba, Ver.	5	300 km < d < 350 km
COR_10	Córdoba, Ver.	10	300 km < d < 350 km
XAL_02	Xalapa, Ver.	2	> 350 km
XAL_05	Xalapa, Ver.	5	> 350 km
XAL_10	Xalapa, Ver.	10	> 350 km

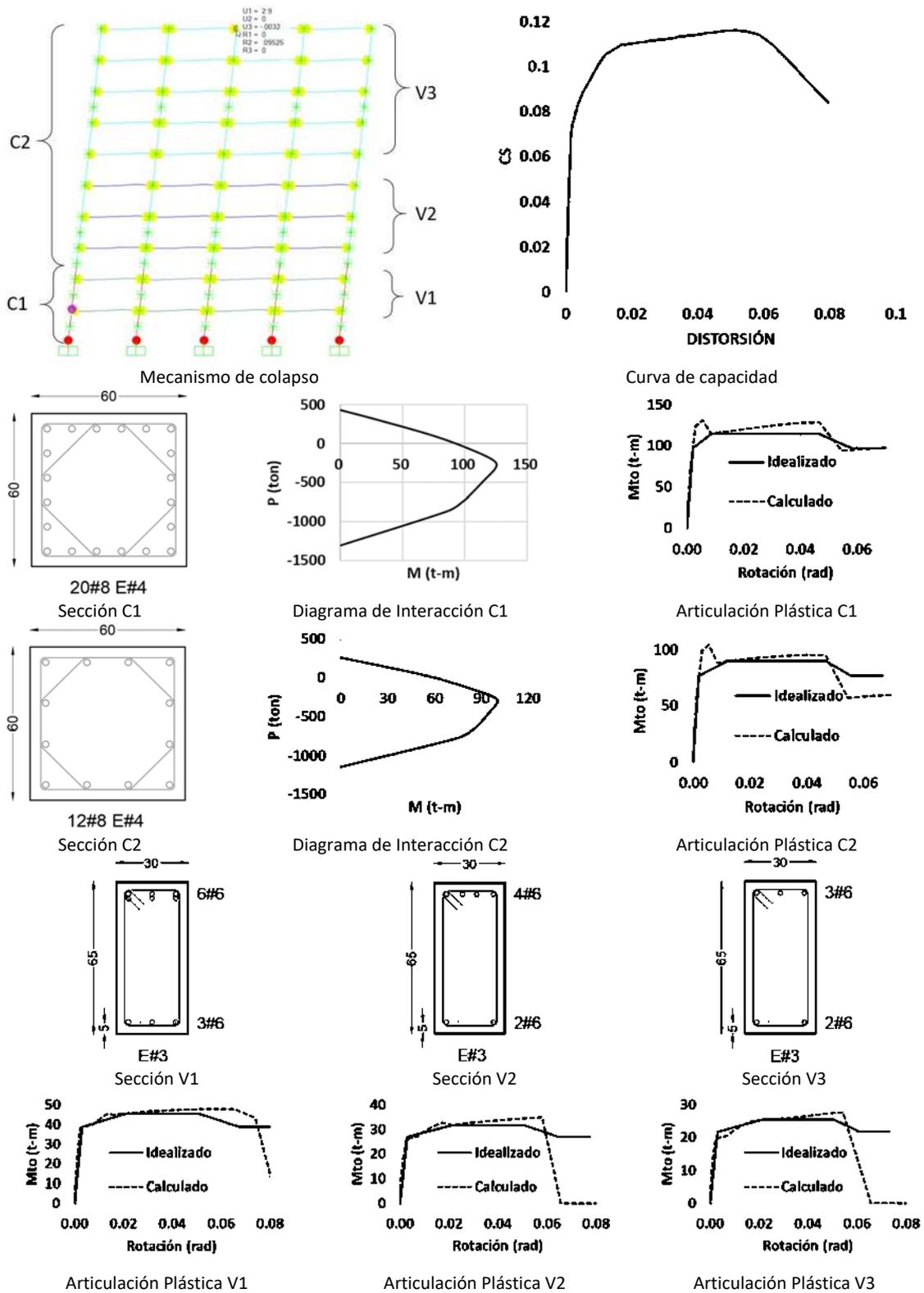


Figura 32. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo PE-10.

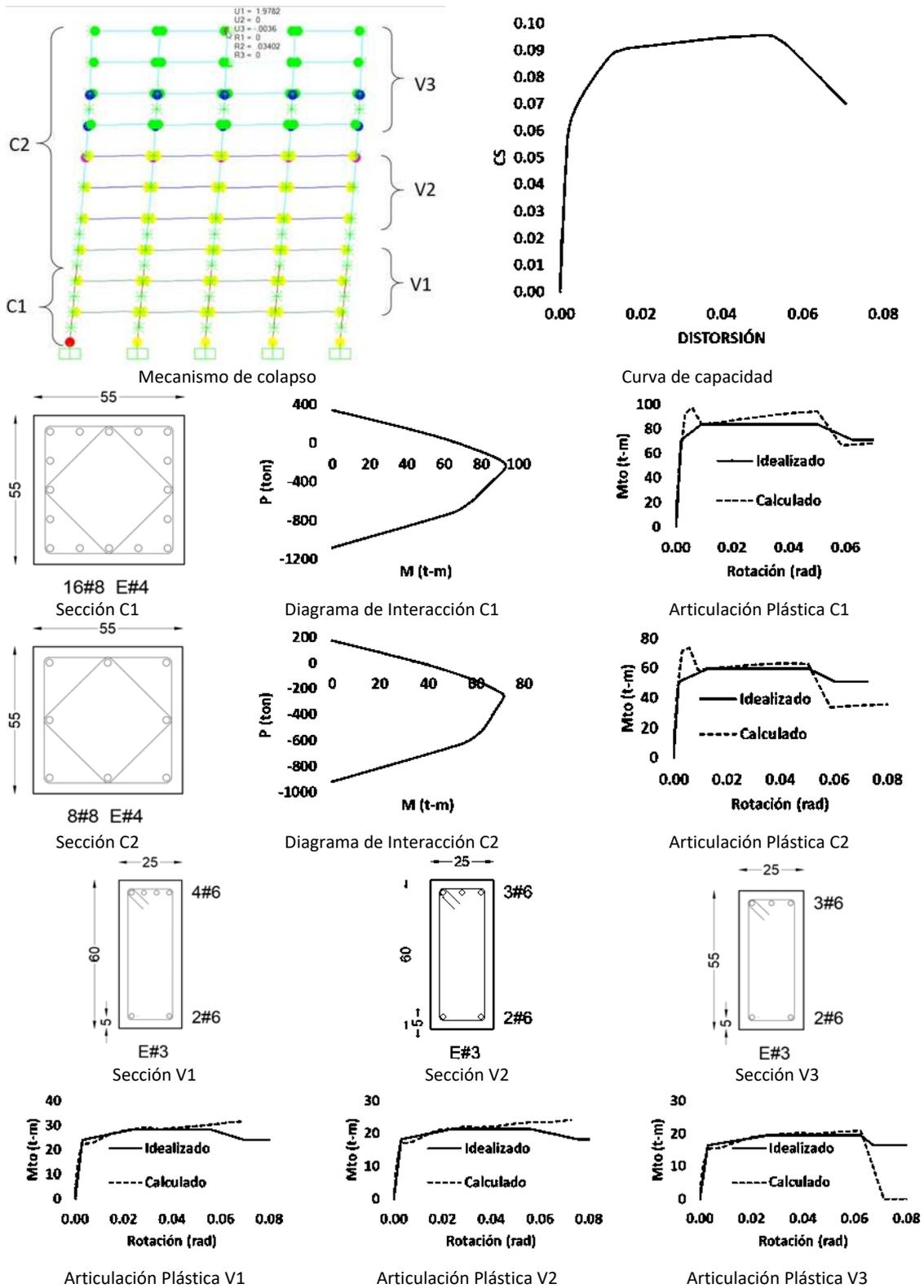


Figura 33. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo SC-10.

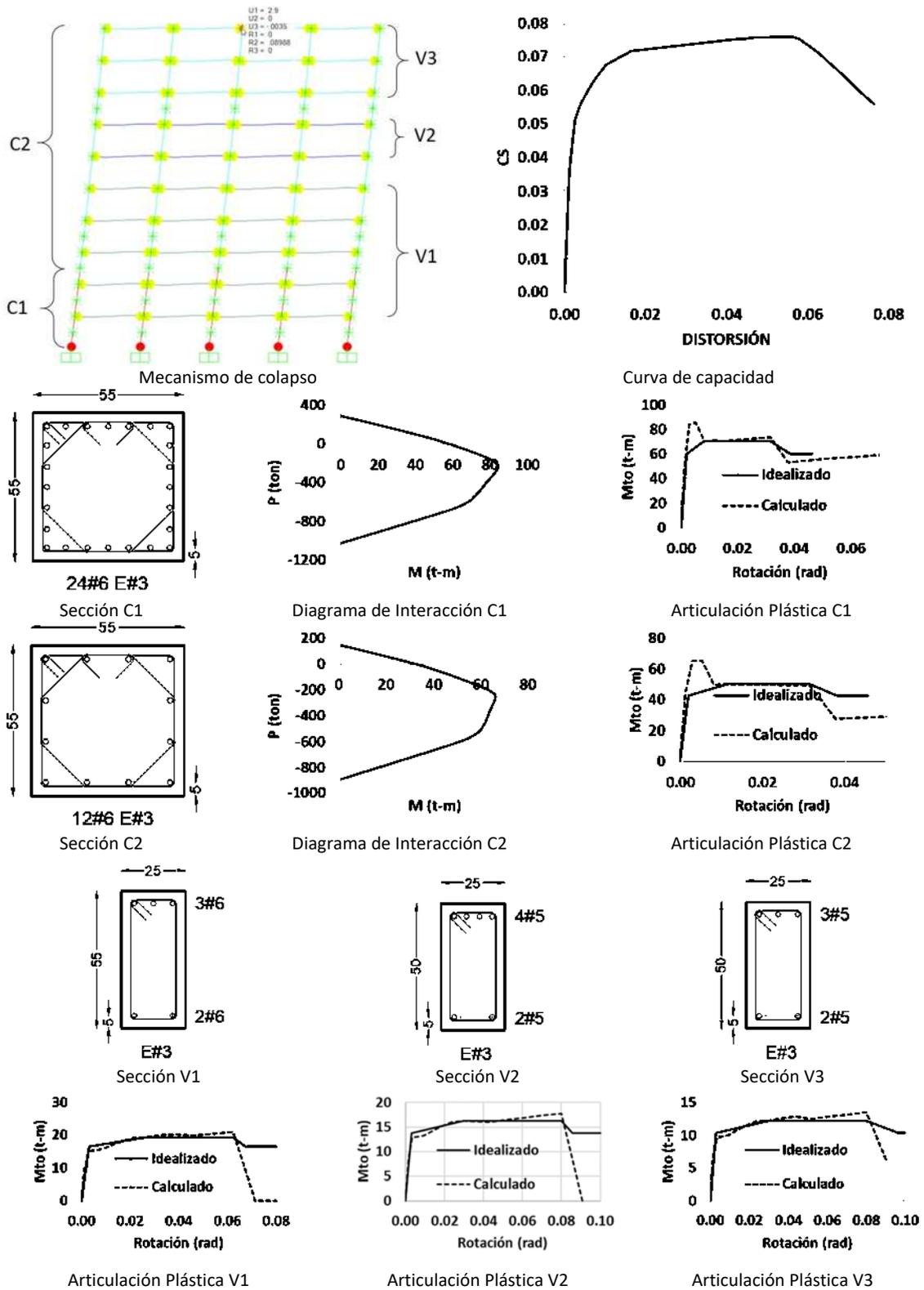


Figura 34. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo OAX-10.

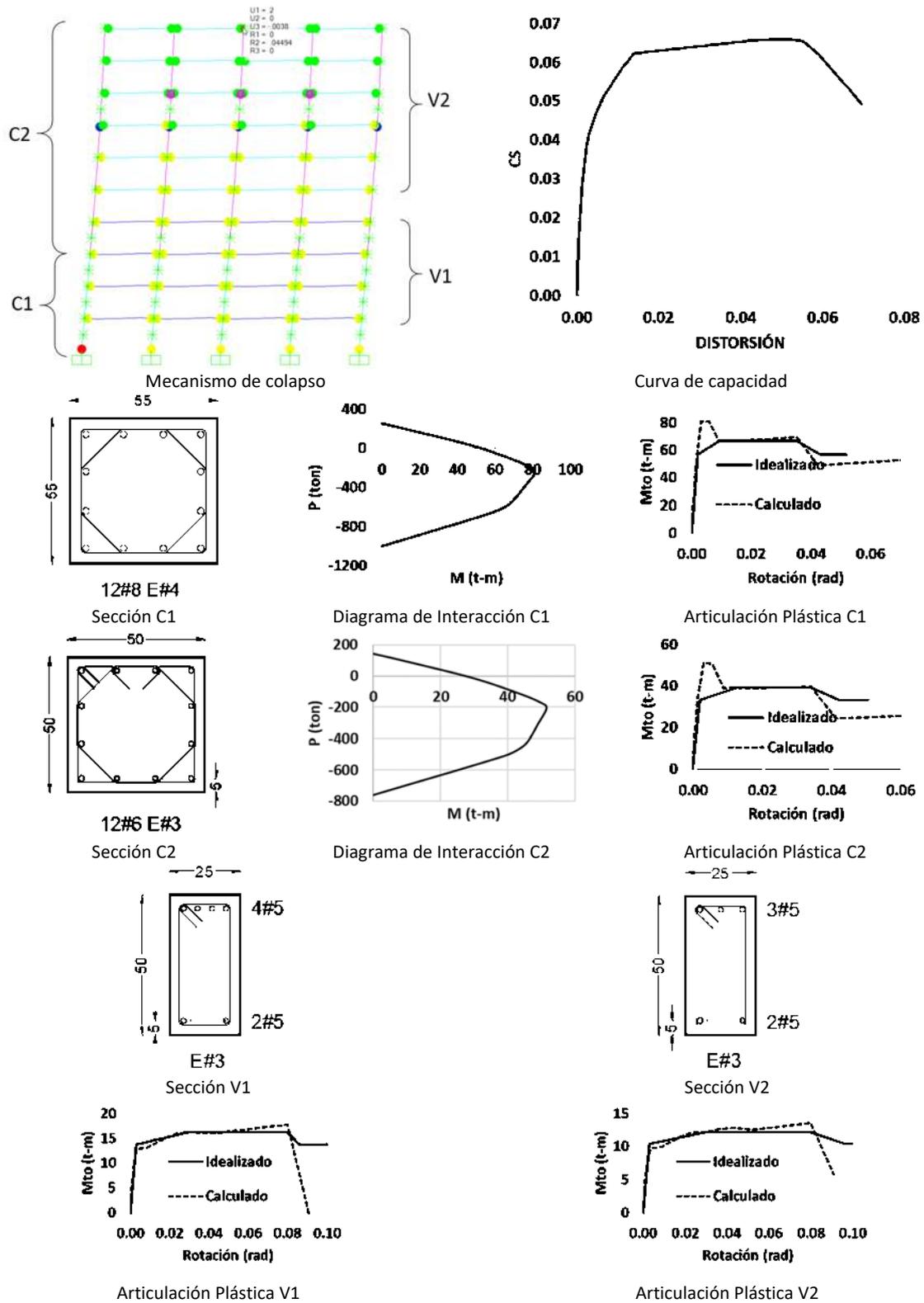


Figura 35. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo HUA-10, TEH-10, PUE-10, COR-10 y XAL-10.

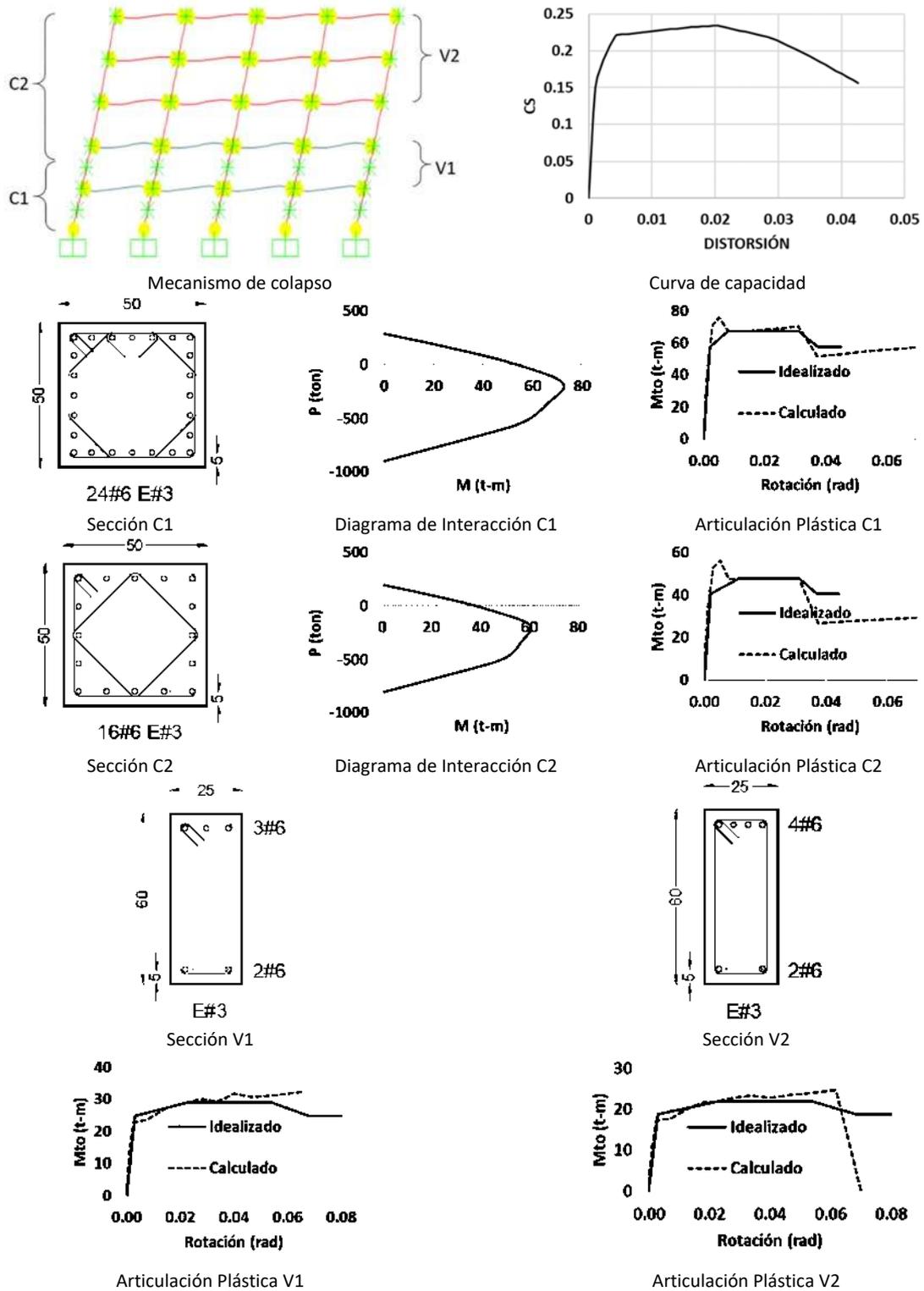


Figura 36. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo PE-05.

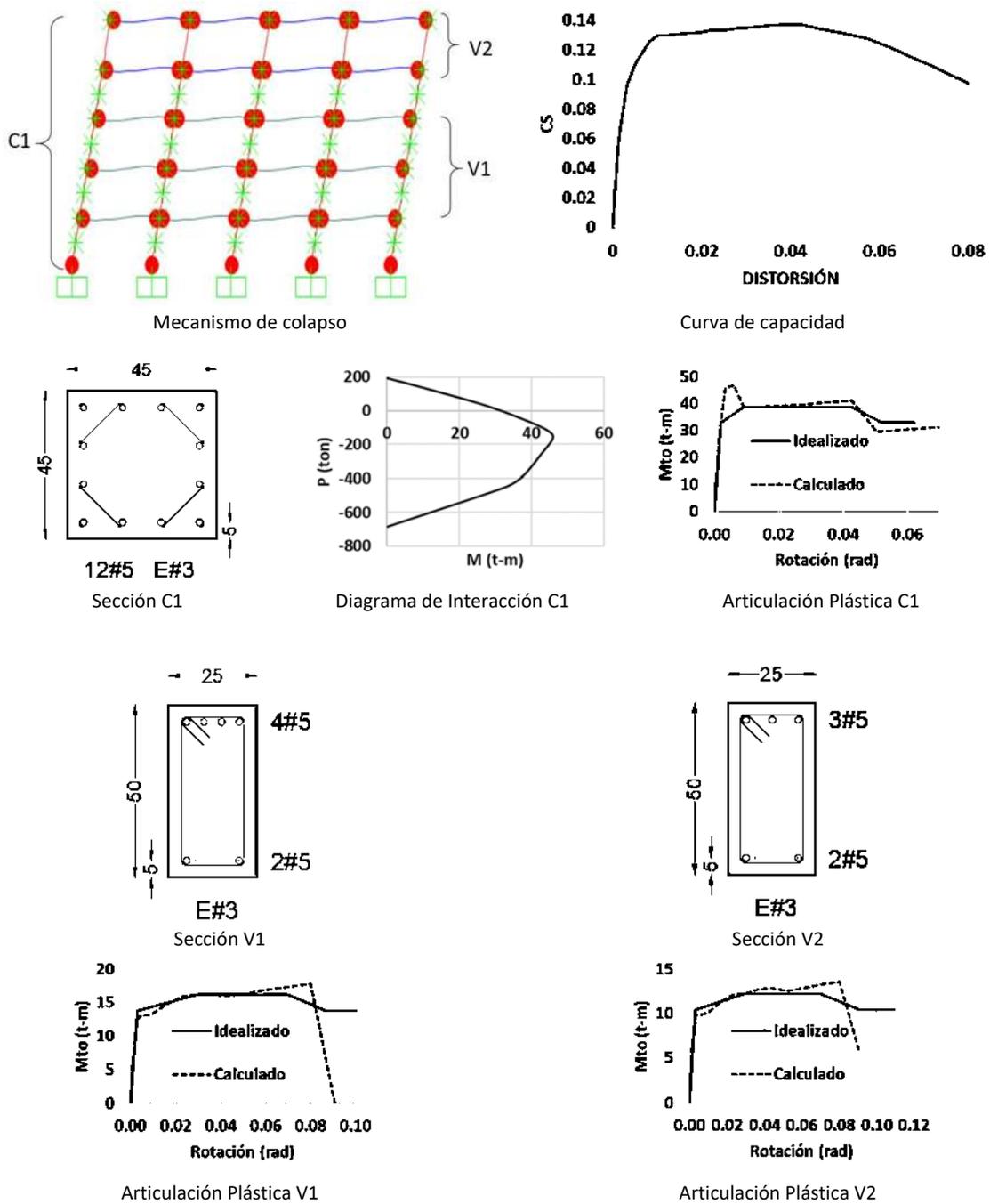


Figura 37. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo SC-05.

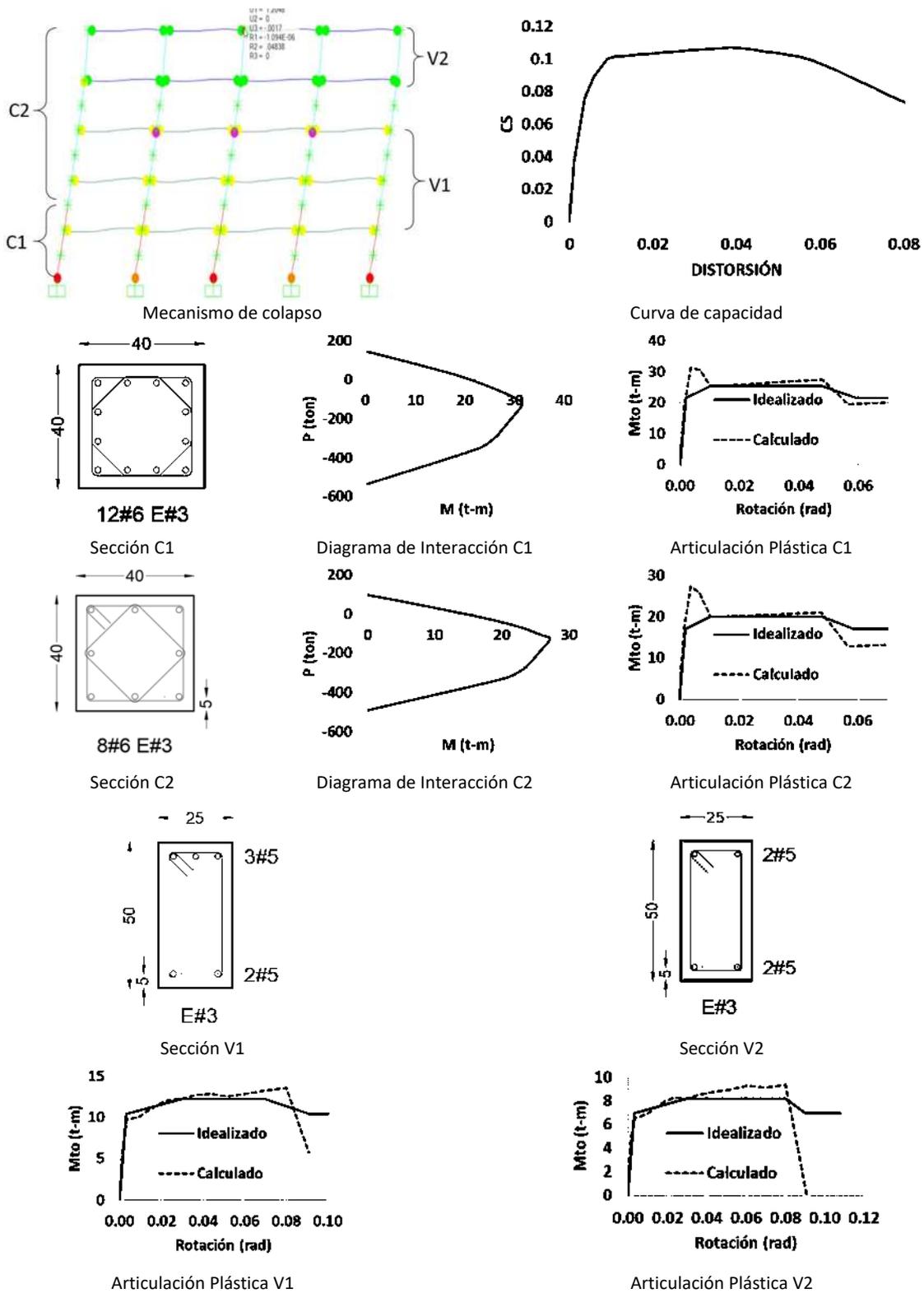


Figura 38. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo OAX-05.

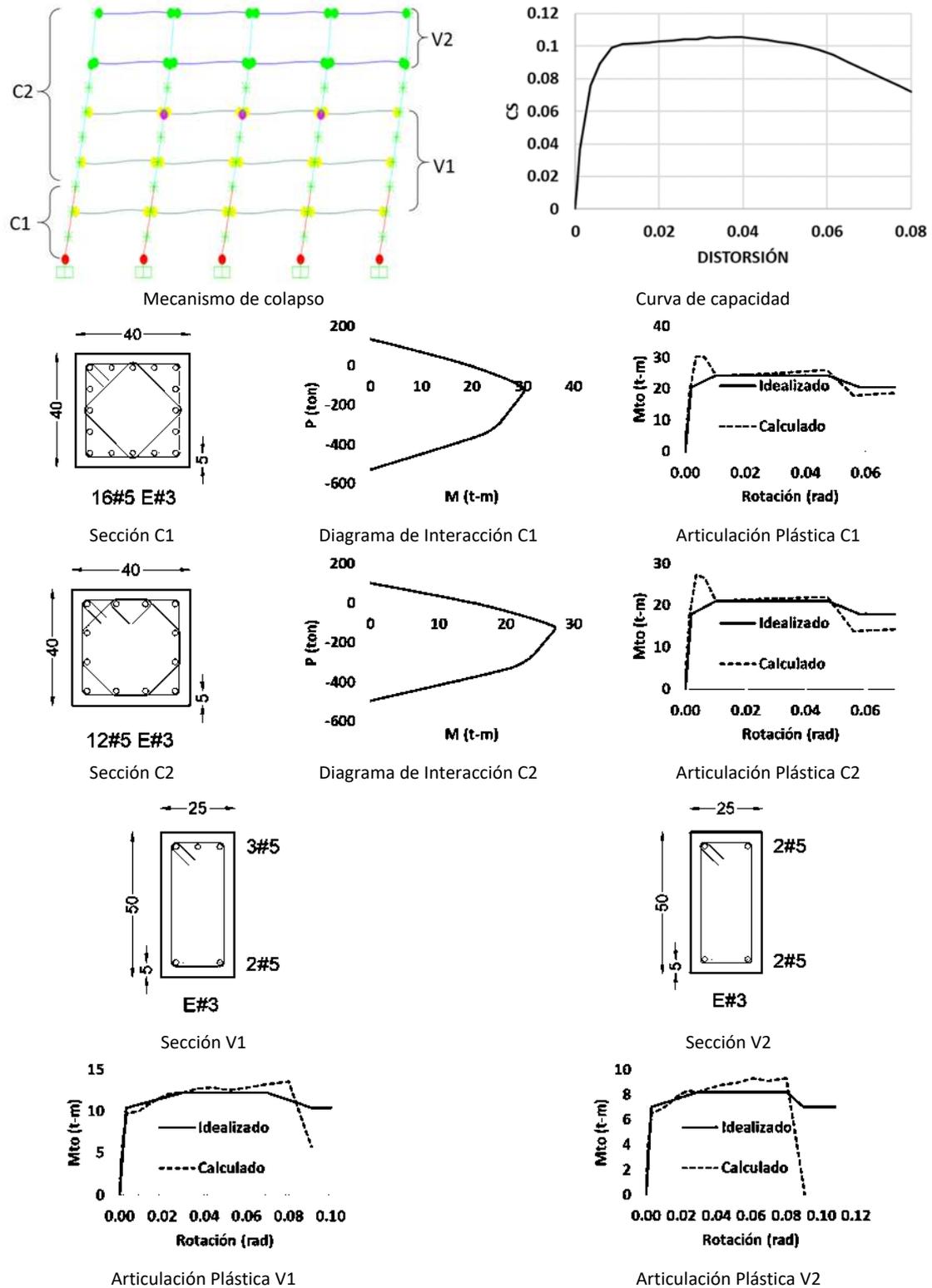


Figura 39. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo HUA-05, TEH-05, PUE-05, COR-05 y XAL-05.

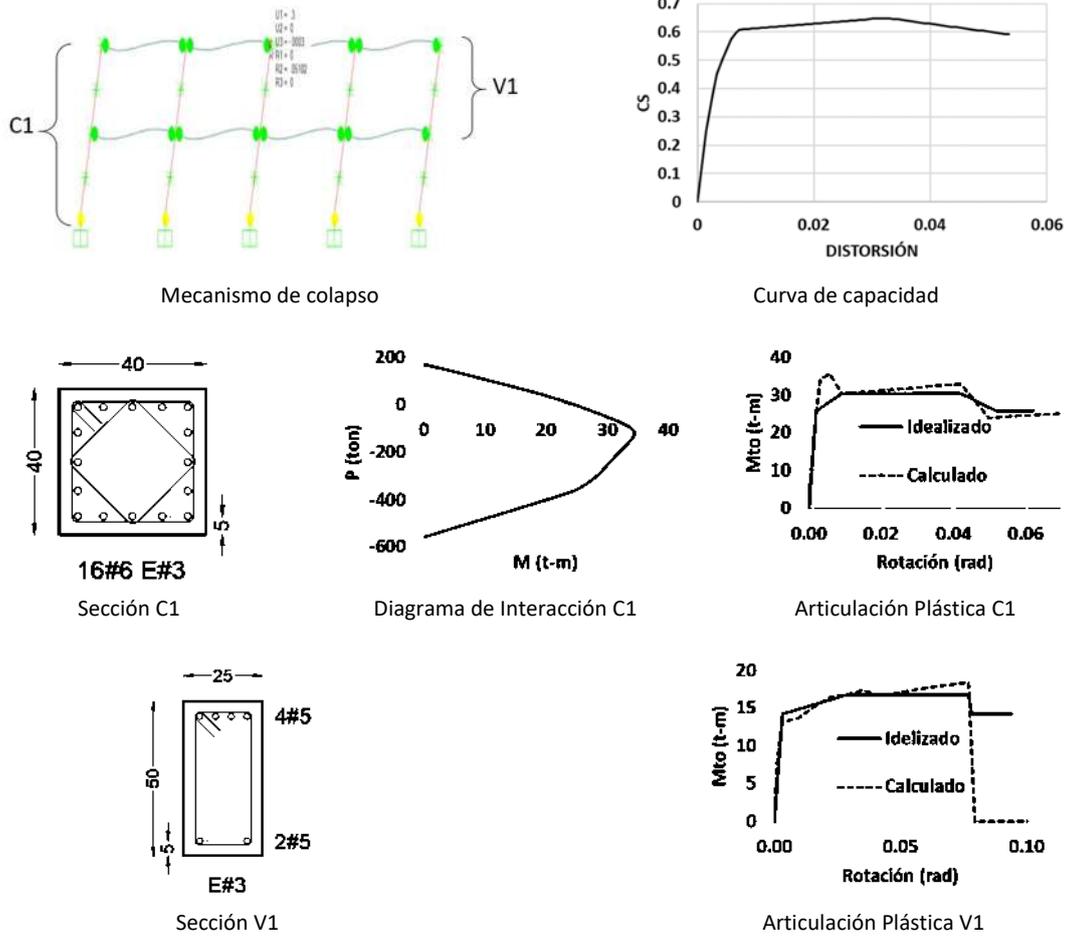


Figura 40. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo PE-02.

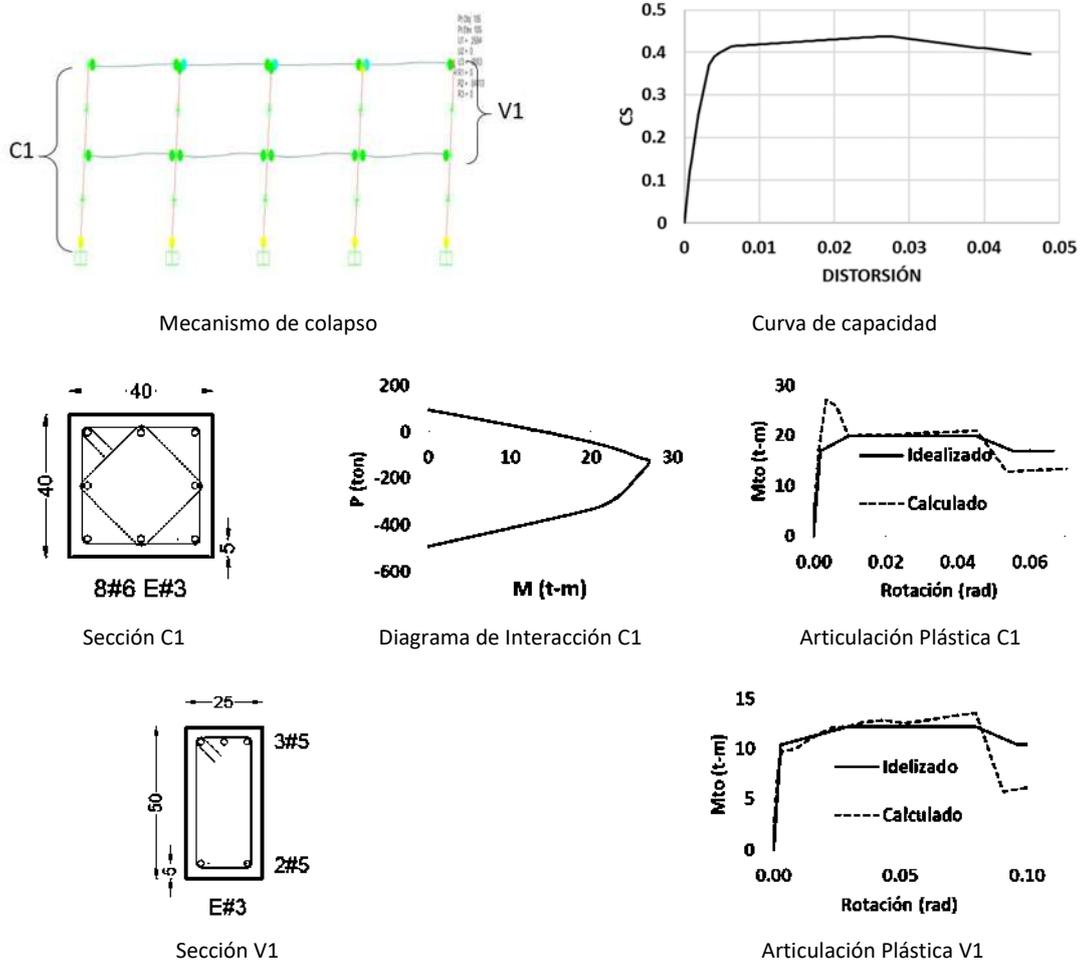


Figura 41. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo SC-02.

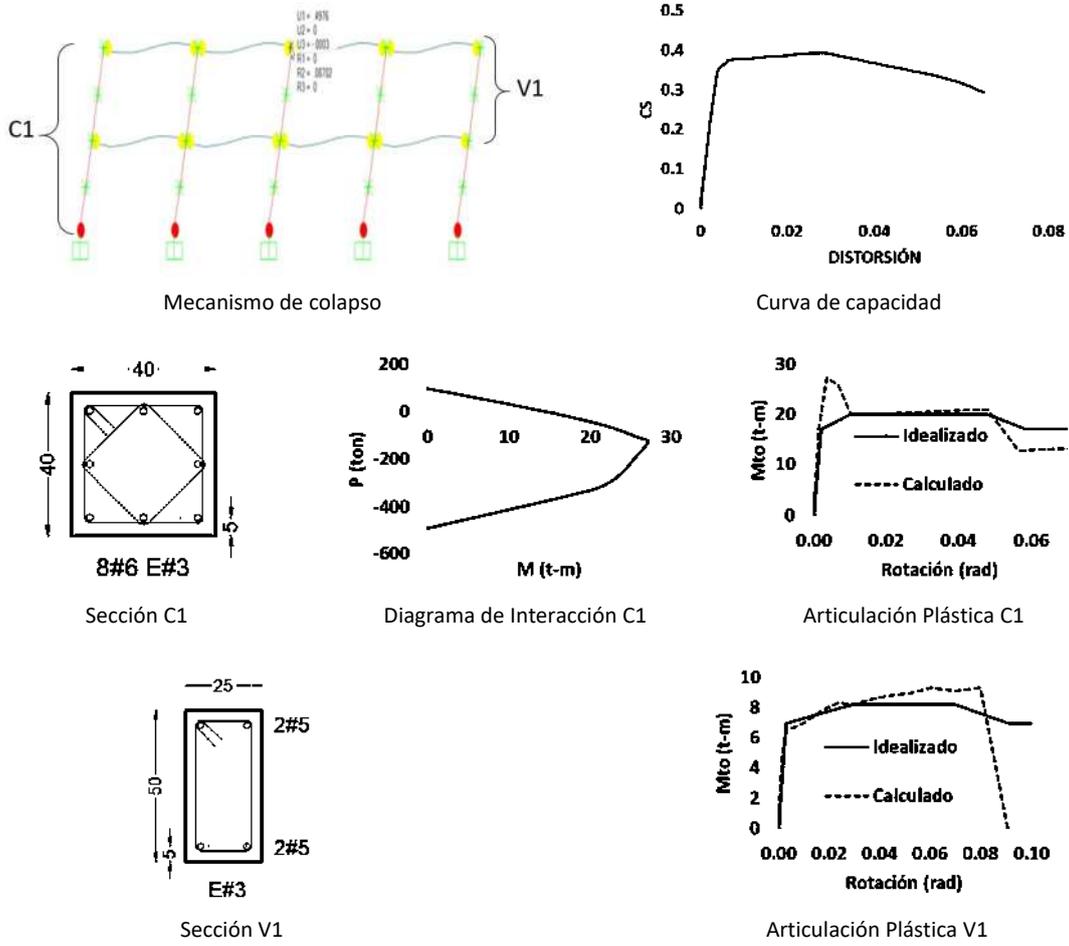


Figura 42. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo OAX-02.

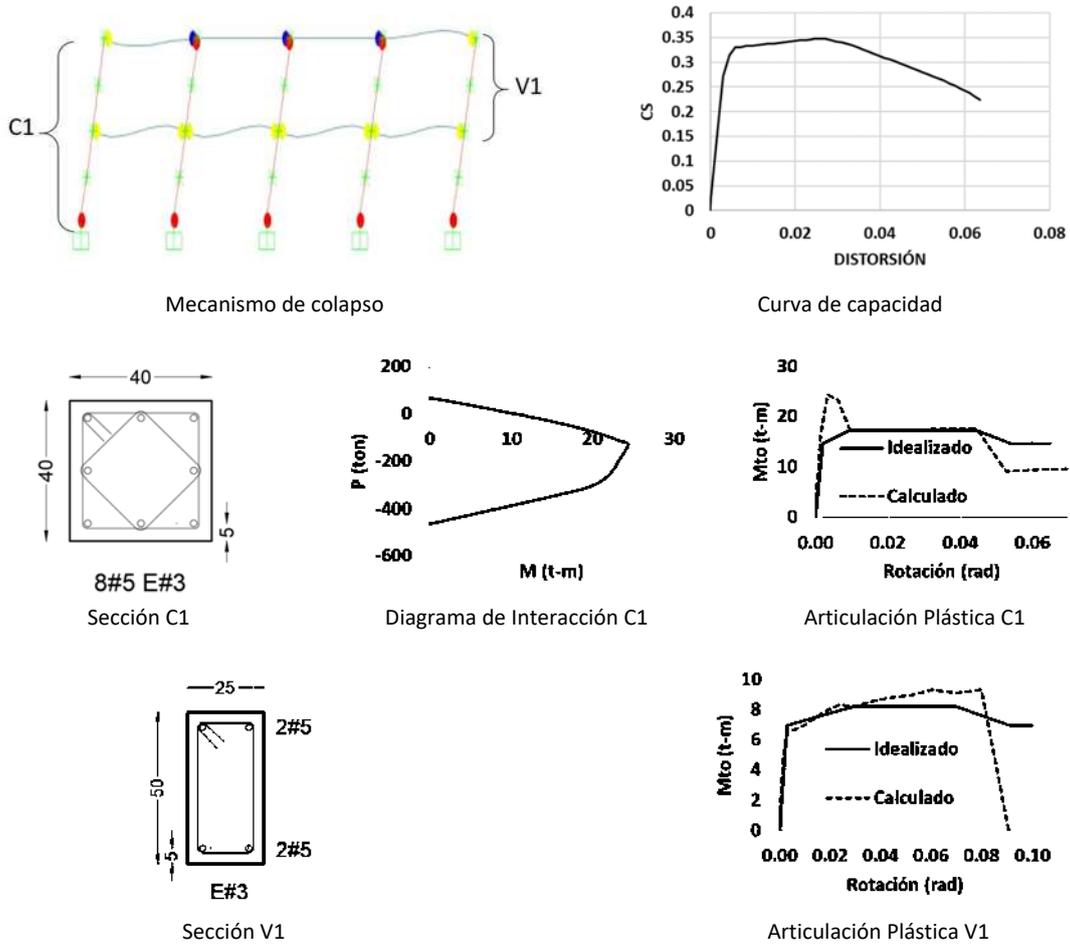


Figura 43. Mecanismo de colapso, secciones estructurales y curva de capacidad para el modelo HUA-02, TEH-02, PUE-02, COR-02 y XAL-02.



### 3.6. Análisis y dimensionamiento del sistema con contravientos.

El sistema de marcos resistentes a momento previamente diseñado es adicionado con un sistema de contravientos en las dos crujeías centrales del perímetro, de tal forma que el edificio queda provisto de barreras de defensa extremas. La intención de este modelo es ver la influencia de los contravientos en dicho edificio en cuanto a distorsiones angulares y fuerza cortante se refiere.

Los contravientos fueron diseñados teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El sistema de contravientos se diseña para resistir el cien por ciento de la demanda por sismo.
2. Los edificios con contravientos son diseñados considerando un factor de comportamiento sísmico  $Q=2$ , de acuerdo con las NTC 2017.
3. No se considera reducción en la demanda por sobrerresistencia y redundancia.
4. Los contravientos son diseñados de forma que permanezcan en el intervalo de comportamiento elástico.
5. Mediante los análisis no lineales se comprueba que el comportamiento de los contravientos sea elástico.

El manual de la CFE y las normas NTC 04 no advierten del riesgo de usar contravientos, inclusive permiten uso de factores de comportamiento sísmico altos,  $Q=4$ , poniendo la restricción de que los marcos soporten el 50% de la demanda lateral. El problema con este tipo de sistema reside en el hecho de que la capacidad de un edificio con contravientos, queda definida por la resistencia a pandeo del contraviento de los niveles inferiores. Al pandearse el primer contraviento, el nivel se convierte en un mecanismo de planta baja flexible, concentrando la demanda por deformación inelástica en dicha planta. Lo anterior se ejemplifica en los mecanismos de colapso mostrados a continuación:

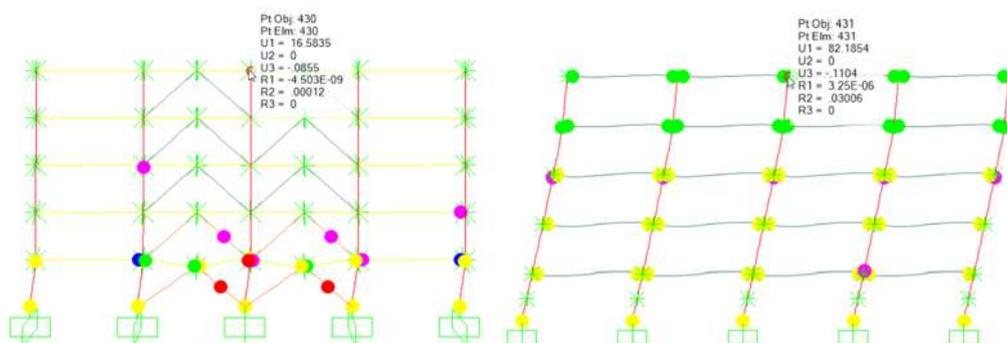


Figura 44. Mecanismo de colapso para un sistema con contravientos (izquierda y sin contravientos (derecha)).

En la siguiente figura se muestra la curva de capacidad para el sistema con contravientos y el sistema de marcos anteriores, en ella se muestra claramente que el sistema con



contravientos no es capaz de desarrollar una ductilidad considerable, si se compara con la curva del marco solo. Además de permitir factores de comportamiento sísmico elevados, el manual CFE2015 y el reglamento NTC04 limitan las distorsiones permisibles por prevención de colapso a valores de 0.012 o 0.015, los cuales son valores muy bajos si se comparan con el código americano o el europeo (0.03), esto también promovía el uso de contravientos. Esto es importante pues muchos de los edificios modernos en México han sido diseñados bajo las restricciones de estos códigos (CFE2015 NTC04). Sin embargo, las últimas normas publicadas NTC 2017, acertadamente, se incrementó el límite de distorsión a 0.030 y se redujo el factor de comportamiento sísmico a  $Q=2$ .

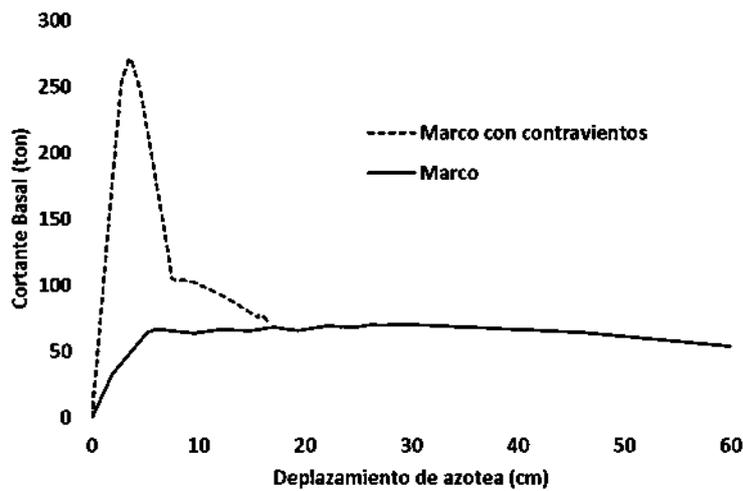


Figura 45. Curva de capacidad para el sistema con contravientos y sin contravientos.



## 4. DISEÑO DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES CON DISPOSITIVOS DE CONTROL

### 4.1. Análisis y dimensionamiento del sistema con aislamiento de base.

El procedimiento de diseño para edificios con equipados con este tipo de dispositivos, de acuerdo con los códigos de diseño vigentes, se resume a continuación:

1. Cálculo del área total requerida,  $f(w)$ ,  $\sigma_{max}=60\text{kg/cm}^2$ .
2. Cálculo del área de plomo,  $f(v)$  de disparo).
3. Proponer desplazamiento objetivo y ductilidad.
4. Cálculo del espesor de caucho necesario.
5. Revisión por pandeo.
6. Revisión por deformación.
7. Calcular periodo efectivo y amortiguamiento equivalente.
8. Calcular demanda de desplazamiento a partir del espectro de diseño y comparar con el desplazamiento propuesto.

En seguida se muestra un ejemplo de diseño, siguiendo las especificaciones y el ejemplo proporcionado por el MDOC 2015, el cual comienza con la evaluación de las cargas de servicio en la parte inferior de las columnas de planta baja:

*Tabla 6. Tabla de reacciones en la base de las columnas bajo carga de servicio.*

APOYO	POSICIÓN	P (t)	P max (t)
1-A	ESQUINA	26.19	26.19
1-E	ESQUINA	26.19	
5-A	ESQUINA	26.19	
5-E	ESQUINA	26.19	
1-B	ORILLA	42.14	44.78
1-C	ORILLA	44.78	
1-D	ORILLA	42.14	
2-A	ORILLA	42.14	
2-E	ORILLA	42.14	
3-A	ORILLA	44.78	
3-E	ORILLA	44.78	
4-A	ORILLA	42.14	
4-E	ORILLA	42.14	
5-B	ORILLA	42.14	
5-C	ORILLA	44.78	
5-D	ORILLA	42.14	
2-B	CENTRAL	85.86	85.86
2-C	CENTRAL	81.98	
2-D	CENTRAL	85.86	
3-B	CENTRAL	81.98	
3-C	CENTRAL	78.96	
3-D	CENTRAL	81.98	
4-B	CENTRAL	85.86	
4-C	CENTRAL	81.98	
4-D	CENTRAL	85.86	
<b>TOTAL</b>		1371.3	
<b>15%</b>		205.7	



**Determinación de dimensiones mínimas del apoyo.**

El área mínima requerida de apoyo de neopreno se obtiene considerando un esfuerzo máximo permisible de 60 kg/cm<sup>2</sup> y una carga máxima de servicio igual a 85860 kg.

$$Aa_{min} = \frac{P_{max}}{\sigma_{max}} = \frac{85860}{60} = 1431 \text{ cm}^2$$

Se considera que el dispositivo es circular por lo que el diámetro mínimo es:

$$d_{min} = \sqrt{\frac{4 Aa_{min}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 (1431)}{\pi}} = 43 \text{ cm}$$

Se selecciona un diámetro de 45 cm lo que representa un área de apoyo de 1590 cm<sup>2</sup>

Se selecciona una fuerza de fluencia para el conjunto de amortiguadores, igual al 15% del peso del edificio, con lo cual se evita que los dispositivos fluyan ante empujes de viento o sismos de servicio.

$$Fy_{conjunto} = 0.15 (1371300) = 205700 \text{ kg}$$

La fuerza de fluencia de un aislador se obtiene dividiendo entre el número de dispositivos.

$$Fy = \frac{Fy_{conjunto}}{N} = \frac{205700}{25} = 8228 \text{ kg}$$

El área mínima del núcleo de plomo se obtiene al dividir la fuerza de fluencia entre el esfuerzo de fluencia para el plomo.

$$Apl_{min} = \frac{Fy}{\sigma_y} = \frac{8228}{90} = 91.42 \text{ cm}^2$$

Por lo que se selecciona el núcleo de plomo con diámetro de 10.8 cm (4.25") lo que implica un área de 91.61 cm<sup>2</sup> y una fuerza de fluencia de 8245 kg.

**Propiedades equivalentes y proceso iterativo.**

A continuación, se propone un desplazamiento máximo en la parte superior del apoyo igual a la mitad de su diámetro, y se determina el desplazamiento de fluencia considerando una ductilidad de 12.

$$x_{max} = 22.5 \text{ cm}$$

$$x_y = \frac{x_{max}}{\mu} = \frac{22.5}{12} = 1.88 \text{ cm}$$

En este punto conviene comprobar que la altura del dispositivo resulte razonable, de lo contrario debe adecuarse modificando el porcentaje de carga para el que fluye propuesto



al inicio. El espesor total de las capas de neopreno se obtiene considerando el área efectiva de neopreno, y el módulo a cortante igual a 10.8 kg/cm<sup>2</sup>:

$$Ab = Aa - Apl = 1590 - 91.61 = 1499 \text{ cm}^2$$

$$Tr = \frac{10 G Ab}{Fy} x_y = \frac{10 (10.8)(1499)}{8245} (1.88) = 36.9 \text{ cm}$$

Una vez comprobado lo anterior, la rigidez elástica del aislador se obtiene dividiendo la fuerza de fluencia entre el desplazamiento de fluencia.

$$ke = \frac{Fy}{x_y} = \frac{8245}{1.88} = 4395 \text{ kg/cm}$$

La rigidez efectiva se calcula considerando un factor de rigidez post fluencia de 0.1.

$$kef = ke \frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu} = 4395 \frac{1 + 0.1(12 - 1)}{12} = 770 \text{ kg/cm}$$

La energía disipada por histéresis del sistema de aislamiento es

$$\zeta_{hist} = \frac{2(1 - \alpha)(1 - \frac{\mu}{2})}{\pi[1 + \alpha(\mu - 1)]} = \frac{2(1 - 0.1)(1 - \frac{12}{2})}{\pi[1 + 0.1(12 - 1)]} = 0.25$$

El amortiguamiento equivalente del aislador se calcula considerando un amortiguamiento viscoso del dispositivo igual a 0.03

$$\zeta_a = \zeta_{hist} + \zeta_v = 0.25 + 0.03 = 0.28$$

La rigidez de la estructura se calcula considerando que el edificio se comporta como cuerpo rígido, una masa total igual a 1397.9 kg s/cm y el periodo fundamental de la estructura empotrada igual a 0.41 segundos.

$$kes = \frac{4\pi^2 m}{T^2} = \frac{4\pi^2 (1397.9)}{0.41^2} = 328293.2 \text{ kg/cm}$$

El amortiguamiento del sistema edificio-aislador se obtiene teniendo en cuenta un amortiguamiento de la estructura de 0.05

$$\zeta_{sis} = \frac{\left(\zeta_a + \frac{\zeta_{es} N kef}{kes}\right)}{1 + \frac{N kef}{kes}} = \frac{\left(0.28 + \frac{0.05 (25)(770)}{328293.2}\right)}{1 + \frac{25 (770)}{328293.2}} = 0.27$$

El periodo de la estructura aislada se calcula considerando que el edificio se comporta como cuerpo rígido, una masa total igual a 1397.9 kg s/cm.



$$T_{ef} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{N k_{ef}}} = 2\pi \sqrt{\frac{1397.9}{(25) 770}} = 1.69 \text{ seg}$$

Se obtiene el espectro de diseño modificado por el amortiguamiento del sistema (27%), en este caso se hizo con ayuda del programa PRODISIS de la CFE.

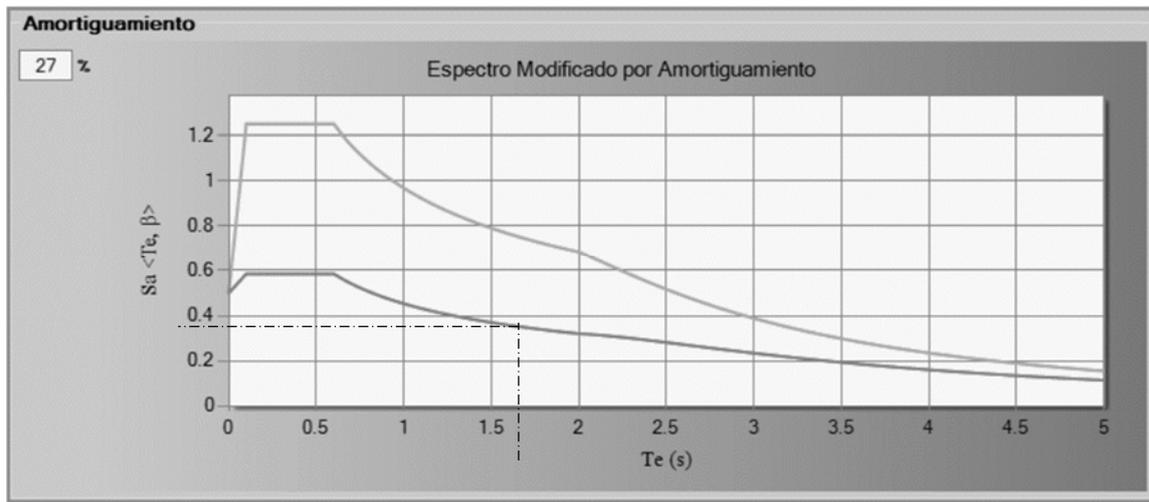


Figura 46. Tabla 4. Espectro de diseño modificado por el factor de amortiguamiento equivalente.

Del espectro, con el periodo efectivo de 1.69 segundos, se obtiene un coeficiente sísmico igual a 0.35. A continuación se calcula el desplazamiento máximo del sistema como:

$$x_{max} = \frac{c W}{N k_{ef}} = \frac{0.35 (1371300)}{25 (770)} = 25 \text{ cm}$$

Puesto que el desplazamiento no coincide con el propuesto inicialmente de 22.5cm, se procede a un proceso iterativo, repitiendo los cálculos de las propiedades a partir del nuevo desplazamiento máximo de 25, en cada ciclo, es importante mantener el mismo desplazamiento de fluencia, por lo que se necesita modificar la ductilidad. El proceso se repite hasta que la diferencia de sea tolerable.

En la tabla siguiente se muestra los resultados de los parámetros en tres iteraciones realizadas hasta alcanzar la convergencia:



Tabla 7. Resumen de iteraciones para hacer coincidir los desplazamientos.

Iteración	xi (cm)	μ	Kef (kg/cm)	T (seg)	ζsis	c	fza (kg)	xi+1
1	22.5	12.0	770	1.69	0.27	0.348	19089	24.8
2	24.81	13.2	738	1.73	0.26	0.350	19198	26.0
3	26.02	13.9	724	1.75	0.25	0.354	19418	26.8
4	26.82	14.3	716	1.76	0.25	0.354	19390	27.1
5	27.07	14.4	713	1.76	0.25	0.354	19390	27.2
6	27.21	14.5	712	1.76	0.25	0.354	19390	27.2

**Revisión de auto centrado y estabilidad.**

Se revisa la fuerza de auto centrado del dispositivo de acuerdo con la sección 3.13.2.3.2.2 del MDOC en que debe cumplirse que:

$$\sum k_y \geq 0.05 \frac{W}{x_{max}}$$

En que la rigidez post fluencia es igual al 10% de la rigidez elástica (ke=4395 kg/cm) y W el peso de la estructura:

$$25 (0.1)(4395) \geq 0.05 \frac{1371300}{27.2}$$

$$10988 \text{ kg/cm} \geq 2521 \text{ kg/cm} \therefore \text{se acepta}$$

Al colocar 52 capas de neopreno de 0.7 cm, se alcanza el espesor de caucho requerido (36.8cm), entre las capas, se colocan 51 placas metálicas de 0.3 cm de espesor (15.3 cm), y dos placas extremas de 19 mm de espesor, Con lo que se tiene una altura total del dispositivo de 55.5 cm.

La capacidad contra el pandeo con desplazamiento lateral nulo es:

$$P_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 E_c I G A_b}{3 T_r^2}}$$

Donde Ec es el módulo de compresibilidad efectiva, que está en función del factor de forma S y de las propiedades del material:

$$E_c = E [1 + 2kS_i^2]$$

$$k = 0.57$$

$$E = 45.39 \text{ kg/cm}^2$$

$$S_i = \frac{D_b}{4t_i} = \frac{45}{4(0.7)} = 16.1$$

$$E_c = 45.39 [1 + 2(0.57)(16.1)^2] = 13410 \text{ kg/cm}^2$$

La inercia de la sección es:

$$I = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi (22.5)^4}{4} = 201289 \text{ cm}^4$$

De forma que:

$$P_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2(13410)(201289)(10.8)(1499)}{3(36.4)^2}} = 329571 \text{ kg} > 85860 \text{ kg} \therefore \text{se acepta}$$

La capacidad contra pandeo con desplazamiento lateral es:

$$P'_{cr} = P_{cr} \frac{A_r}{A_b}$$

$$A_r = \frac{D_b^2}{4} (\delta - \text{sen}\delta)$$

$$\delta = 2 \cos^{-1} \left( \frac{x}{D_b} \right) = 2 \cos^{-1} \left( \frac{27.2}{45} \right) = 1.843$$

$$A_r = \frac{45^2}{4} (1.843 - \text{sen}(1.843)) = 446 \text{ cm}^2$$

$$P'_{cr} = 329571 \frac{446}{1499} = 98004 \text{ kg} > 85860 \text{ kg} \therefore \text{se acepta}$$

A continuación, se muestran los croquis donde se resume el dimensionamiento de los aisladores de base para todos los edificios en estudio:

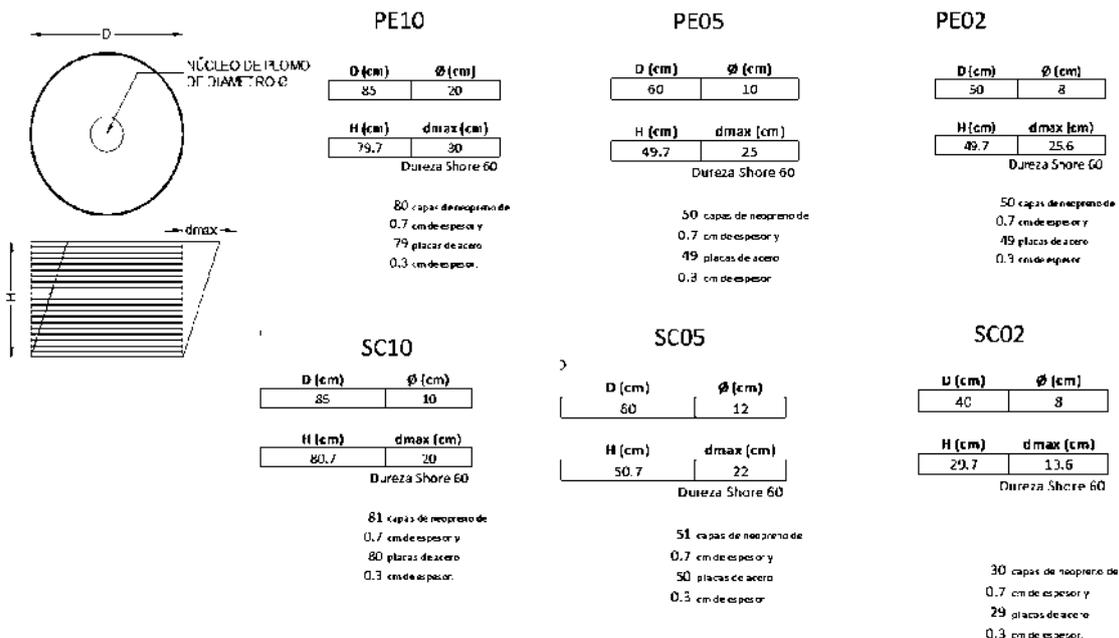




Figura 47. Resumen de diseño para los aisladores de los edificios en Puerto Escondido y Salina Cruz.

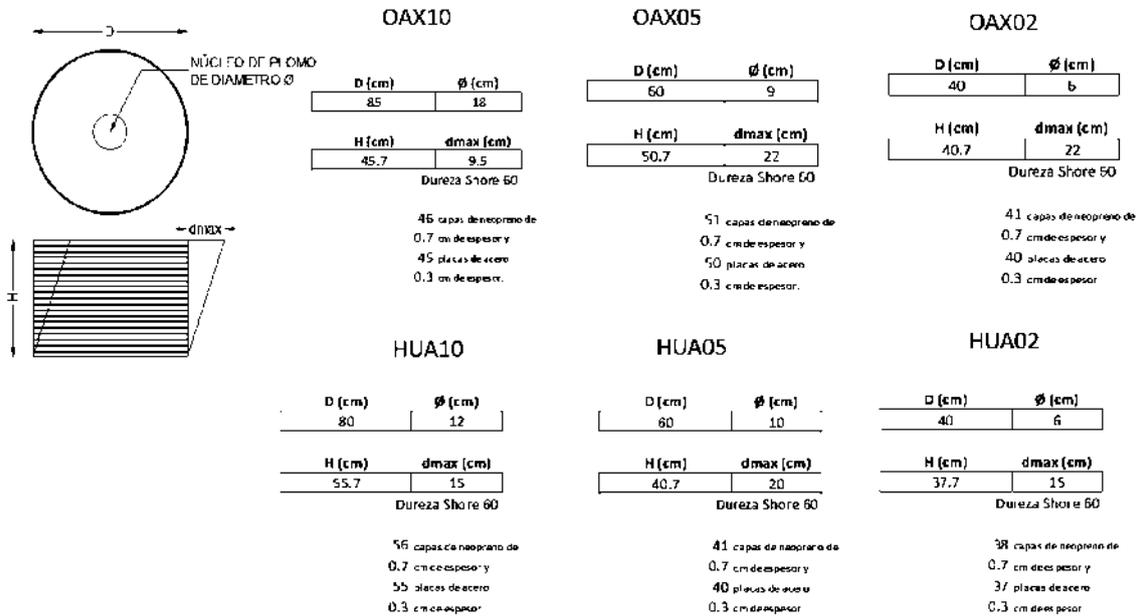


Figura 48. Resumen de diseño para los aisladores de los edificios en Oaxaca y Huajimalpan.

4.2. Análisis y dimensionamiento del sistema con disipadores.

El Centro Multidisciplinario de Investigación en Ingeniería Sísmica, de la Universidad de Nueva York en Buffalo (Ramírez, O. M., et al.), propone el siguiente procedimiento simplificado para el pre-dimensionamiento del sistema con disipadores:

1. Obtener curva de capacidad del sistema resistente. En la siguiente figura se muestra la comparación de la curva de capacidad obtenida por el procedimiento simplificado propuesto por Ramírez, O. M., et al., y la obtenida mediante un análisis estático no lineal (AENL).

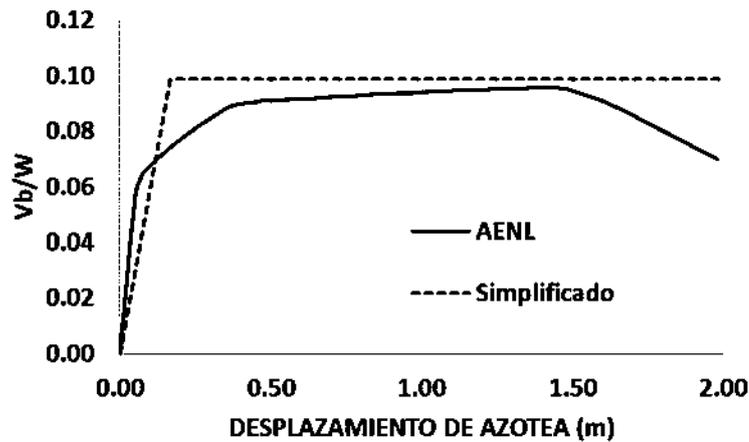


Figura 49. Comparación de curva de capacidad del análisis simplificado y el análisis estático no lineal.

$$V_y = \frac{I}{\sum_{i=1}^N (\lambda_i \cdot h_i)} \cdot \left\{ (n+1)M_{pc} + 2n \cdot \sum_{i=1}^N (M_{pbi} \cdot \chi_i) \right\} \quad D_y = \left( \frac{g}{4\pi^2} \right) \cdot \Gamma_1 \cdot \left( \frac{V_y}{W_1} \right) \cdot T_1^2$$

- Proponer la curva de capacidad de los dispositivos. En este paso se propone una relación de resistencias entre la resistencia virtual (obtenida con el procedimiento plástico simplificado) del marco y la resistencia del dispositivo. Se estudiaron tres relaciones diferentes de resistencia: dos, cinco y ocho, Tabla 8, de las cuales la relación que ofrece mejor relación costo-beneficio (visto como incremento de cortante basal-reducción en distorsiones de entrepiso) es la de cinco. Este es el valor utilizado en todos los edificios. Con lo cual se prevé tener reducciones en la distorsión cercanas al 30% e incrementos en el cortante basal cercanos al 12%.

Tabla 8. Comparación de resultados considerando distintas relaciones de resistencia.

<b>Fm/Fd</b>	2	5	8
<b>dd/dm</b>	0.51	0.308	0.252
<b>Vd/Vm</b>	1.57	1.12	1.06

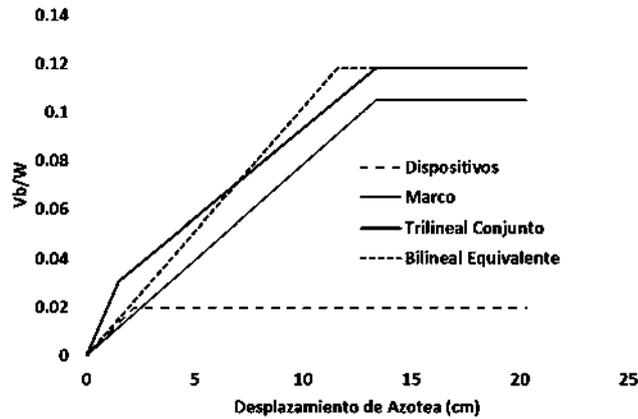


Figura 50. Curva de capacidad del conjunto sistema-disipador.

3. Calcular el comportamiento trilineal del conjunto. El cuál es la suma directa de la curva de capacidad del sistema de marcos y el sistema de dispositivos.
4. Proponer el comportamiento bilineal equivalente del conjunto. Esta curva se propone basando se en la igualación del área bajo la curva en el intervalo elástico.
5. Proponer desplazamiento objetivo, de forma que el amortiguamiento equivalente calculado a continuación tenga valores próximos al 30%.
6. Calcular periodo efectivo y amortiguamiento equivalente.
7. Calcular demanda de desplazamiento a partir del espectro de diseño y comparar con el desplazamiento propuesto.

En seguida se presenta a manera de ejemplo el diseño de los dispositivos para el edificio de 10 niveles del grupo 1. Para obtener el cortante resistente del sistema resistente se considera cuatro crujías ( $n=4$ ), una resistencia de las columnas de planta baja ( $M_p=11449910 \text{ kg/cm}$ ), a partir de un análisis modal se obtiene el valor del parámetro modal  $\sum \lambda_i h_i$  como se muestra en la siguiente tabla.

Nivel	$\phi_i$	$w_i \text{ (kg)}$	$w_i \phi_i$	$w_i \phi_i^2$	$\lambda_i$	$h_i \text{ (cm)}$	$\lambda_i h_i$
1	0.079	559749	43963	3453	0.0137	280	3.83
2	0.220	559749	123255	27140	0.0384	560	21.50
3	0.374	559749	209611	78494	0.0653	840	54.85
4	0.523	559749	292828	153190	0.0912	1120	102.17
5	0.658	559749	368194	242192	0.1147	1400	160.58
6	0.773	559749	432569	334285	0.1348	1680	226.38
7	0.867	559749	485168	420524	0.1511	1960	296.23
8	0.935	559749	523636	489853	0.1631	2240	365.39
9	0.979	559749	547973	536445	0.1707	2520	430.17
10	1.000	182947	182947	182947	0.0570	2800	159.57
	1.854	$\sum w_i \phi_i =$	3210144	2468524		$\sum \lambda_i h_i =$	1821



$$\lambda_i = \frac{w_i}{\sum w_i \phi_i}$$

$$V_y = \frac{1}{\sum_{i=1}^N (\lambda_i h_i)} \left\{ (n+1)M_{pc} + 2n \sum_{i=1}^N (M_{pbi} \chi_i) \right\}$$

$$V_y = \frac{1}{1821} \{ (4+1)(11449910) + 2(4)(21891818) \} = 127637 \text{ kg}$$

Es el cortante resistente de una sola barrera de defensa, se multiplica el valor por cinco para todo el edificio.  $V_y = 638187 \text{ kg}$

Nivel	$\alpha_{ij}$	$\chi$	Mpbi (kg-cm)	Mpbi*x
1	0.06	1.14	2579670	2931443
2	0.06	1.14	2579670	2931443
3	0.06	1.14	1763070	2003489
4	0.06	1.14	1763070	2003489
5	0.06	1.14	1763070	2003489
6	0.06	1.14	1763250	2003693
7	0.06	1.14	1763250	2003693
8	0.06	1.14	1763250	2003693
9	0.06	1.14	1763250	2003693
10	0.06	1.14	1763250	2003693

$$\sum \text{Mpbi} \cdot x = 21891818$$

$$\chi_{ij} = \frac{1}{1 - 2\alpha_{ij}}$$

Donde  $\alpha$  es el factor de longitud de articulación plástica.

Calcular el desplazamiento de fluencia se calcula considerando que el periodo fundamental del edificio es  $T=1.53 \text{ s}$ .

$$\Gamma_1 = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \phi_{i1}}{\sum_{i=1}^N w_i \phi_{i1}^2} \quad \Gamma_1 = \frac{3210144}{2468524} = 1.3$$

$$\bar{W}_1 = \Gamma_1 \left( \sum_{i=1}^N w_i \phi_{im} \right) \quad \bar{W}_1 = 1.3(3210144) = 4174569 \text{ kg}$$

$$D_y = \left( \frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_1 \left( \frac{V_y}{\bar{W}_1} \right) T_1^2 \quad D_y = \left( \frac{981}{4\pi^2} \right) 1.3 \left( \frac{638187}{4174569} \right) 1.53^2 = 11.5 \text{ cm}$$

Se propone la relación de resistencias  $V_{yd}/V_y=5$ , la altura de las placas es de 15 cm y el espesor de 1.9 cm para calcular el desplazamiento de fluencia para que sea el menor posible.

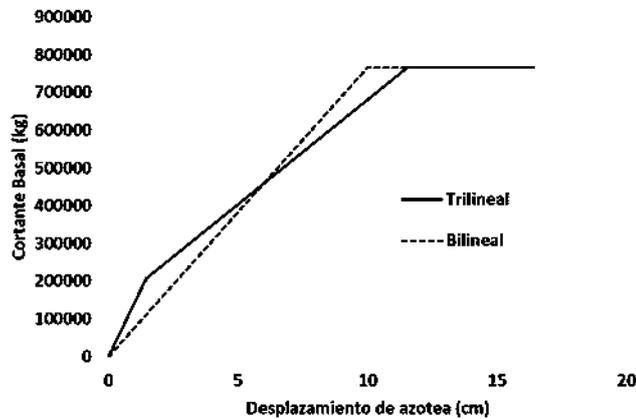


$$D_y = \frac{3}{2} \left( \frac{\varepsilon_y h^2}{t} \right) = \frac{3}{2} \left( \frac{0.00125 (15)^2}{1.9} \right) = 0.22 \text{ cm}$$

El desplazamiento de azotea del edificio en el momento en que fluyen los dispositivos es igual al desplazamiento de fluencia calculado entre la diferencia de entrepiso de la forma del modo fundamental

$$D_y = \frac{0.22}{(0.374 - 0.22)} = 1.4 \text{ cm}$$

Con los datos obtenidos se puede calcular el comportamiento tri-lineal del sistema



Se propone un desplazamiento de fluencia equivalente de 10cm de forma que equilibre el área de la curva.

Se propone un desplazamiento objetivo del sistema de 21.5 cm. Para conocer el periodo y el amortiguamiento equivalente es necesario conocer las pseudoaceleración que producen la fluencia del marco y del disipador:

$$A_y = \frac{V_{yf}}{W_1} g = \frac{638187}{4174569} 981 = 150 \text{ kg/cm}^2$$

$$A_d = \frac{V_d}{W_1} g = \frac{127637}{4174569} 981 = 30 \text{ kg/cm}^2$$

Así como las ductilidades correspondientes:

$$\mu_f = \frac{21.5}{11.5} = 1.86 \quad \mu_d = \frac{21.5}{1.4} = 14.9$$

De forma que es posible calcular el amortiguamiento y el periodo efectivo:

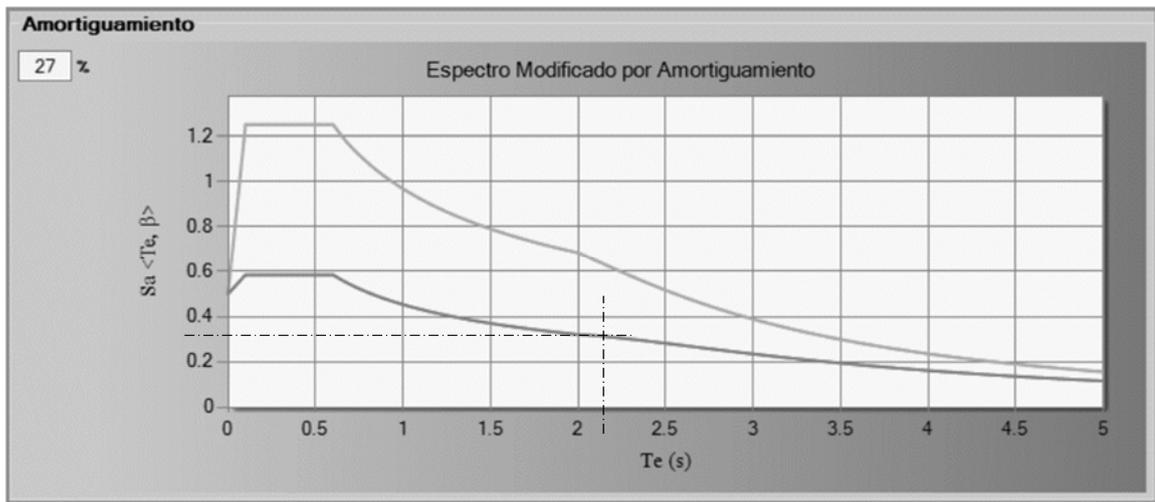


$$\beta_{eff} = \beta_i \left( \frac{1}{1 + A_d/A_y} \right)^{1/2} + \frac{2q_H \left( 1 - \frac{1}{\mu_f} \right) + 2 \left( \frac{A_d}{A_y} \right) \left( 1 - \frac{1}{\mu_d} \right)}{\pi \left( 1 + A_d/A_y \right)}$$

$$\beta_{eff} = 0.05 \left( \frac{1}{1 + 30/150} \right)^{1/2} + \frac{2(0.5) \left( 1 - \frac{1}{1.86} \right) + 2 \left( \frac{30}{150} \right) \left( 1 - \frac{1}{14.9} \right)}{\pi \left( 1 + 30/150 \right)} = 0.268$$

$$T_{eff} = 2\pi \left( \frac{D}{A_y + A_d} \right)^{1/2} = 2\pi \left( \frac{21.5}{150 + 30} \right)^{1/2} = 2.17 \text{ seg}$$

El espectro de diseño se reduce conforme por el amortiguamiento



El coeficiente sísmico que se obtiene del espectro es 0.31. La demanda de desplazamiento es:

$$\mu_f = \frac{21.5}{10} = 2.15$$

$$D_y = \left( \frac{g}{4\pi^2} \right) \frac{\Gamma_1 S_a}{\mu} T_{eff}^2 = \left( \frac{981}{4\pi^2} \right) \frac{1.3 (0.31)}{2.15} (2.17)^2 = 21.6$$

Con lo que se concluye que la opción de prediseño es correcta. Sin embargo, el diseño definitivo deberá estar basado en análisis no lineales.

A continuación, se muestra un croquis con la geometría general de los dispositivos. Los cuales se encuentran conformados por placas de acero al carbón de calidad A36. En el diseño se busca que los dispositivos fluyan lo antes posible por lo que se propone una altura h de placa reducida. La altura H es de 15 centímetros y la base B de 10 centímetros, el espesor t de las placas es de 1.9 centímetros, de forma que la variación en el diseño de los diferentes edificios es solamente en la cantidad de placas.



La cantidad de placas son colocadas de acuerdo a la primera forma modal del edificio, de forma que no se altera demasiado la configuración en el perfil de distorsiones máximas por entrepiso.

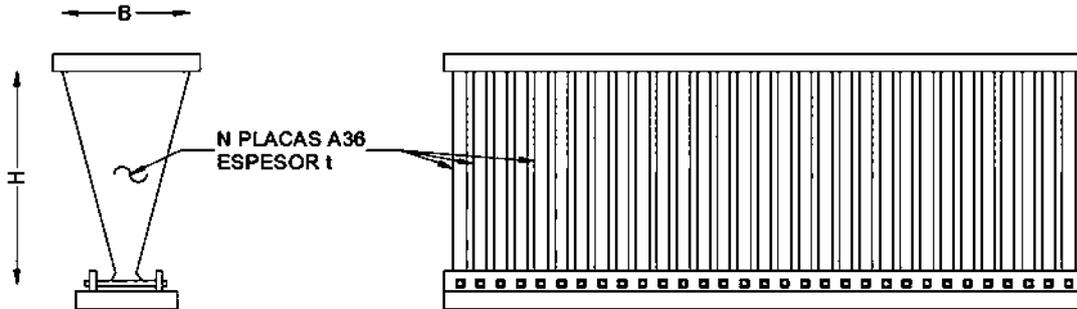


Figura 51. Croquis de dispositivo dissipador TADAS.

A continuación se muestra la distribución de placas en la elevación de los edificios equipados:

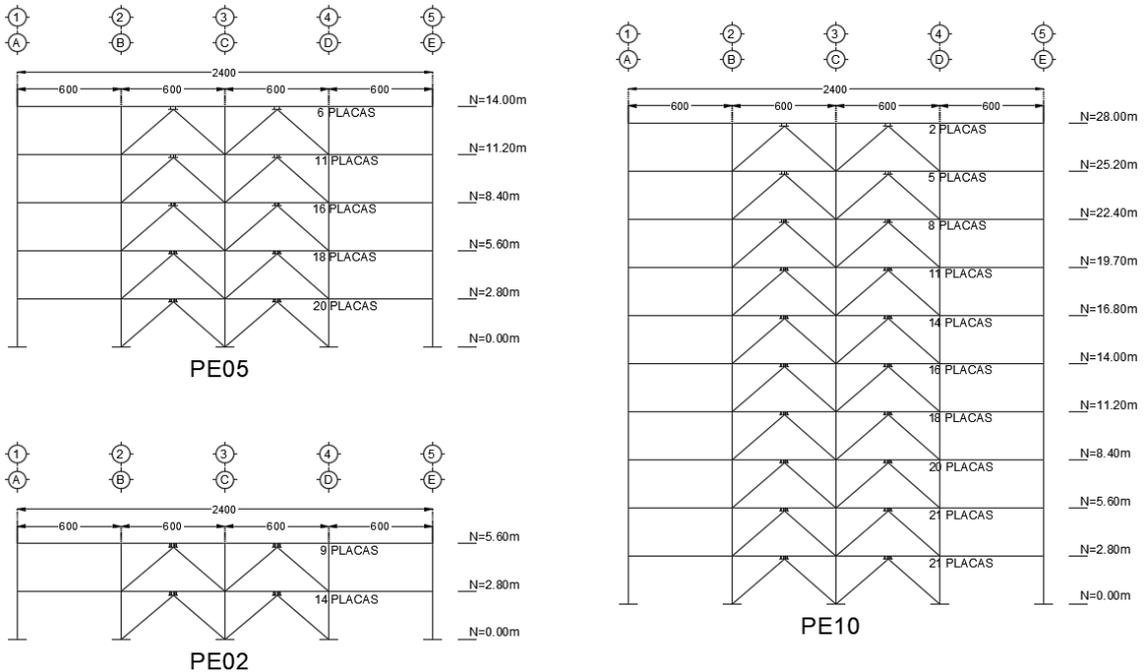


Figura 52. Disposición de placas para los edificios de Puerto Escondido.

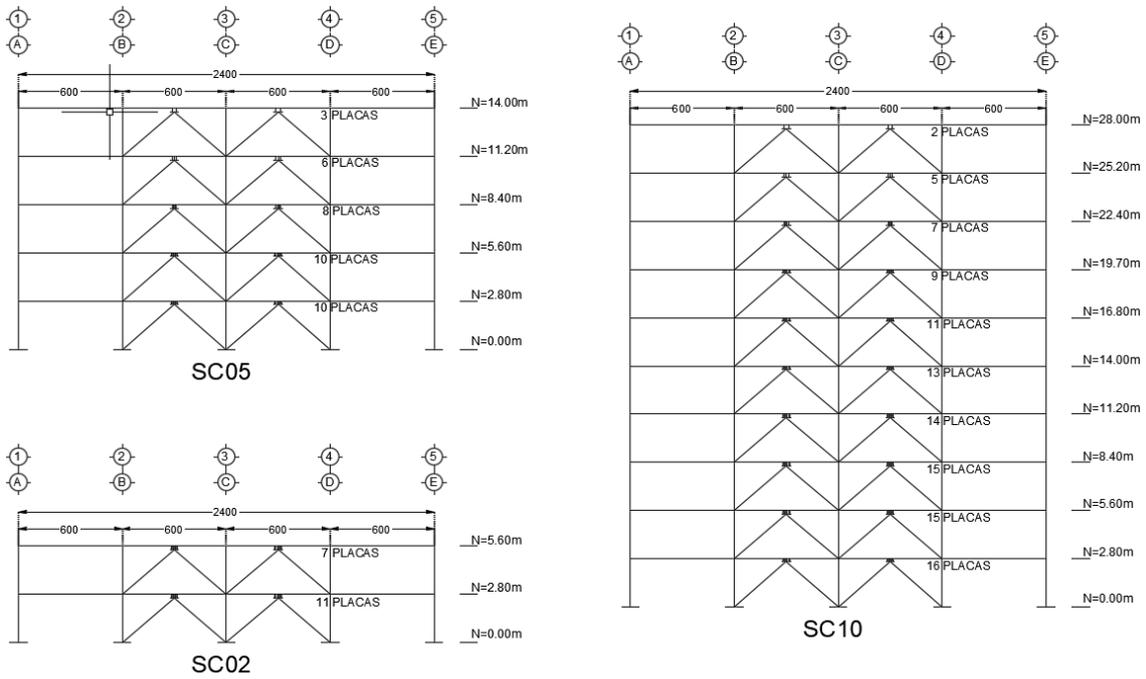


Figura 53. Disposición de placas para los edificios de Salina Cruz.

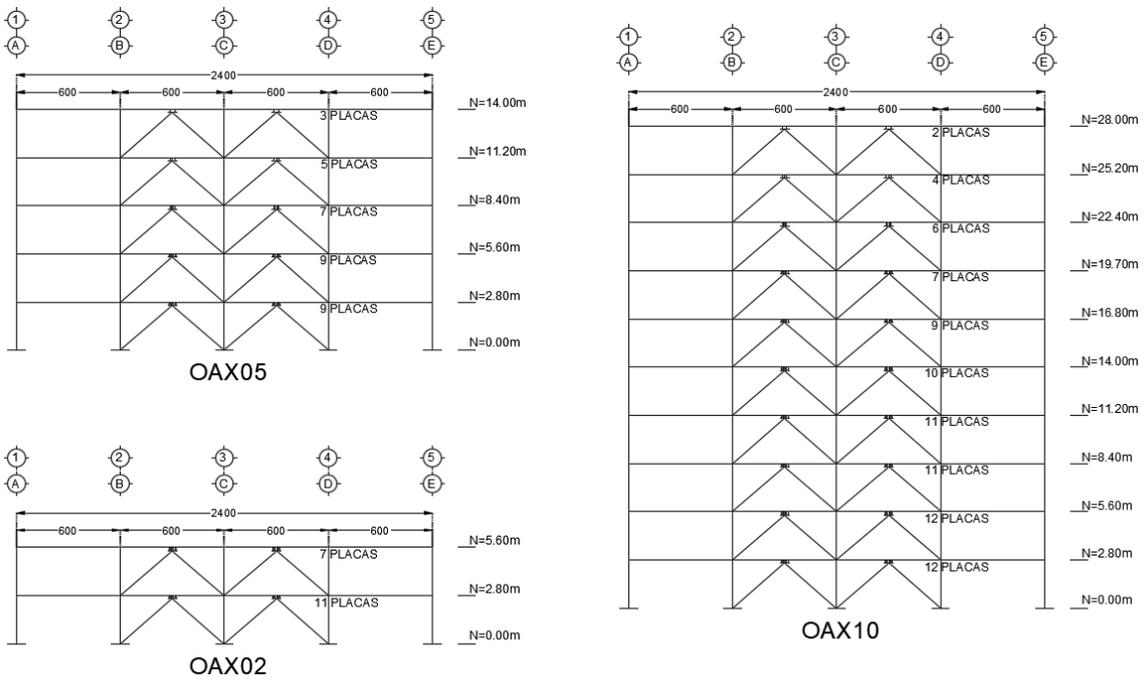


Figura 54. Disposición de placas para los edificios de Oaxaca.

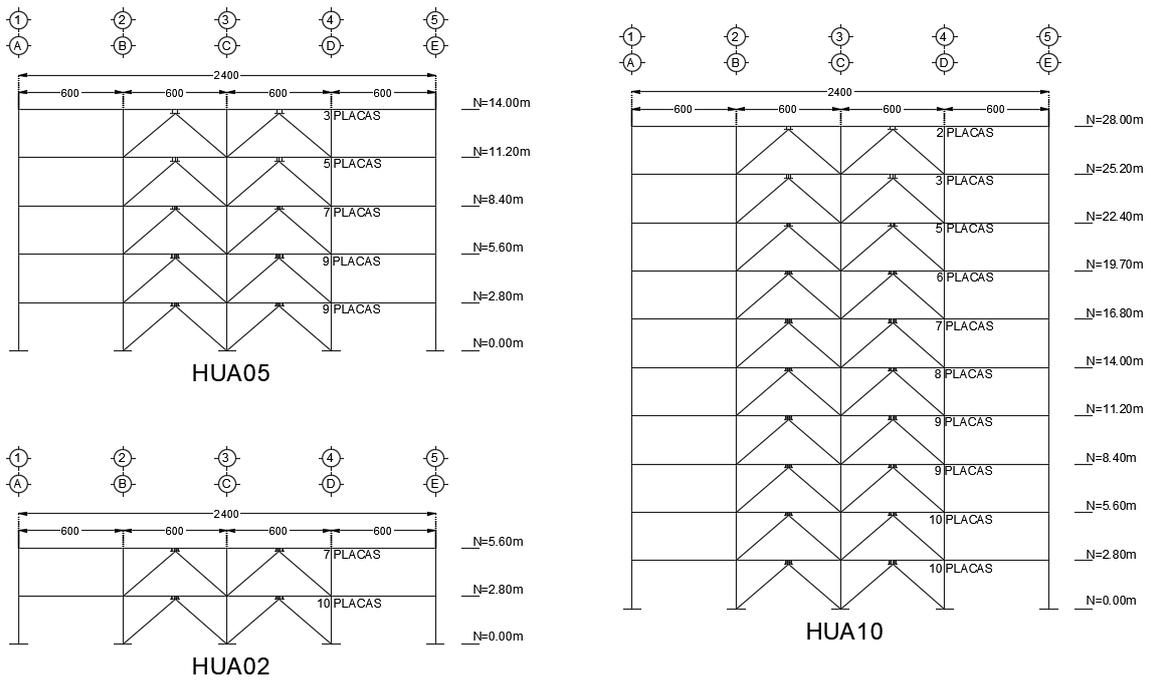


Figura 55. Disposición de placas para los edificios de Huajupán de León.



## 5. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES.

### 5.1. Características del modelo y análisis no lineal.

El avance tecnológico y el desarrollo de equipos computacionales de mayor capacidad han permitido que la práctica del diseñador estructural se facilite en cuanto al cálculo y resolución de grandes sistemas de ecuaciones, otro de los aspectos que se han visto favorecidos es el estudio y análisis matemático de estructuras dentro del intervalo inelástico de comportamiento, por medio de modelos matemáticos adecuados para dicho fin.

En este estudio, el modelo de los edificios consiste en elementos barras cargados uniformemente, los sistemas de piso se representan mediante diafragmas rígidos y la no linealidad se considera mediante articulaciones plásticas en los extremos de los elementos barras. Los edificios se consideran empotrados en la intersección con la cimentación, las masa traslacionales y rotacionales se encuentran concentradas en el centroide de los entresijos. Además, se utiliza un amortiguamiento tipo Raleigh de forma que el primer y cuarto modo tienen un amortiguamiento del 5% del crítico. El modelo inelástico de los contravientos considera la inestabilidad por pandeo global ante compresión y el estado límite de fluencia en tensión. El modelo inelástico de las columnas considera que estos elementos están sometidos a flexocompresión mediante un diagrama de interacción. En las vigas no se considera carga axial, y los dispositivos disipadores y aisladores se modelan con comportamiento bilineal.

### 5.2. Software utilizado.

El programa PERFORM 3D es un producto de CSI Computer que ofrece las ventajas de una interface gráfica amigable, donde quedan bien definidos los distintos pasos del proceso de modelado, análisis y visualización de resultados. A continuación, se muestran las tres principales fases del procedimiento de modelado en PERFORM 3D

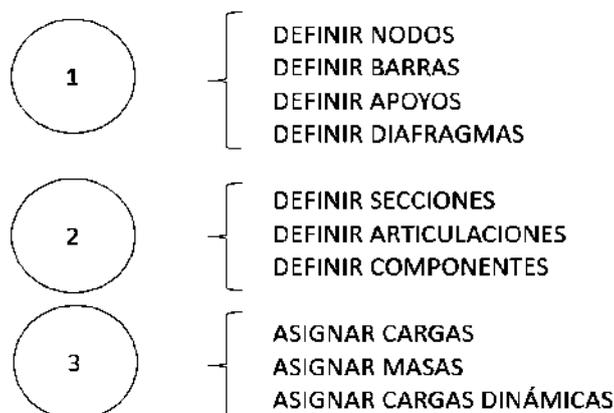




Figura 56. Etapas principales del modelado en PERFORM 3D.

5.3. Articulaciones plásticas.

El programa Perform permite usar un modelo de degradación cíclica con una curva envolvente tri-lineal con degradación de rigidez a la descarga. La envolvente queda definida principalmente por las deformaciones en los puntos Y, U, L, R, y X. Aunque cada elemento se define particularmente, a continuación, se muestran valores aproximados de dichos puntos.

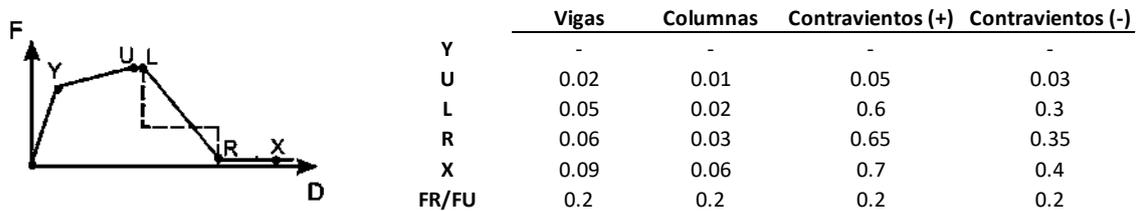


Figura 57. Deformaciones aproximadas para definir la envolvente tri-lineal de los elementos estructurales.

La degradación de rigidez en ciclo se define de acuerdo con la regla de Clough, mediante factores de degradación en cada uno de los puntos Y, U, L, R y X, cada la descarga se controla mediante un factor, así como los factores de degradación energética. A continuación, se muestran valores utilizados en los diferentes elementos estructurales.

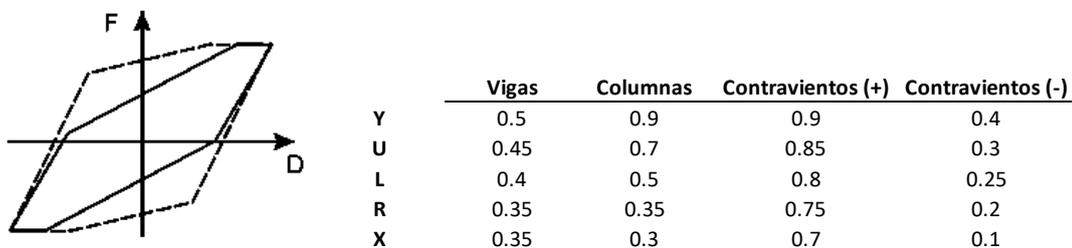


Figura 58. Factores de degradación para los elementos estructurales.

A continuación, se muestra la comparación de comportamiento de la prueba experimental "Saatcioglu and Ozcebe 1989, U1" de la base de datos <https://nisee.berkeley.edu/sdp/>, y del modelo idealizado.

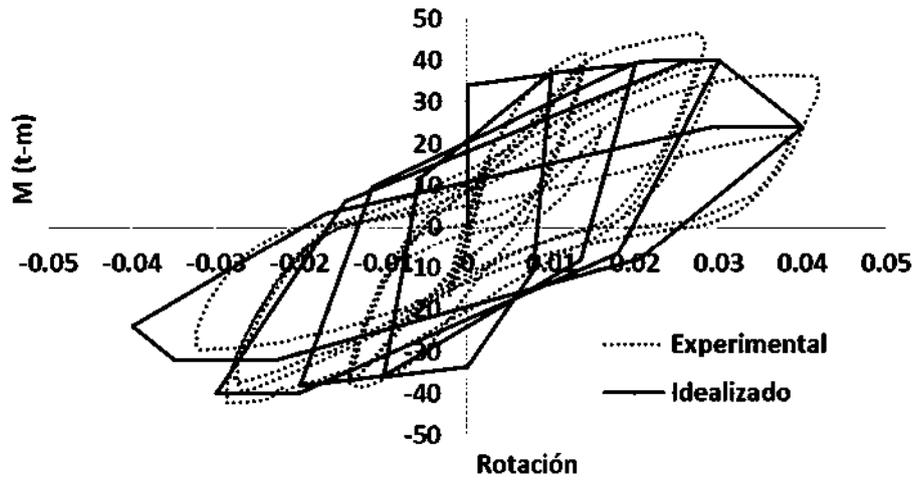


Figura 59. Comparación de lazos histeréticos de una prueba experimental y del modelo idealizado.

5.4. Periodos fundamentales de los modelos estructurales.

A continuación, se presentan los espectros de diseño elástico y el espectro reducido para los diferentes grupos de edificios. Se marca la demanda correspondiente a los diferentes sistemas: marcado como “Marco” se muestra la demanda sobre el periodo fundamental del edificio diseñado a base de marcos de concreto, con “CV”, se marca el sistema de marcos con contravientos, con “Aislado”, el sistema con contravientos y aisladores de base, y con “Disipa”, el sistema con disipadores histeréticos.

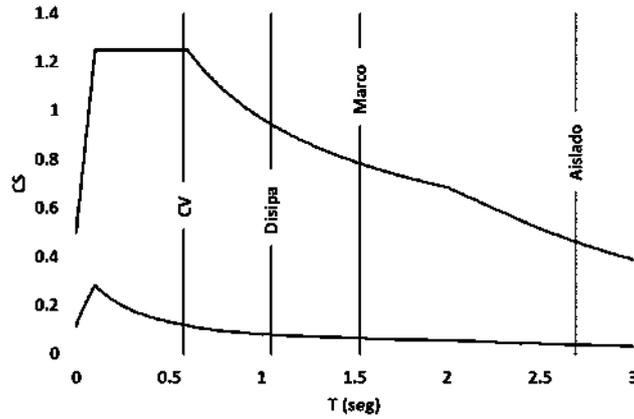


Figura 60. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios PE-10.

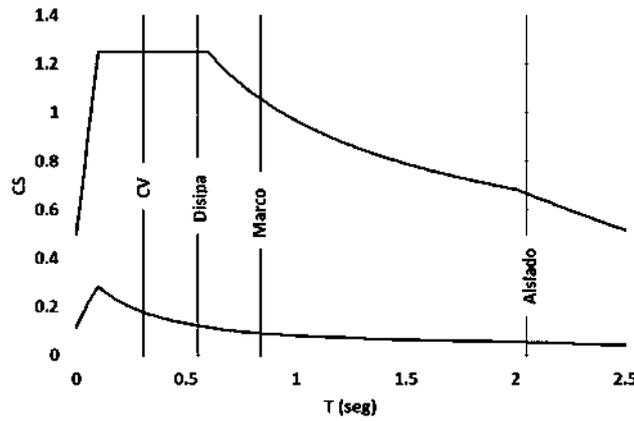


Figura 61. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios PE-05.

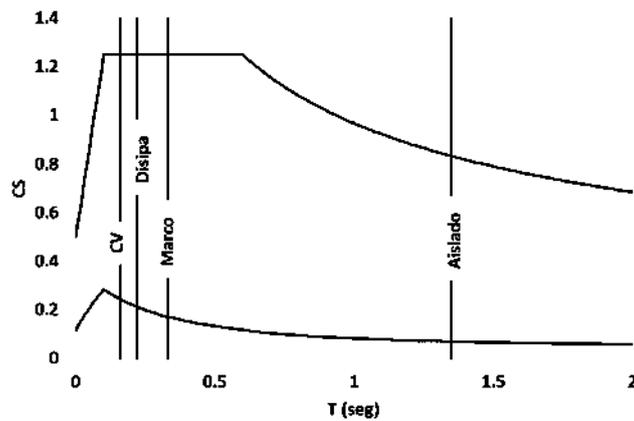


Figura 62. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios PE-02.

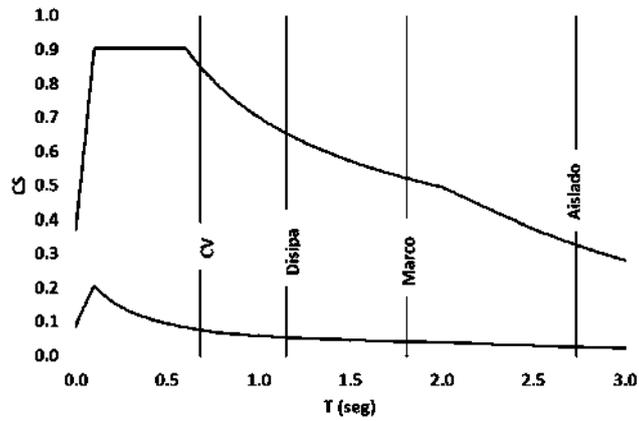


Figura 63. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios SC-10.

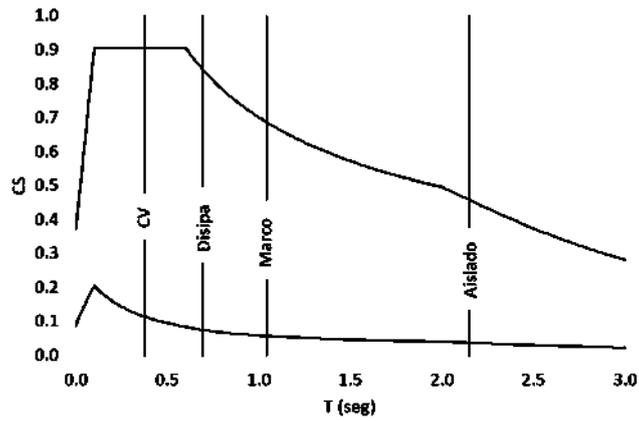


Figura 64. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios SC-05.

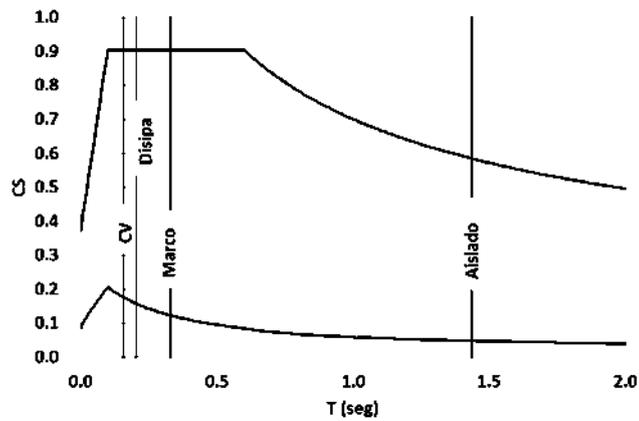


Figura 65. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios SC-02.

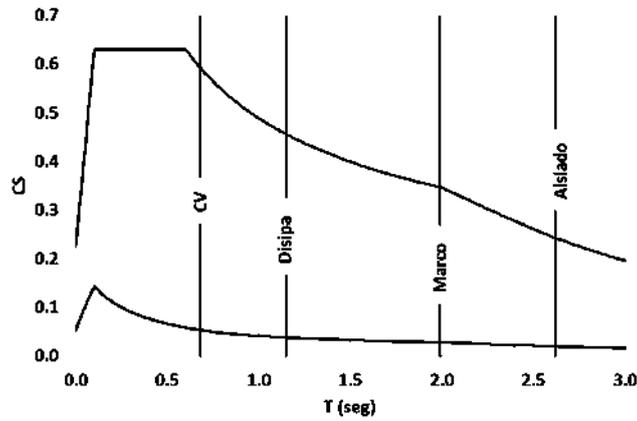


Figura 66. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios OAX-10.

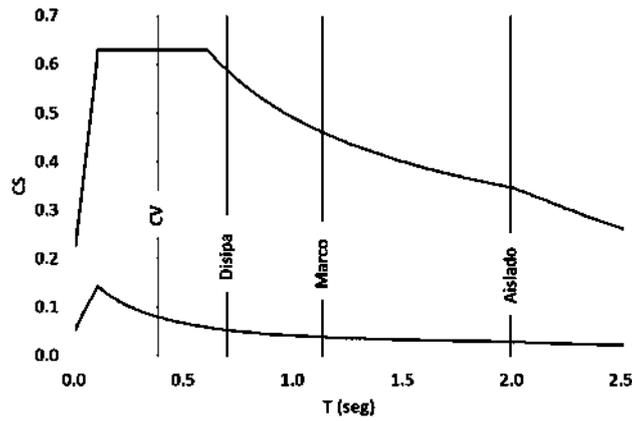


Figura 67. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios OAX-05.

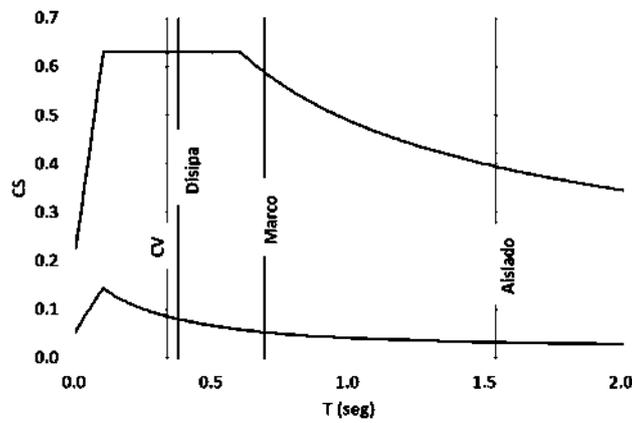


Figura 68. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios OAX-02.

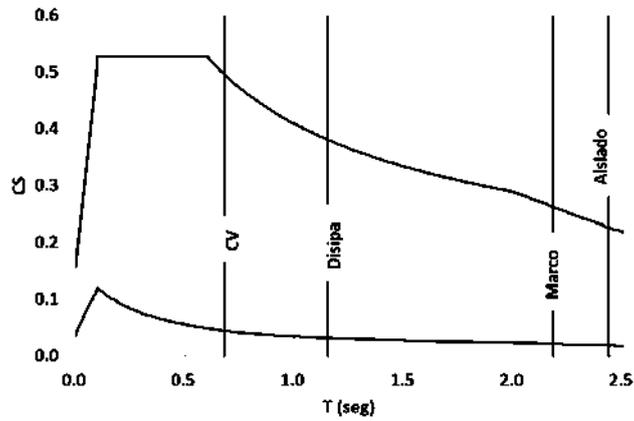


Figura 69. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios HUA-10.

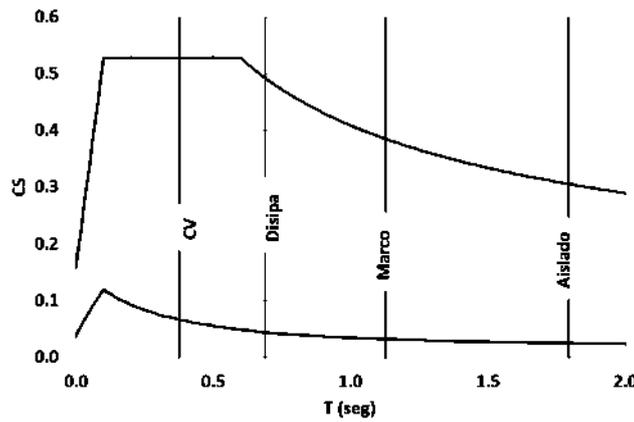


Figura 70. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios HUA-05.

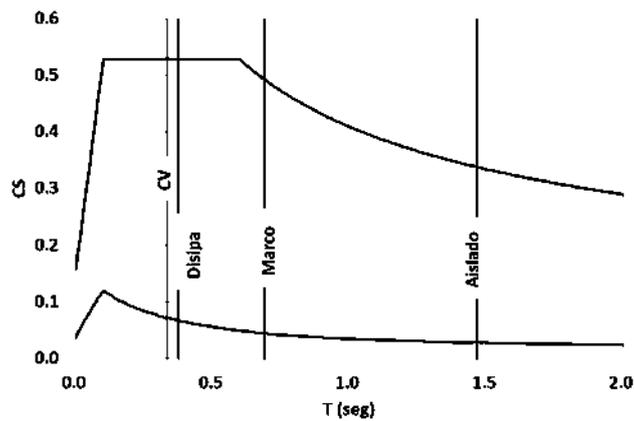


Figura 71. Espectros de diseño y periodos fundamentales de los edificios HUA-02.



5.5. Demanda de distorsión y cortante.

De la Figura 72 a la Figura 95, se muestra la envolvente de demanda de distorsión máxima (lado izquierdo) y la envolvente de demanda de cortante (lado derecho). Dichas demandas son el resultado de sumar vectorialmente las demandas en dos ejes ortogonales, para cada intervalo del análisis, en los entrepisos de los diferentes sistemas estructurales. La demanda de distorsiones se obtuvo considerando el desplazamiento del centro geométrico del edificio, y para la demanda de cortante se considera en un primer momento todos los elementos del entrepiso (columnas y contravientos), y posteriormente únicamente las columnas (indicadas en las gráficas como “Col CV”, “Col Ais”, “Col Dis”, para los edificios con contravientos, con aisladores y con disipadores, respectivamente).

A continuación, se muestran los estados límite de comportamiento basados en distorsiones, propuestos por diferentes autores, y los que se consideran para el presente estudio:

Tabla 9. Propuestas de estados límite de daño basados en distorsión angular.

<b>Estados de daño (Dutta y Mander, 1998)</b>	
<b>ESTADO DE DAÑO</b>	<b>LÍMITE DE DISTORSIÓN ANGULAR</b>
<i>Primer fluencia</i>	$\Delta y \leq \Delta < 0.01$
<i>Agrietamiento, desprendimiento</i>	$0.01 \leq \Delta < 0.025$
<i>Pérdida de recubrimiento</i>	$0.025 \leq \Delta < 0.050$
<i>Colapso incipiente de la pila</i>	$0.050 \leq \Delta < 0.075$
<i>Colapso de la pila</i>	$0.075 \leq \Delta$

<b>Estados de daño (Akbari, 2010)</b>	
<b>ESTADO LIMITE (DAÑO)</b>	<b>LÍMITE DE DISTORSIÓN ANGULAR</b>
<i>Casi ningun daño</i>	$0.005 \leq \Delta < 0.007$
<i>Daño ligero</i>	$0.007 \leq \Delta < 0.015$
<i>Daño moderado</i>	$0.015 \leq \Delta < 0.025$
<i>Daño extensivo</i>	$0.025 \leq \Delta < 0.05$
<i>Daño completo</i>	$0.05 \leq \Delta$

<b>Estados de daño (basado en Dutta y Mander, 1998)</b>	
<b>ESTADO LIMITE (DAÑO)</b>	<b>LÍMITE DE DISTORSIÓN ANGULAR</b>
<b>IO</b>	0.01
<b>LS</b>	0.025
<b>CP</b>	0.05

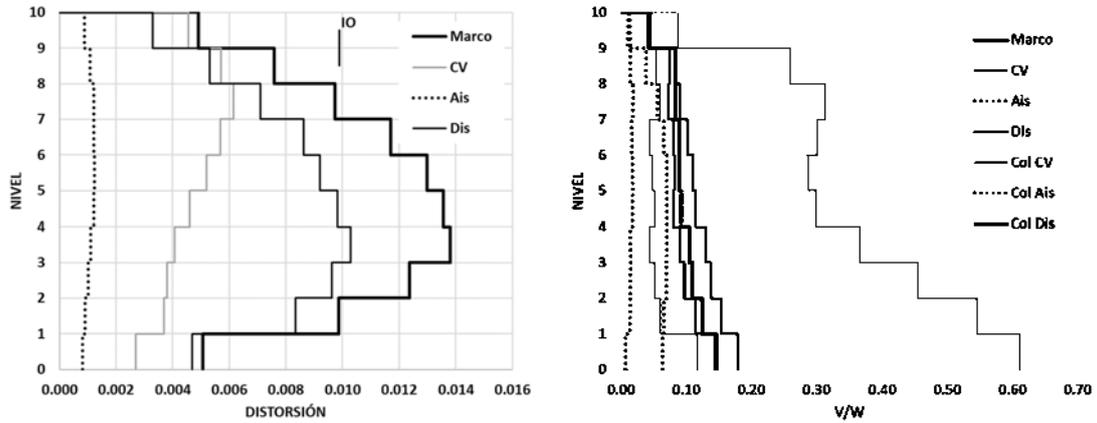


Figura 72. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos de los modelos PE-10.

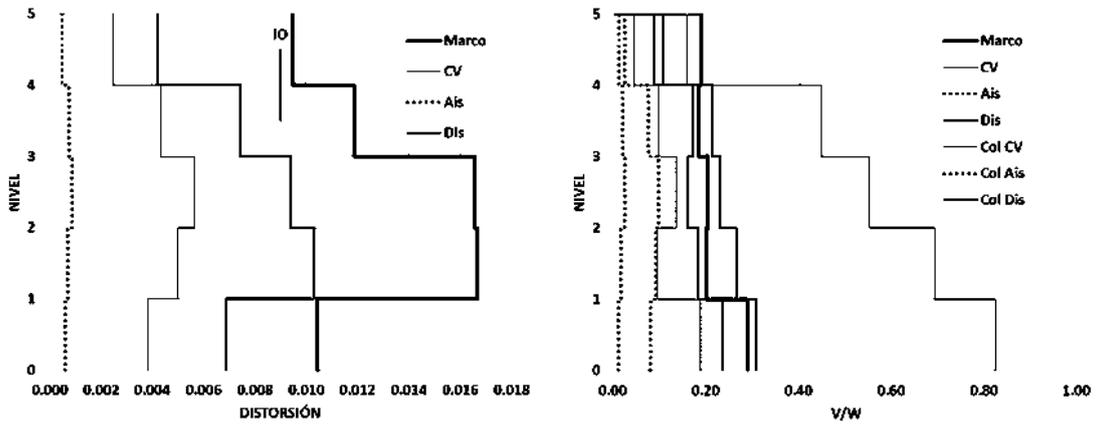


Figura 73. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo PE-05.

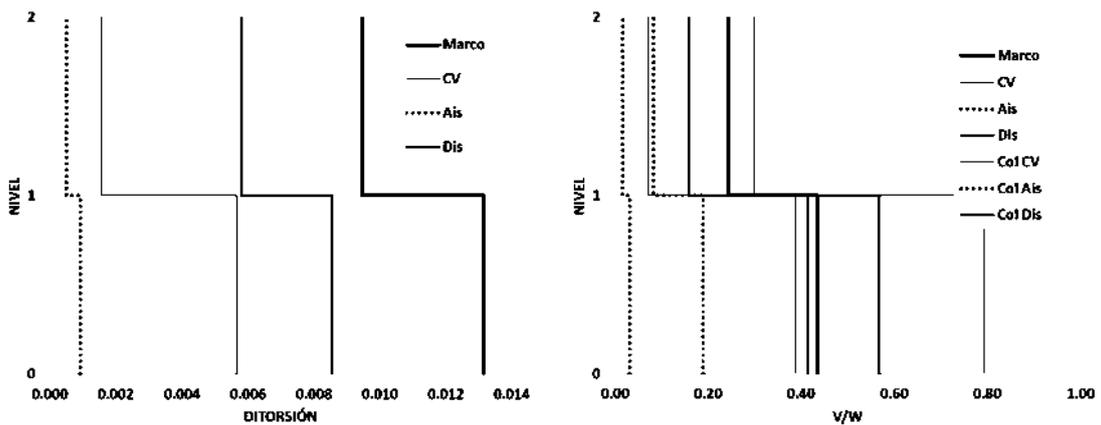


Figura 74. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo PE-02.

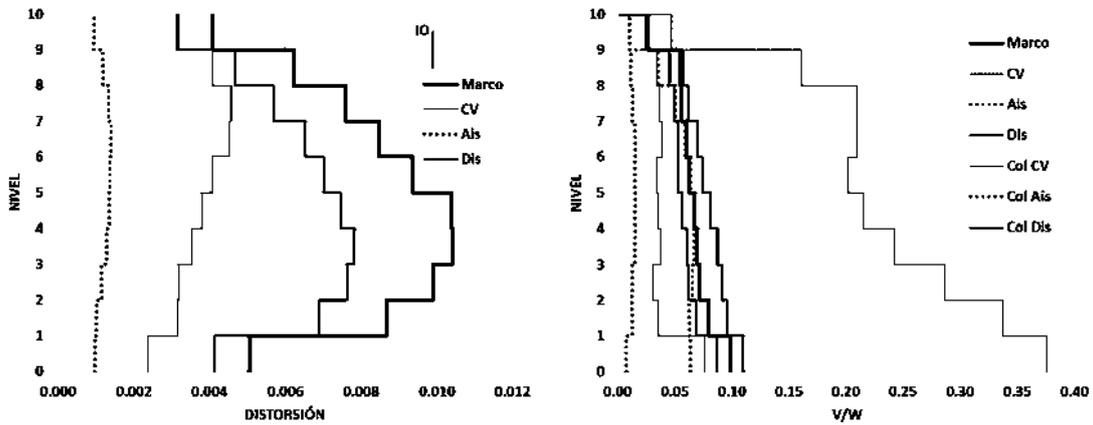


Figura 75. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo SC-10.

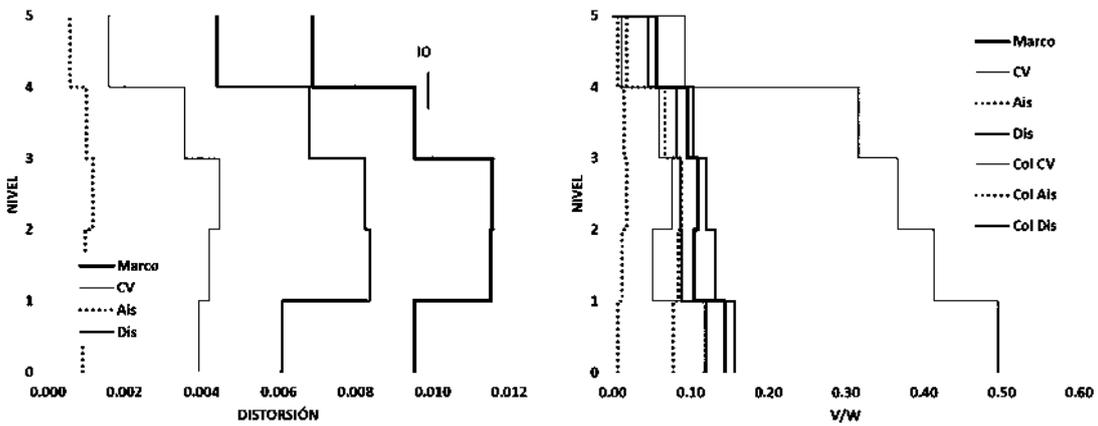


Figura 76. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo SC-05.

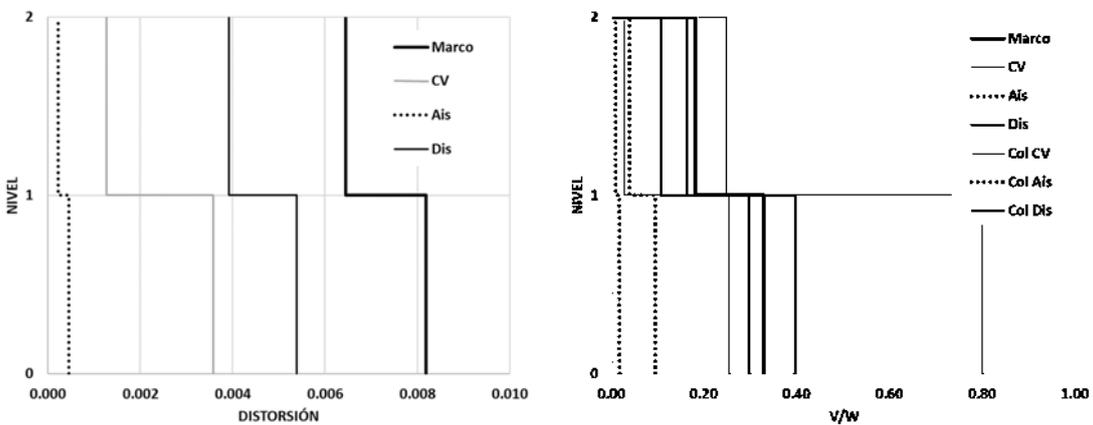


Figura 77. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo SC-02.

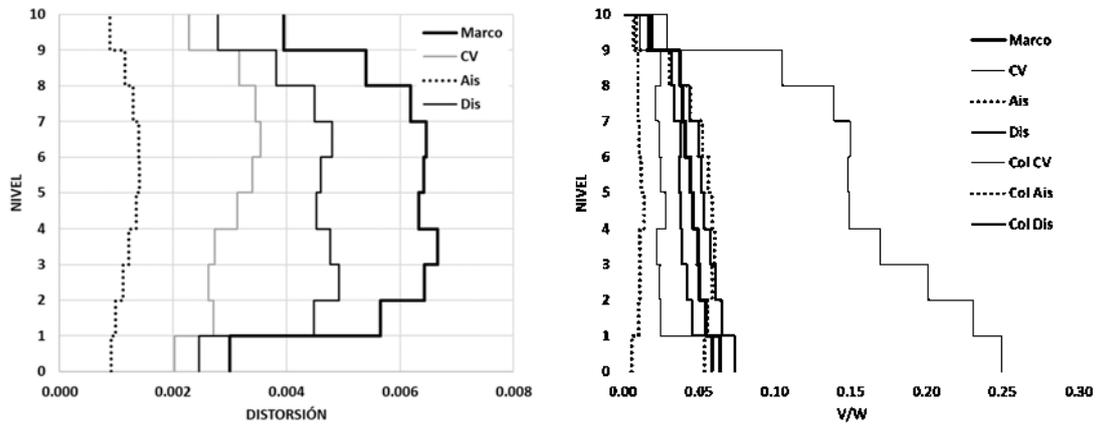


Figura 78. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo OAX-10.

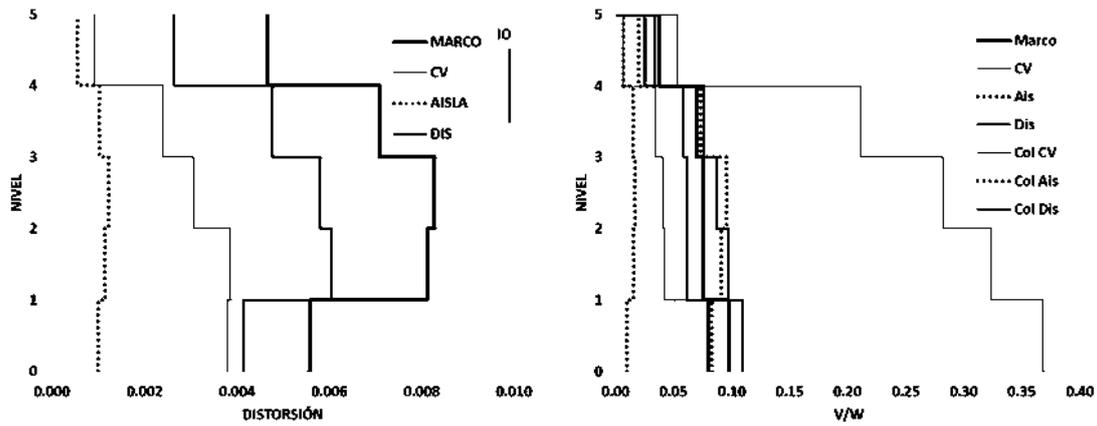


Figura 79. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo OAX-05.

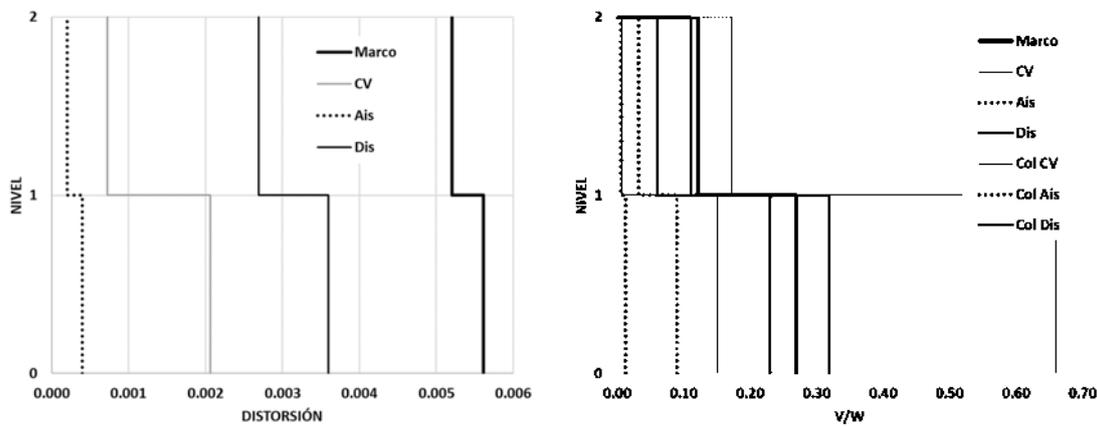


Figura 80. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo OAX-02.

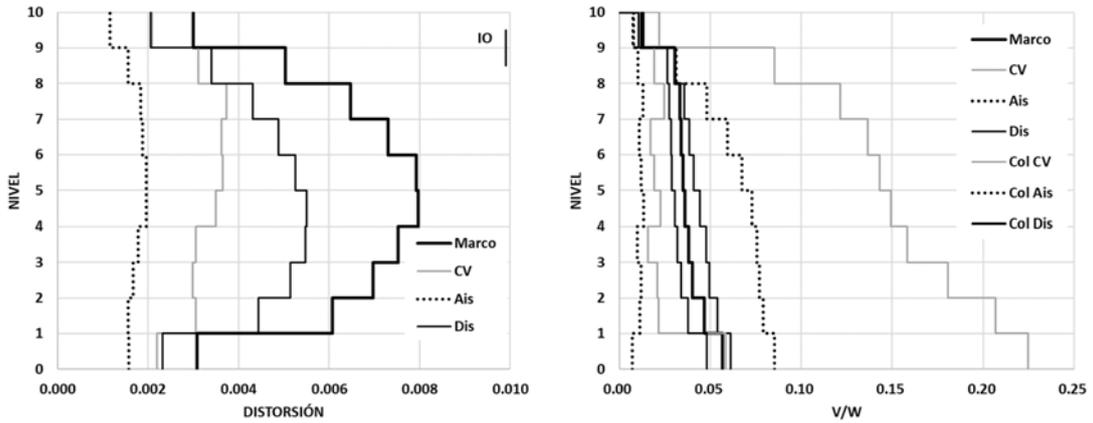


Figura 81. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo HUA-10.

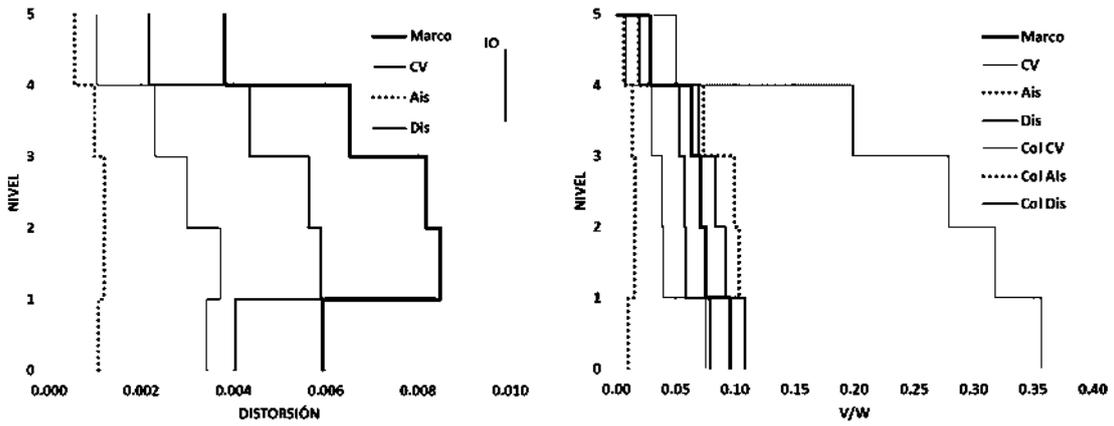


Figura 82. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo HUA-05.

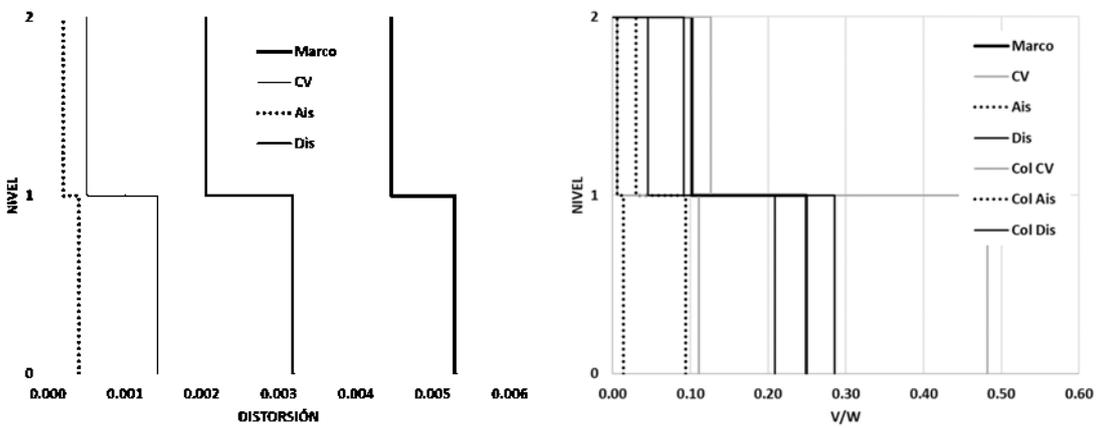


Figura 83. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo HUA-02.

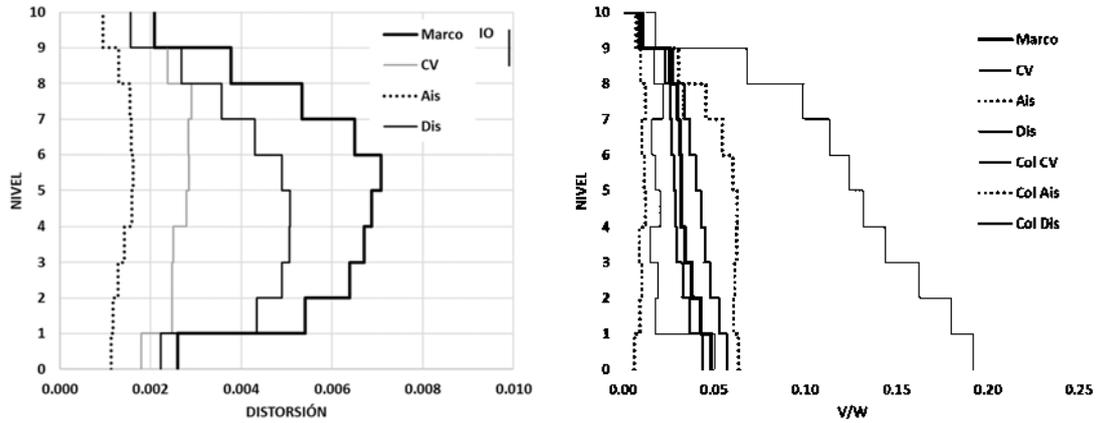


Figura 84. Demanda de distorsión y cortante en entresijos del modelo TEH-10.

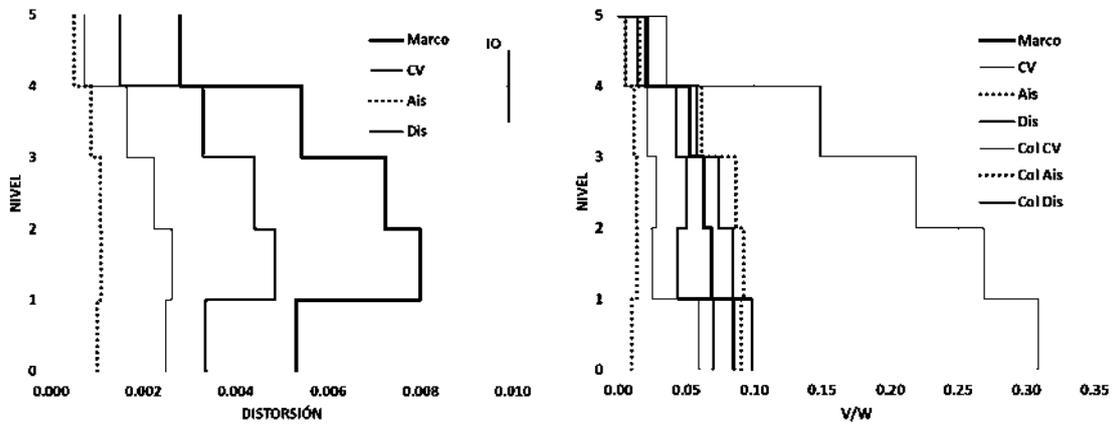


Figura 85. Demanda de distorsión y cortante en entresijos del modelo TEH-05.

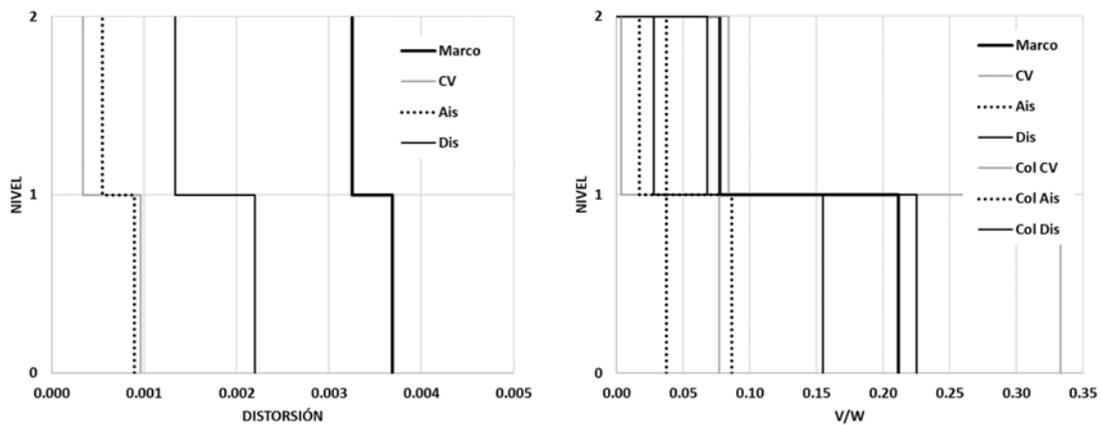


Figura 86. Demanda de distorsión y cortante en entresijos del modelo TEH-02.

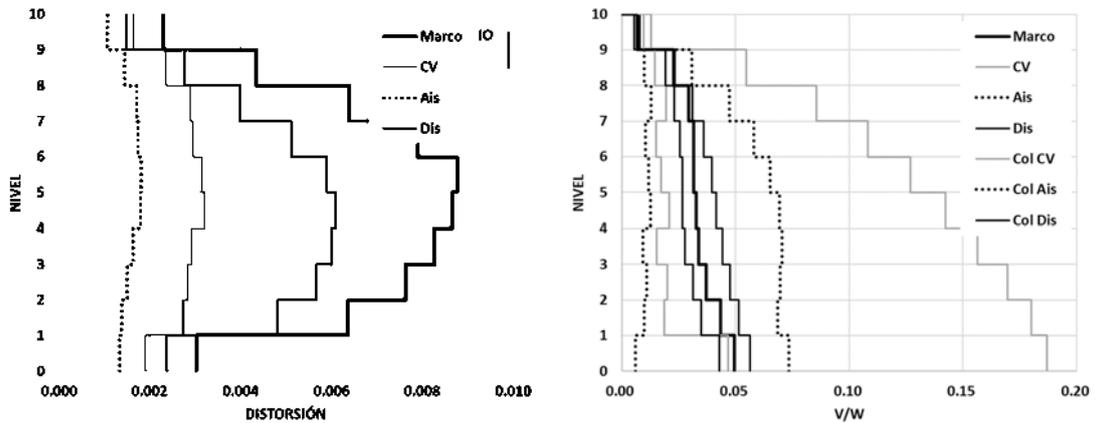


Figura 87. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo PUE-10.

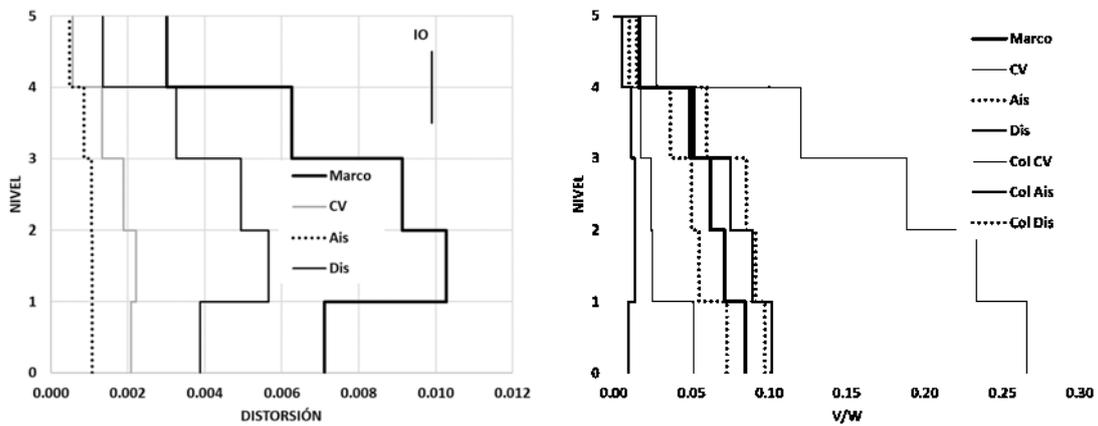


Figura 88. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo PUE-05.

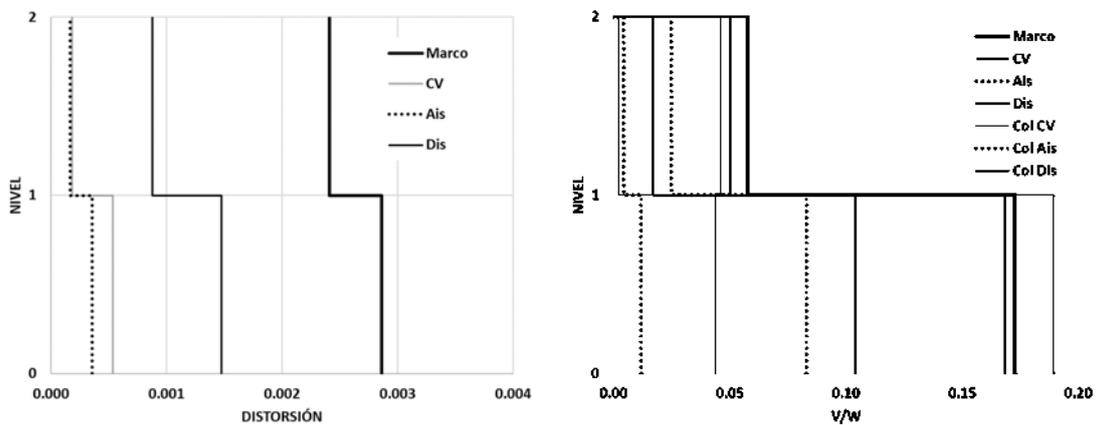


Figura 89. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo PUE-02.

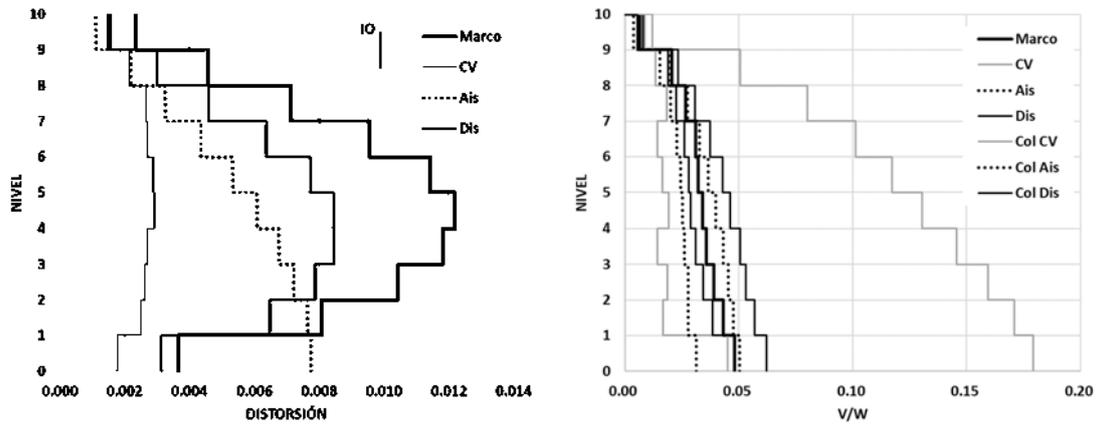


Figura 90. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo COR-10.

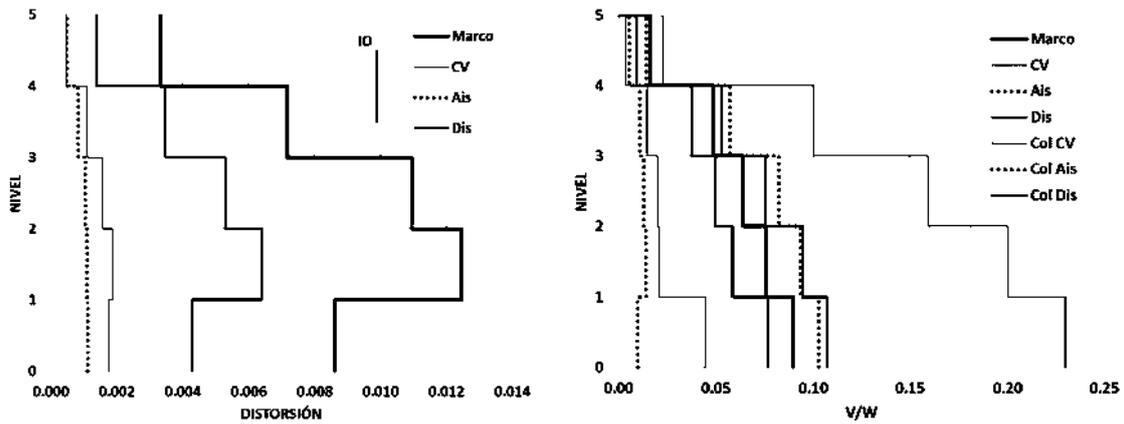


Figura 91. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo COR-05.

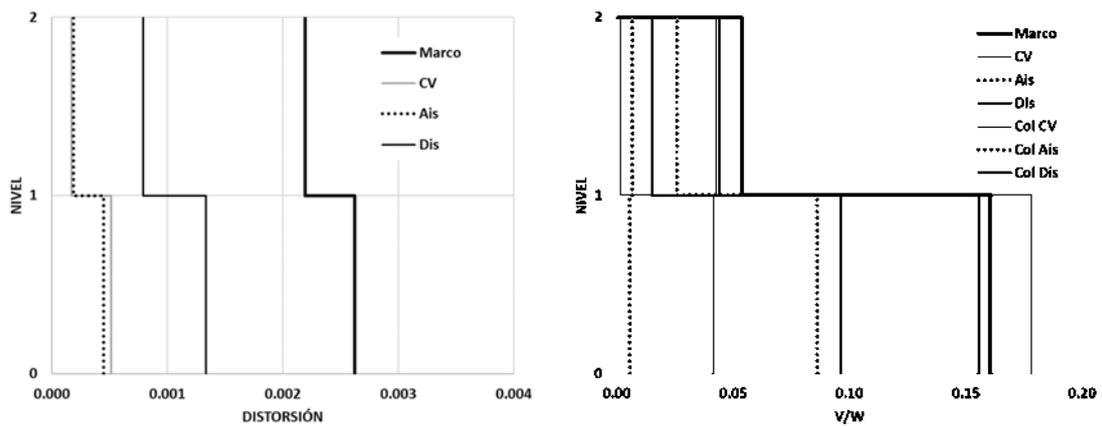


Figura 92. Demanda de distorsión y cortante en entrepisos del modelo COR-02.

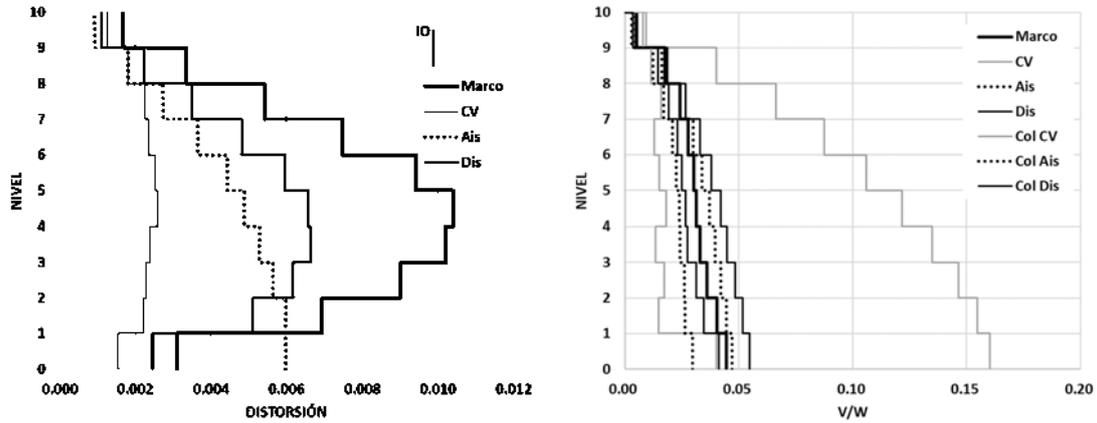


Figura 93. Demanda de distorsión y cortante en entresijos del modelo XAL-10

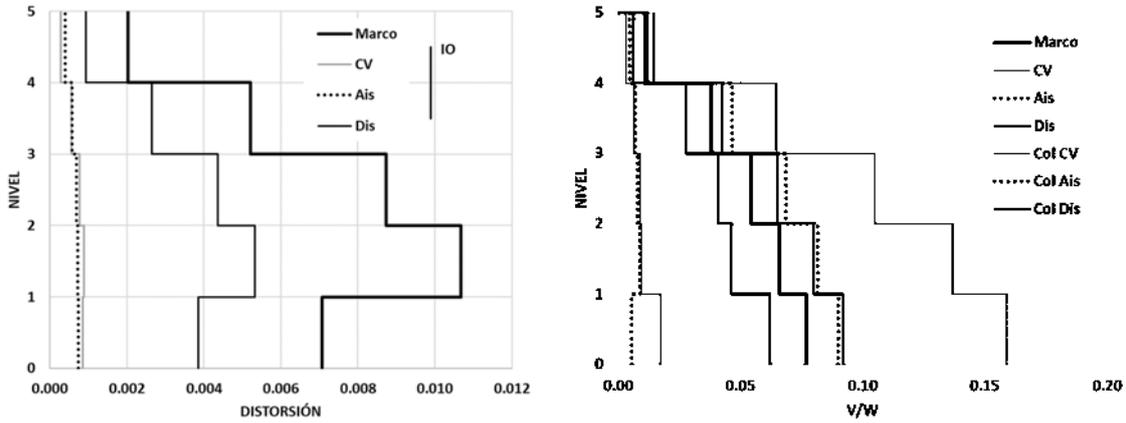


Figura 94. Demanda de distorsión y cortante en entresijos del modelo XAL-05.

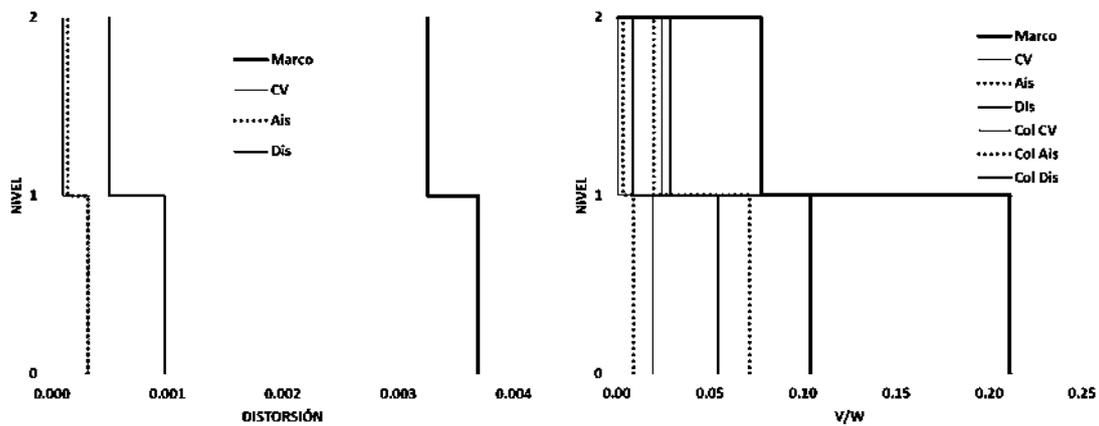


Figura 95. Demanda de distorsión y cortante en entresijos del modelo XAL-02.



#### 5.6. Demanda de velocidad y aceleración.

De la Figura 96 a la Figura 119, se muestra la envolvente de demanda de velocidad máxima (lado izquierdo) y la envolvente de demanda de aceleración máxima (lado derecho). Dichas demandas son el resultado de sumar vectorialmente las demandas en dos ejes ortogonales, para cada intervalo del análisis, en los entrepisos de los diferentes sistemas estructurales. La demanda monitoreada es la del centro geométrico del edificio. La velocidad y aceleración del entrepiso ( $V_{maxE}$  y  $A_{maxE}$ ) están normalizadas con respecto a la velocidad y aceleración máximas del terreno ( $V_{maxS}$  y  $A_{maxS}$ ).

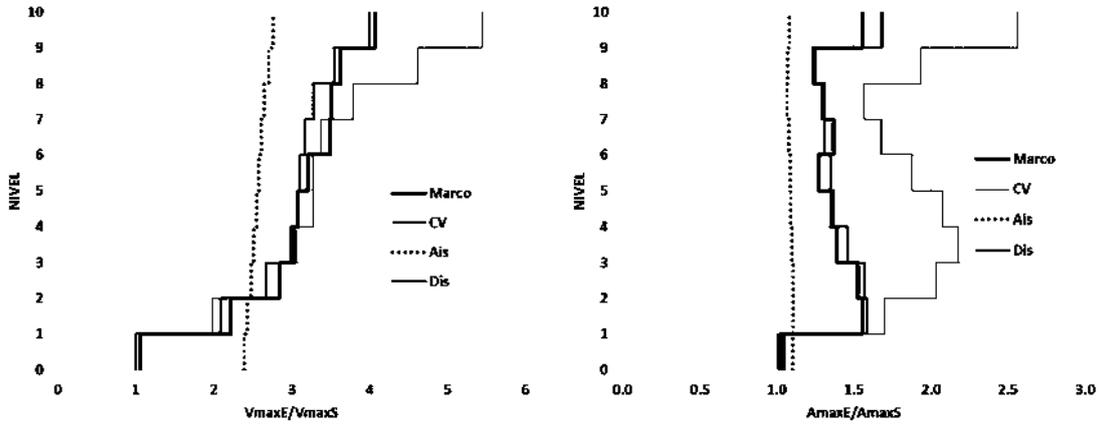


Figura 96. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo PE-10.

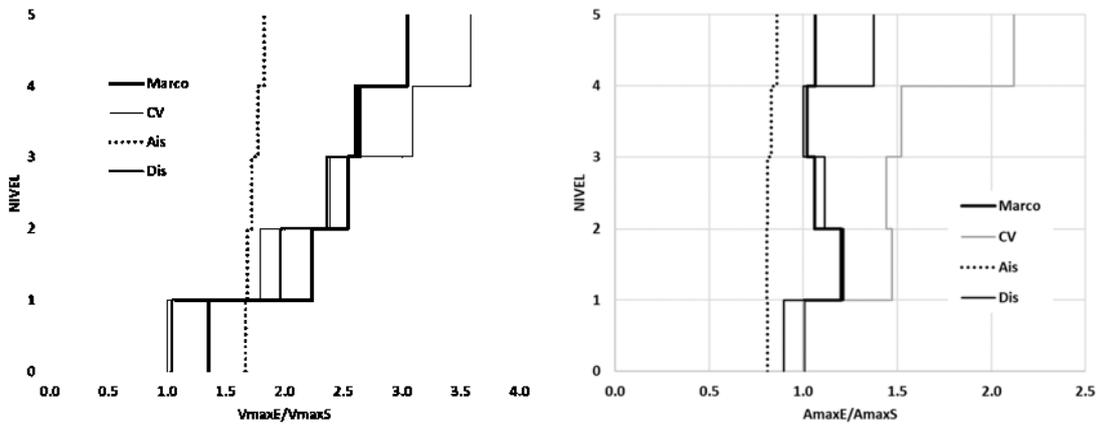


Figura 97. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo PE-05.

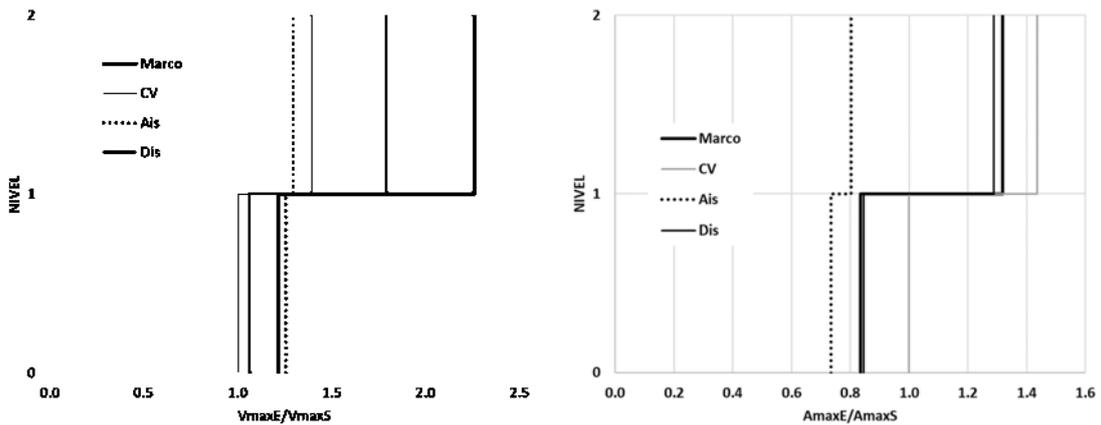


Figura 98. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo PE-05.

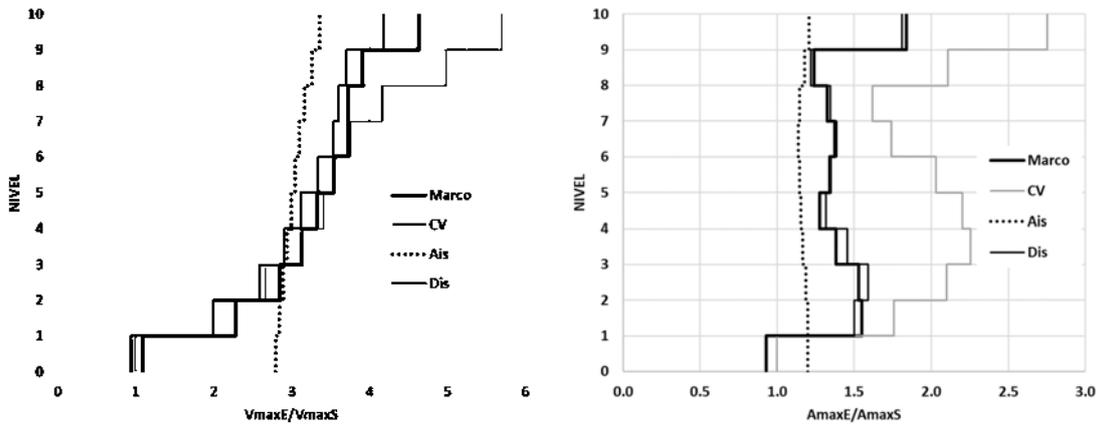


Figura 99. Demanda de velocidad y aceleración en entresijos del modelo SC-10.

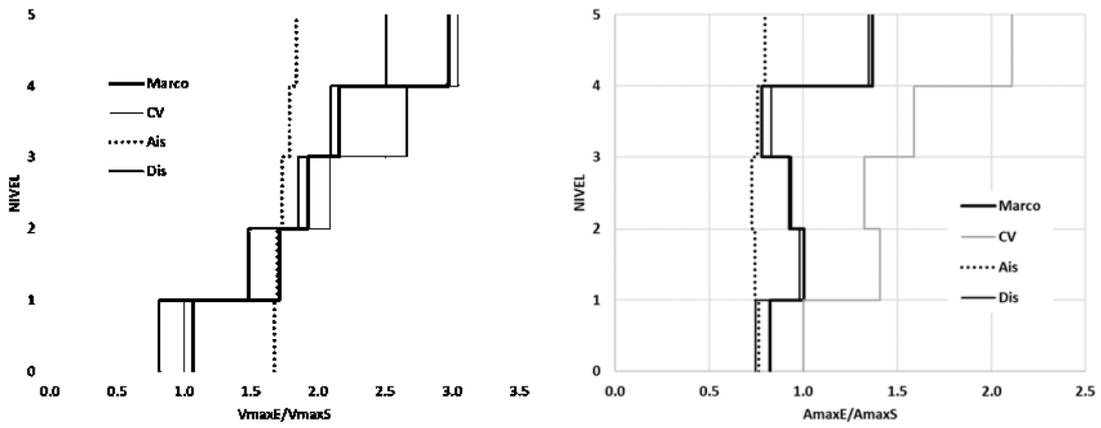


Figura 100. Demanda de velocidad y aceleración en entresijos del modelo SC-05.

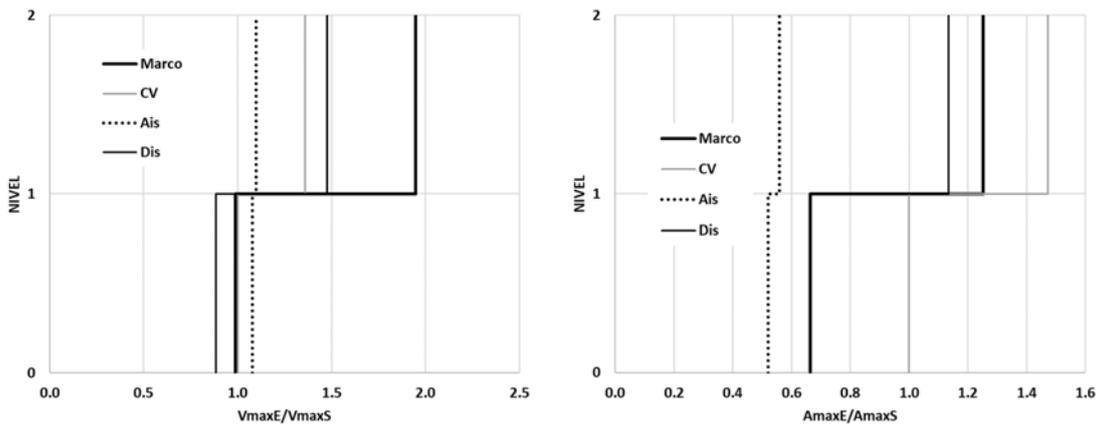


Figura 101. Demanda de velocidad y aceleración en entresijos del modelo SC-02.

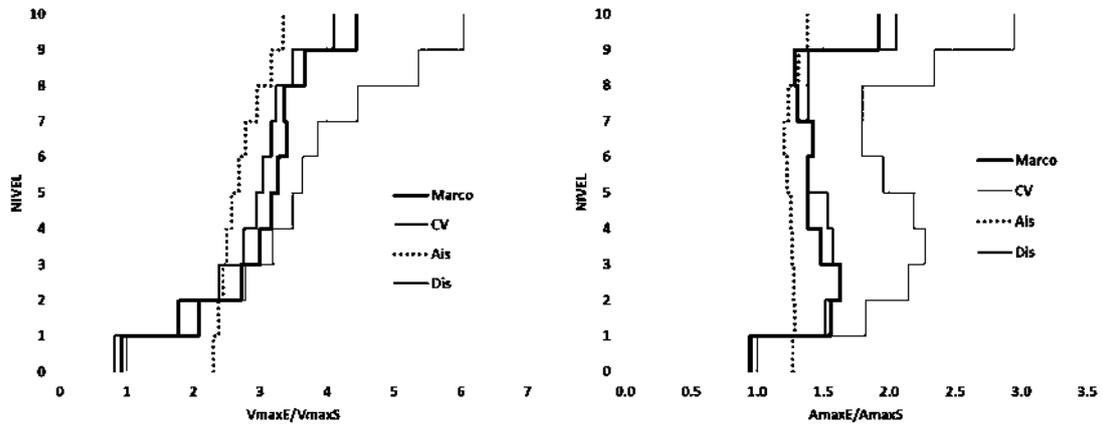


Figura 102. Demanda de velocidad y aceleración en entresijos del modelo OAX-10.

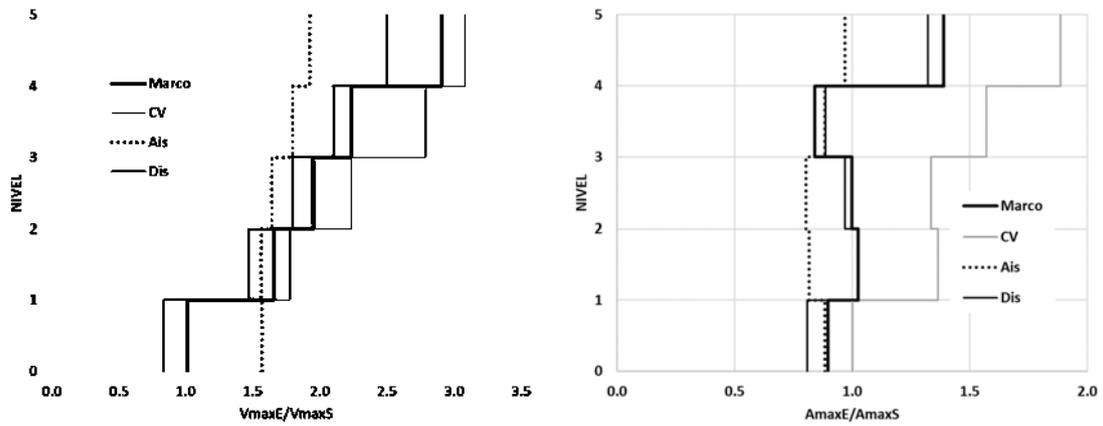


Figura 103. Demanda de velocidad y aceleración en entresijos del modelo OAX-05.

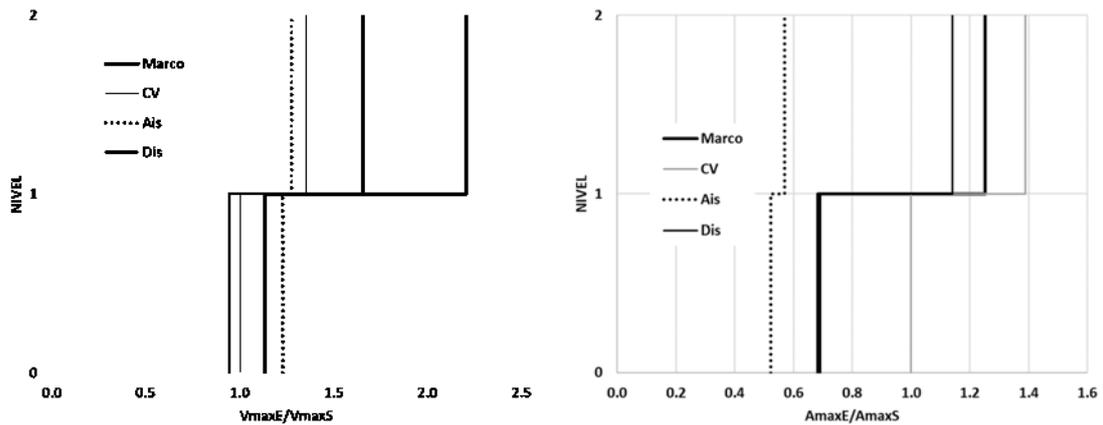


Figura 104. Demanda de velocidad y aceleración en entresijos del modelo OAX-02.

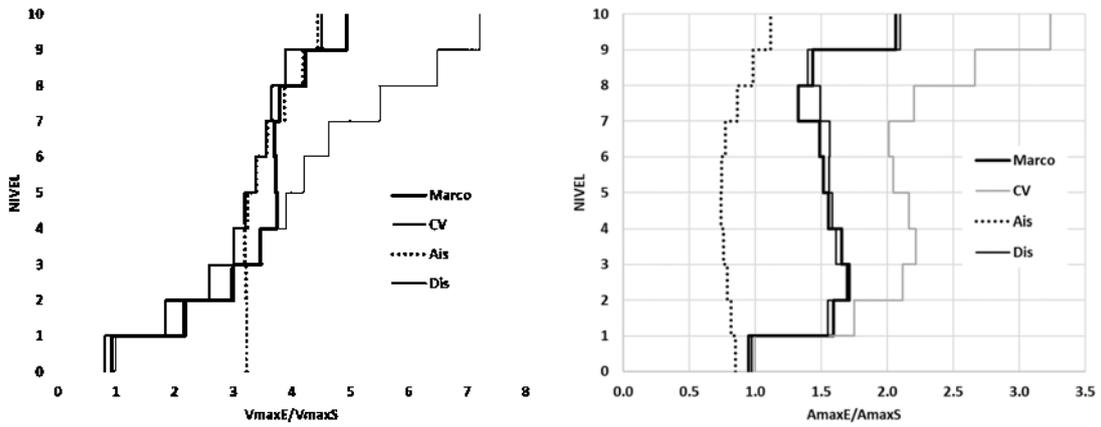


Figura 105. Demanda de velocidad y aceleración en entropisos del modelo HUA-10.

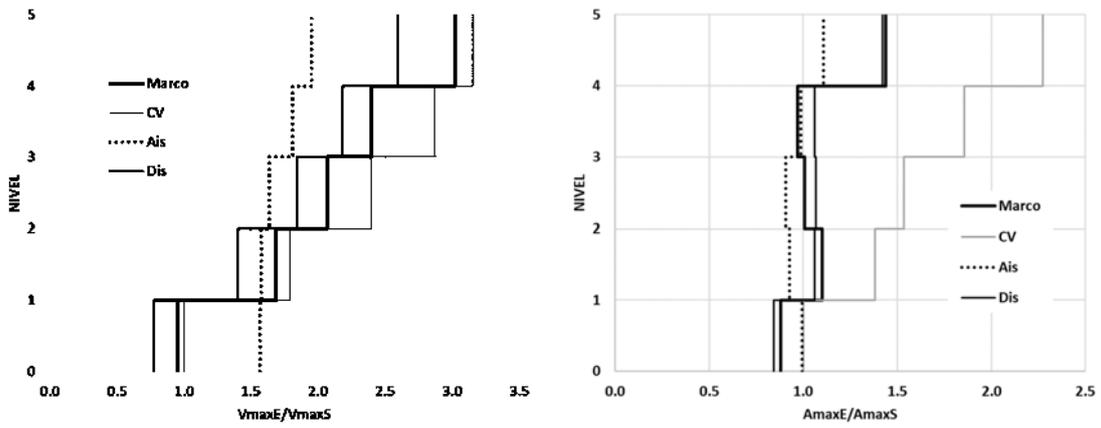


Figura 106. Demanda de velocidad y aceleración en entropisos del modelo HUA-05.

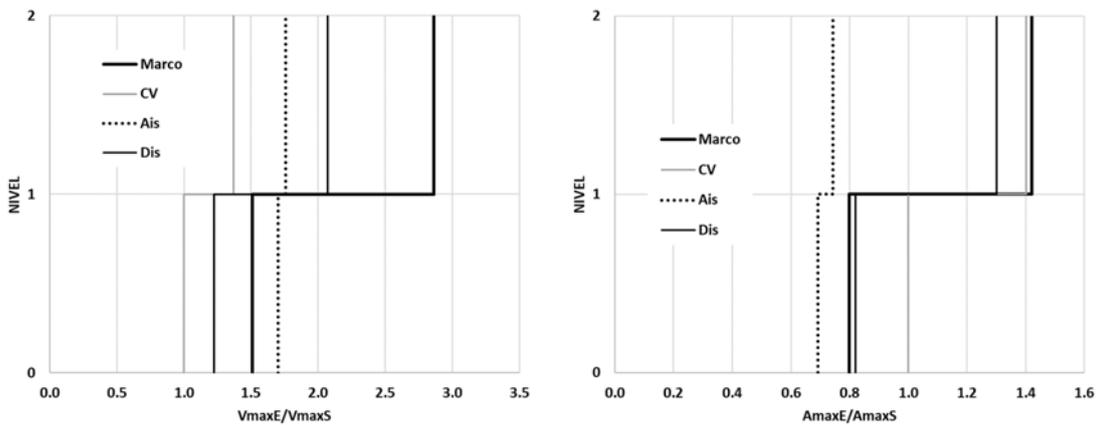


Figura 107. Demanda de velocidad y aceleración en entropisos del modelo HUA-02.

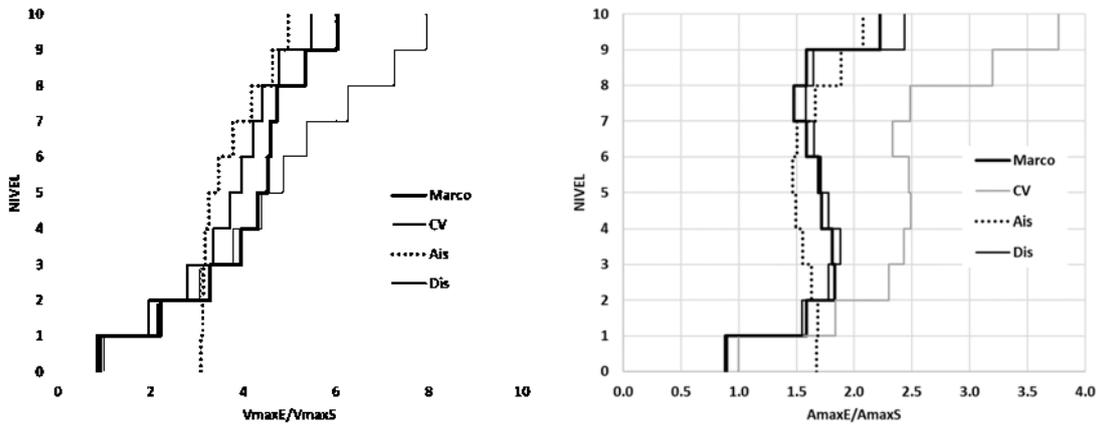


Figura 108. Demanda de velocidad y aceleración en entresijos del modelo TEH-10.

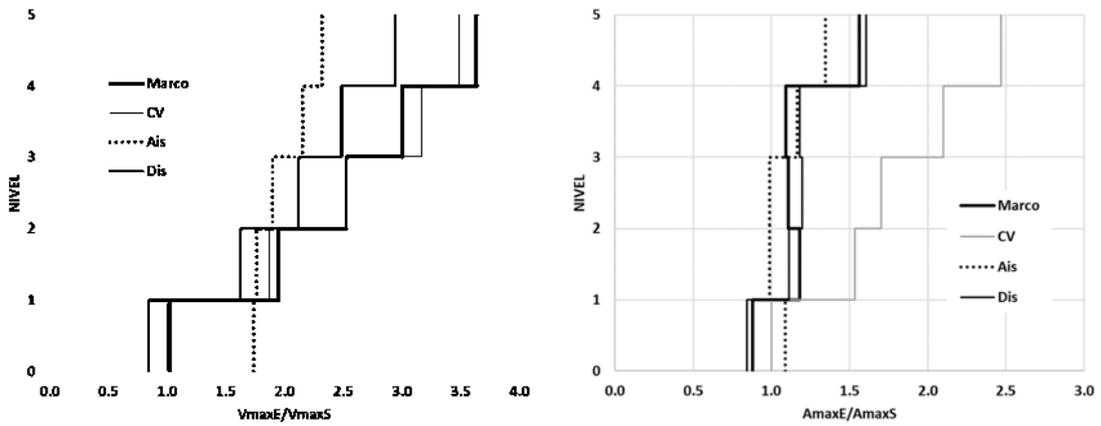


Figura 109. Demanda de velocidad y aceleración en entresijos del modelo TEH-05.

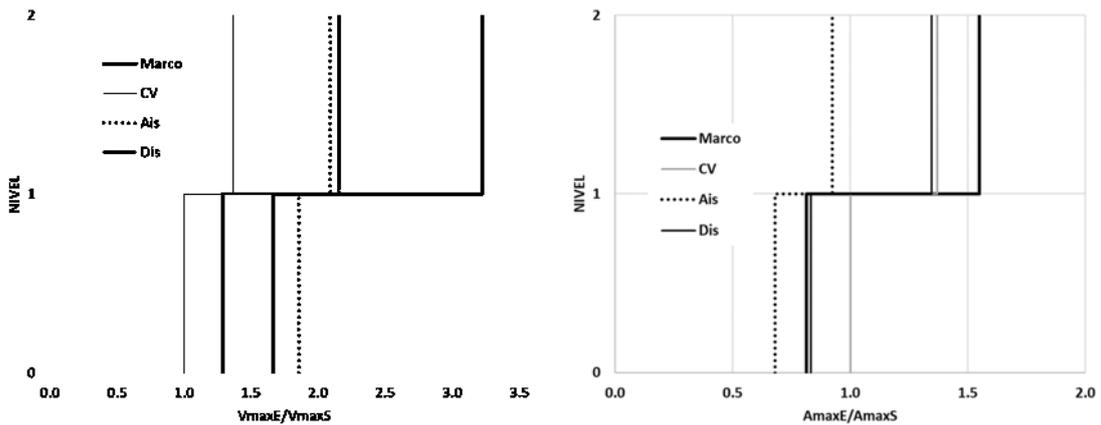


Figura 110. Demanda de velocidad y aceleración en entresijos del modelo TEH-02.

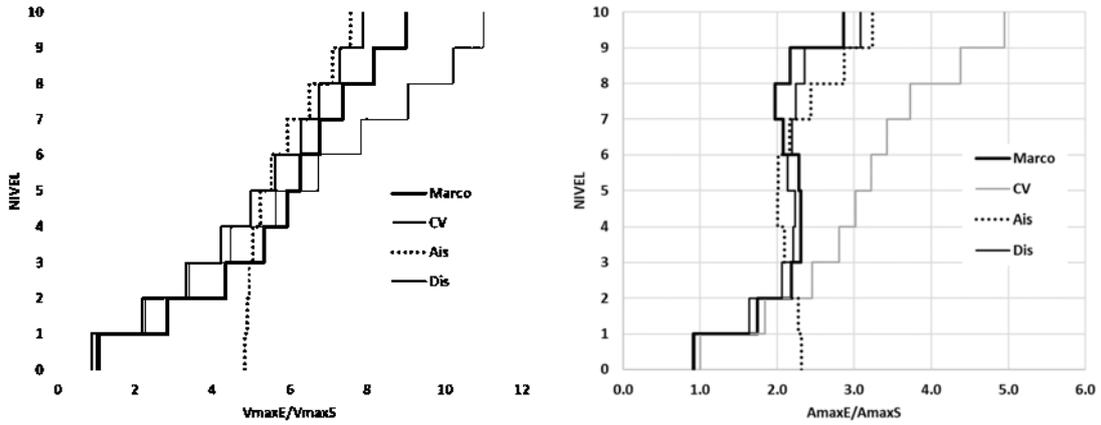


Figura 111. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo PUE-10.

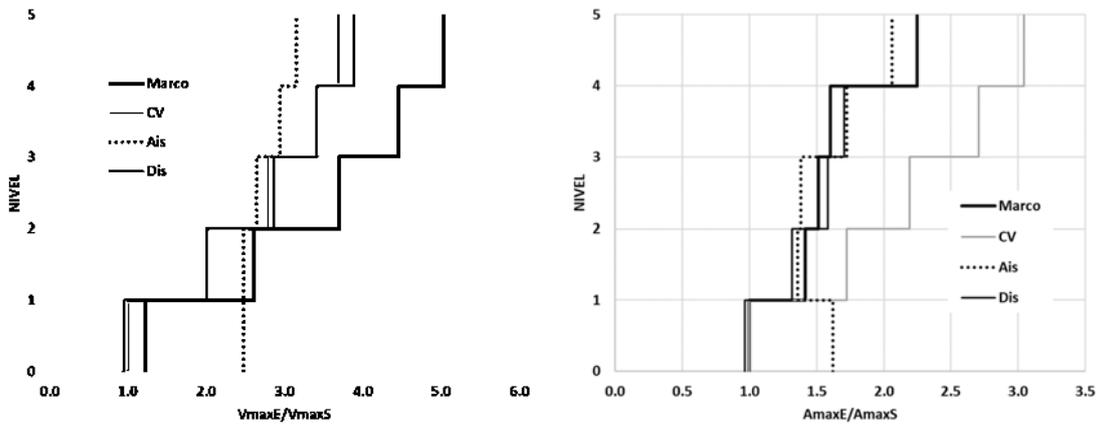


Figura 112. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo PUE-05.

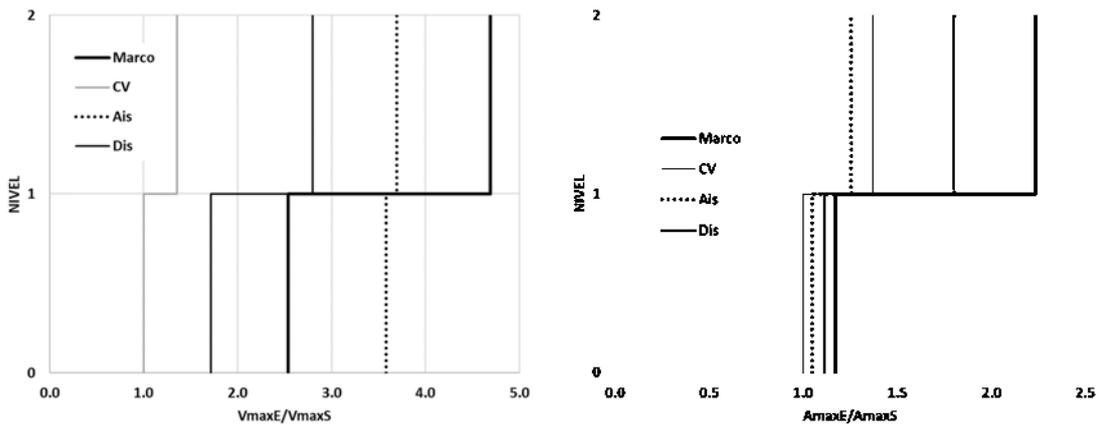


Figura 113. Demanda de velocidad y aceleración en entrepisos del modelo PUE-02.

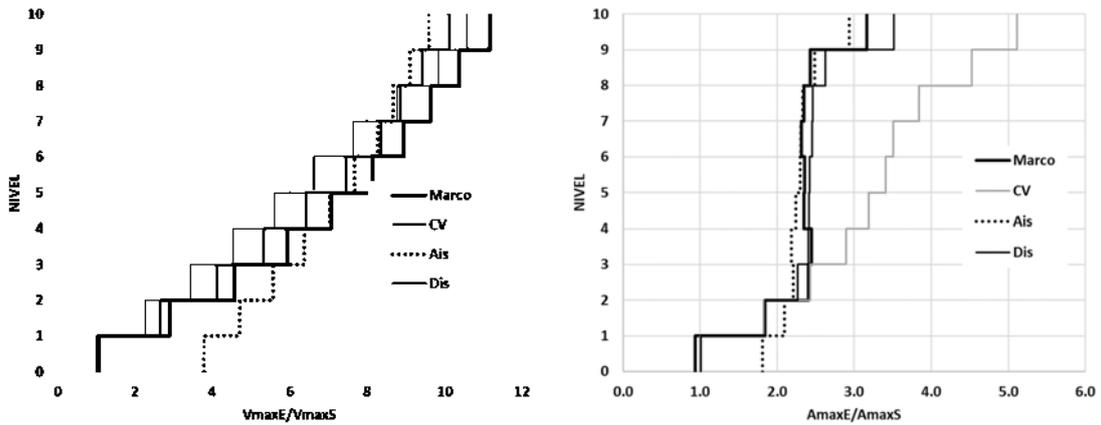


Figura 114. Demanda de velocidad y aceleración en entresijos del modelo COR-10.

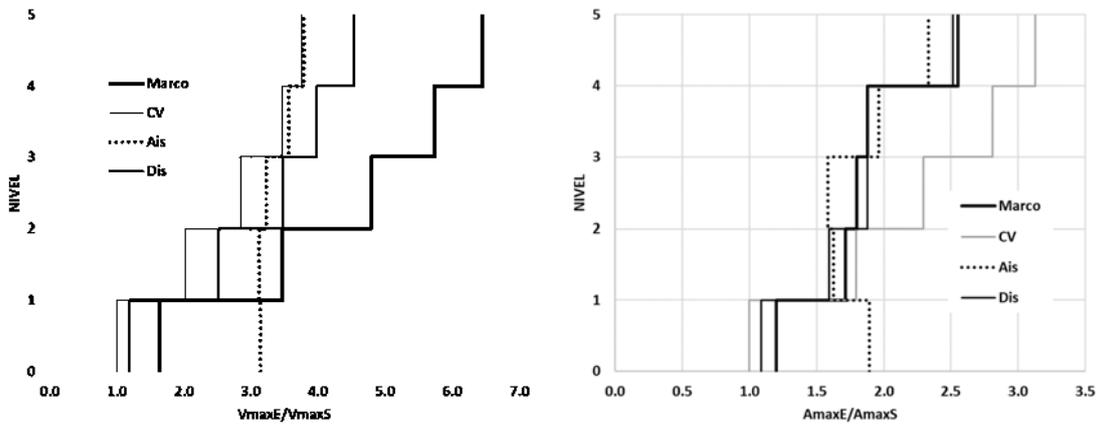


Figura 115. Demanda de velocidad y aceleración en entresijos del modelo COR-05.

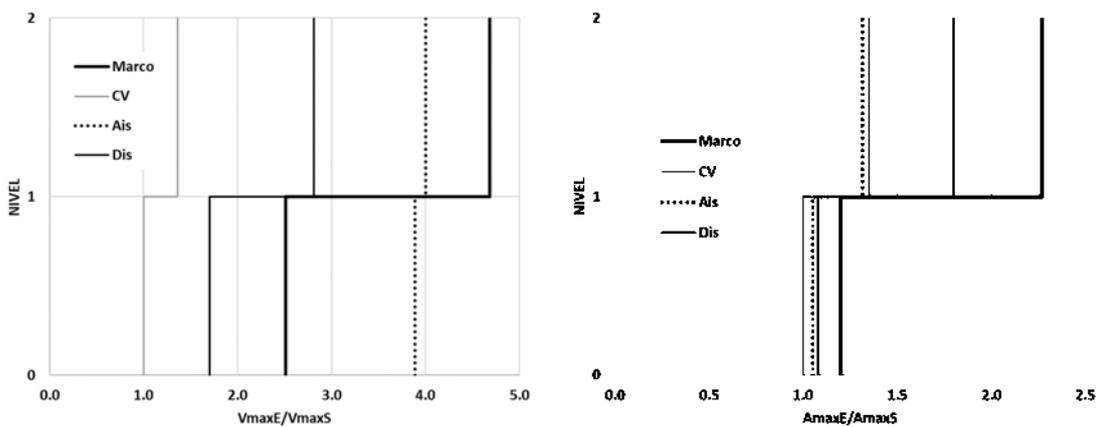


Figura 116. Demanda de velocidad y aceleración en entresijos del modelo COR-02.

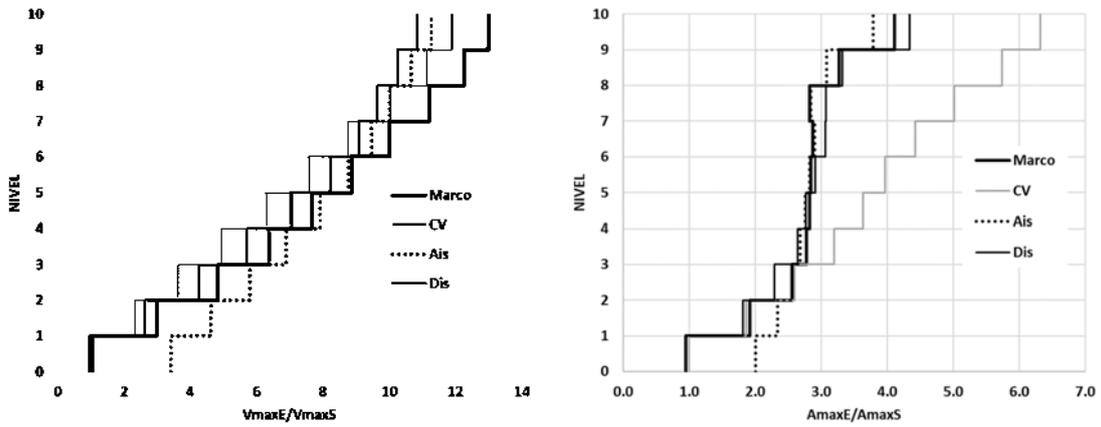


Figura 117. Demanda de velocidad y aceleración en entresijos del modelo XAL-10.

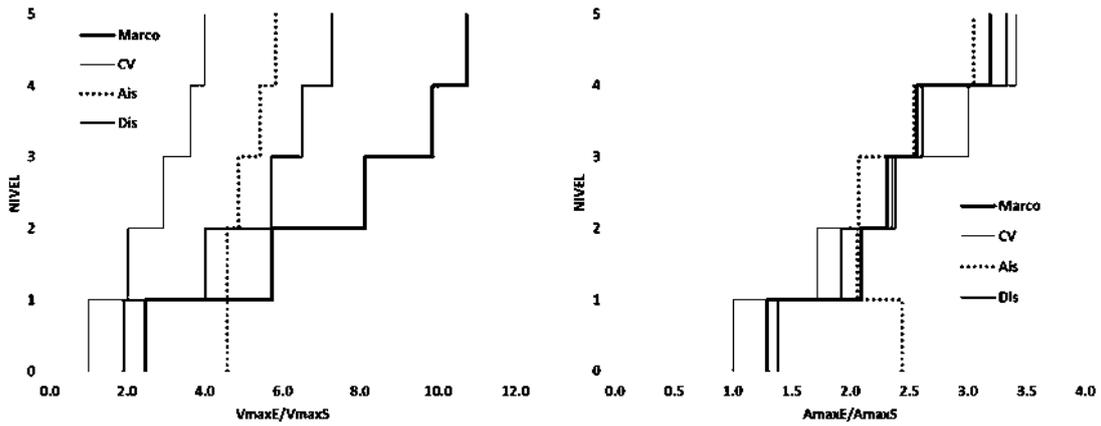


Figura 118. Demanda de velocidad y aceleración en entresijos del modelo XAL-05.

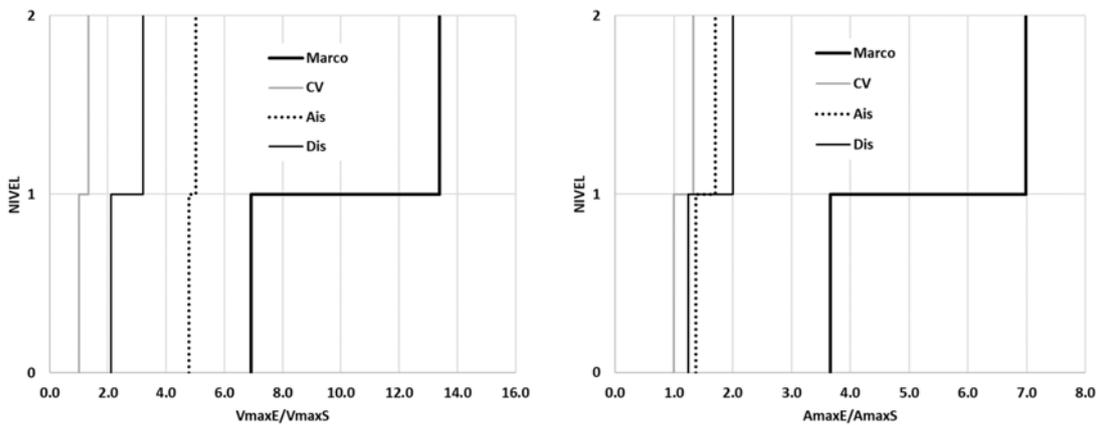


Figura 119. Demanda de velocidad y aceleración en entresijos del modelo XAL-02.



5.7. Demanda de ductilidad en los disipadores.

De la Figura 120 a la Figura 127, se muestra la demanda de ductilidad de los dispositivos histeréticos, para los diferentes grupos de edificios. Se muestra la mínima demanda, la máxima demanda y el promedio.

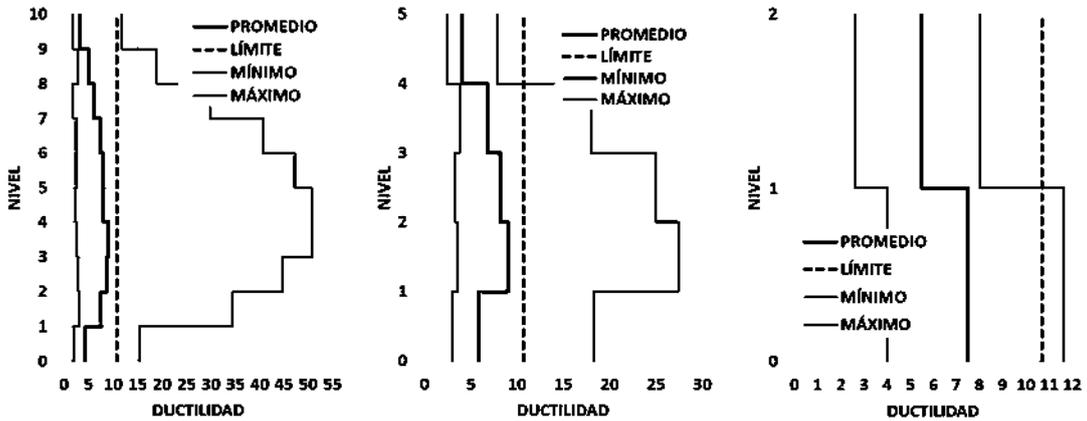


Figura 120. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos PE-10, PE-05 y PE-02.

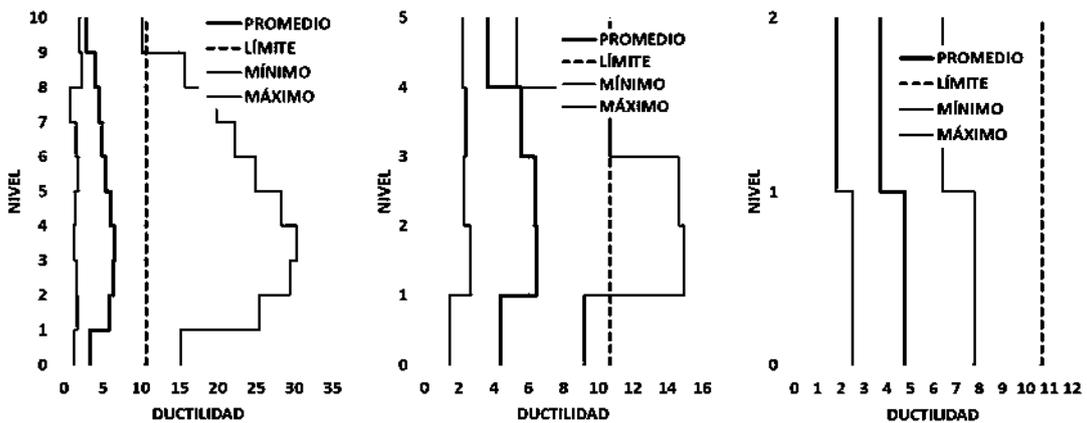


Figura 121. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos SC-10, SC-05 y SC-02.

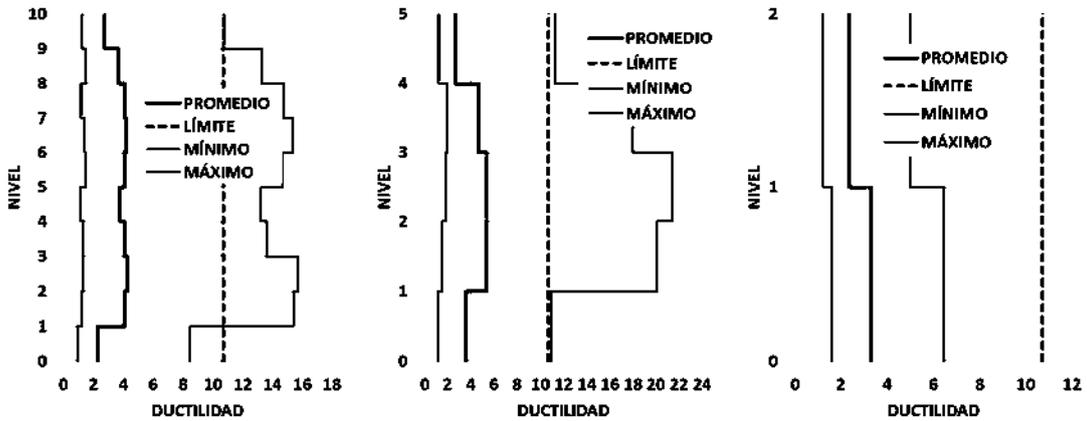


Figura 122. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos OAX-10, OAX-05 y OAX-02.

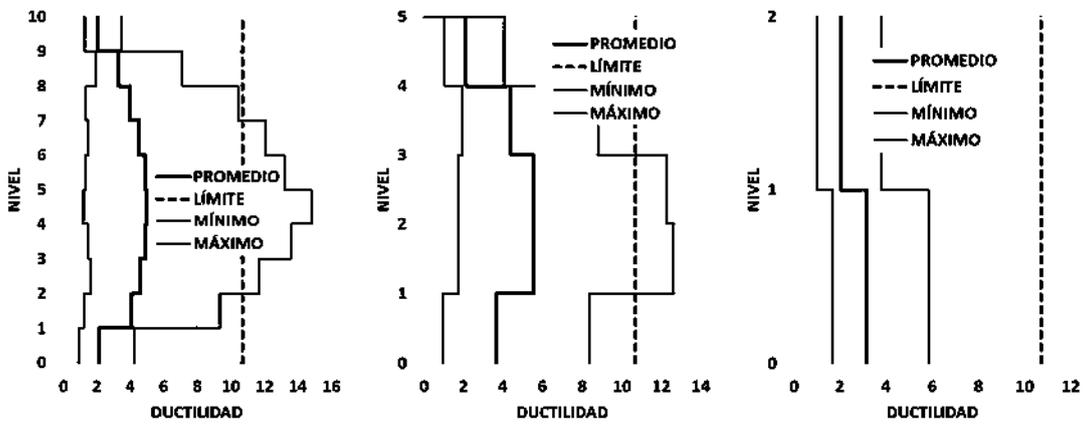


Figura 123. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos HUA-10, HUA-05 y HUA-02.

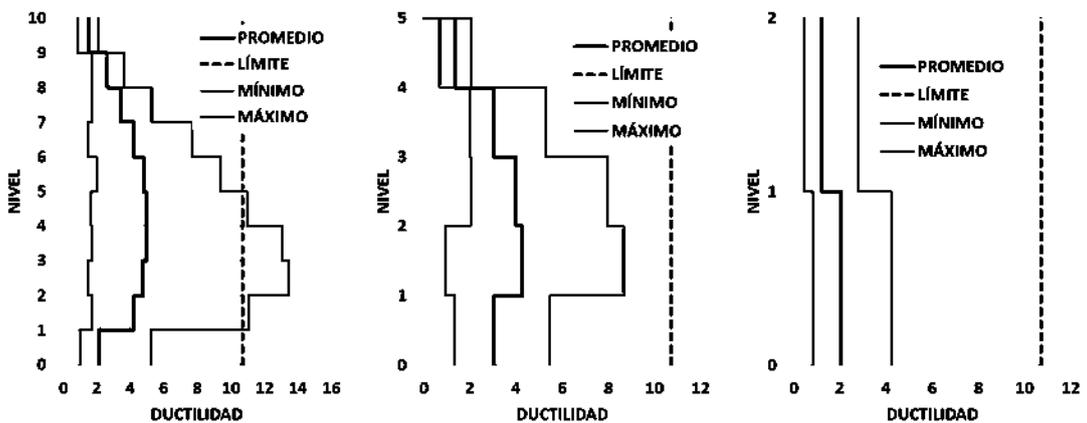


Figura 124. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos TEH-10, TEH-05 y TEH-02.

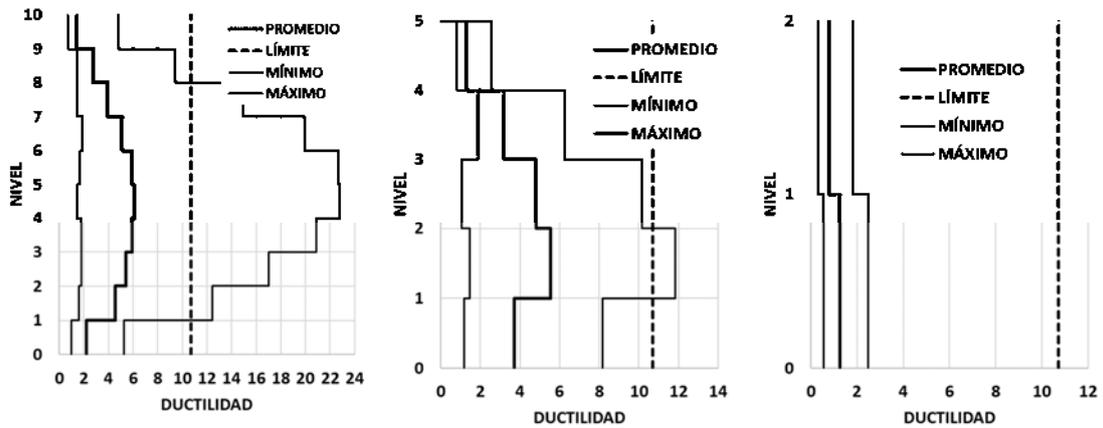


Figura 125. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos PUE-10, PUE-05 y PUE-02.

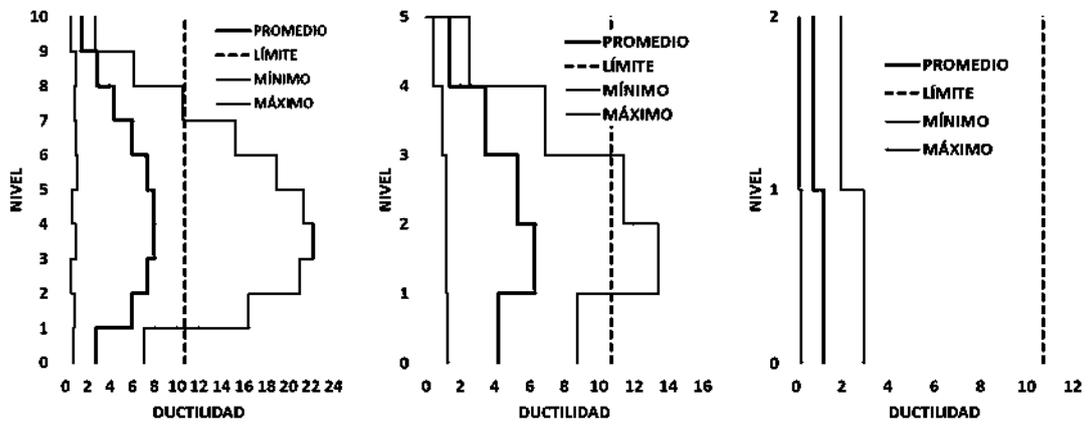


Figura 126. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos COR-10, COR-05 y COR-02.

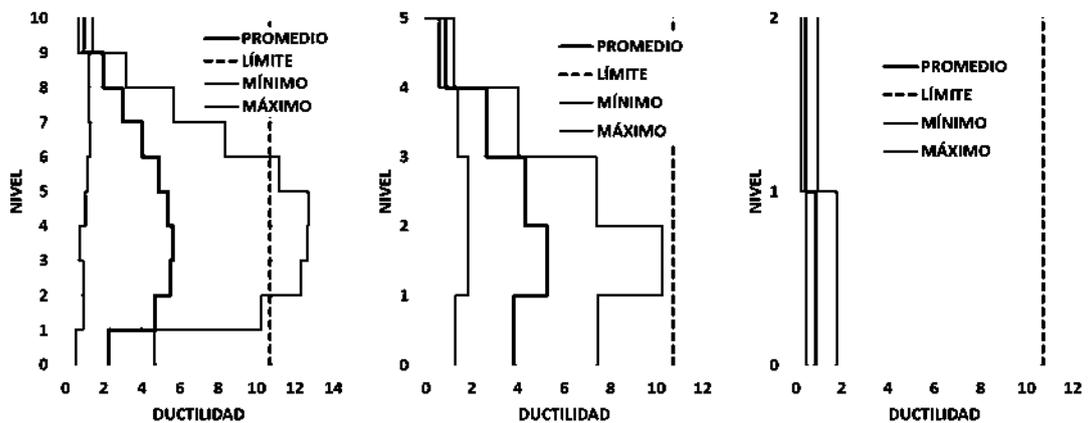


Figura 127. Demanda de ductilidad en disipadores de modelos XAL-10, XAL-05 y XAL-02.



5.8. Demanda de ductilidad en los aisladores.

De la Figura 128 a la Figura 151, se muestra la demanda de ductilidad de los aisladores de base para los diferentes grupos de edificios. Se muestra la mínima demanda, la máxima demanda y el promedio.

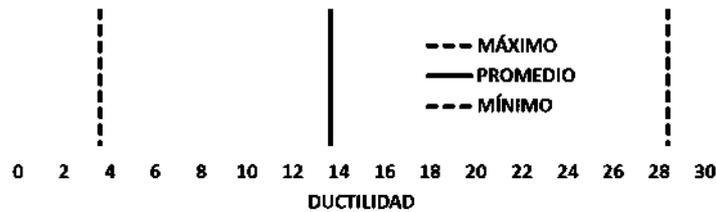


Figura 128. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo PE-10.

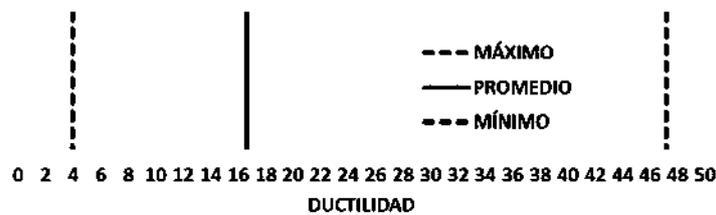


Figura 129. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo PE-05.

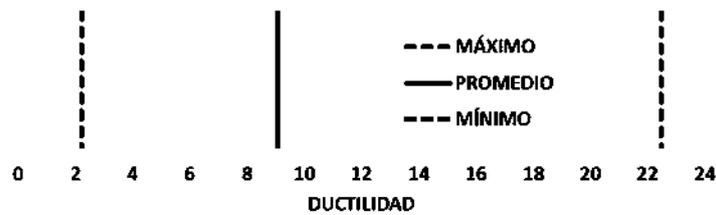


Figura 130. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo PE-02.





Figura 131. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo SC-10.

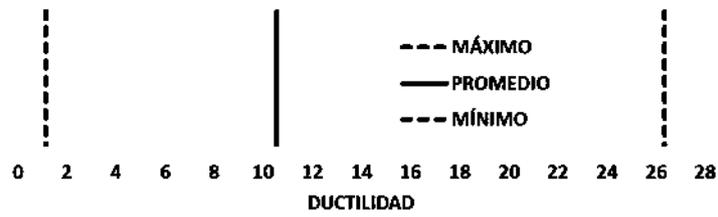


Figura 132. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo SC-05.

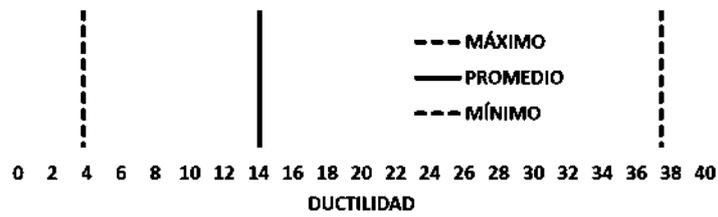


Figura 133. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo SC-02.



Figura 134. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo OAX-10.

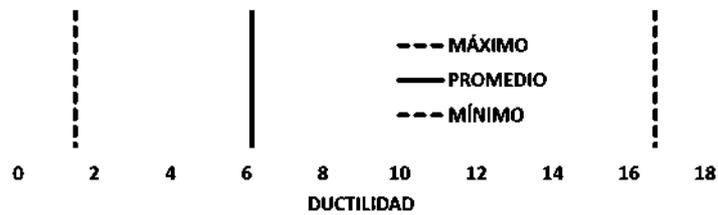


Figura 135. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo OAX-05.



Figura 136. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo OAX-02.



Figura 137. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo HUA-10.

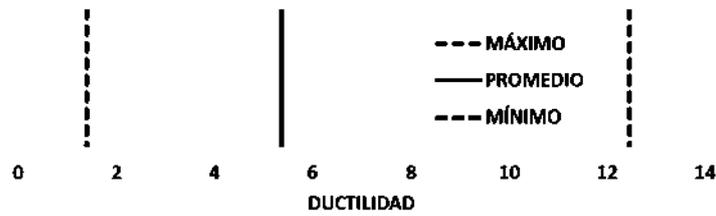


Figura 138. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo HUA-05.



Figura 139. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo HUA-02.



Figura 140. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo TEH-10.

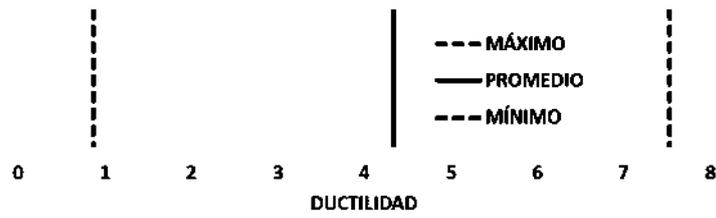


Figura 141. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo TEH-05.



Figura 142. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo TEH-02.



Figura 143. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo PUE-10.



Figura 144. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo PUE-05.



Figura 145. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo PUE-02.



Figura 146. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo COR-10.

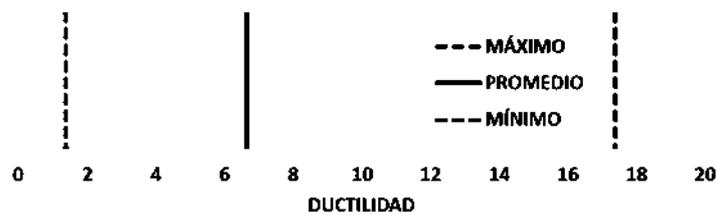


Figura 147. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo COR-05.



Figura 148. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo COR-02.



Figura 149. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo XAL -10.



Figura 150. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo XAL -05.



Figura 151. Demanda de ductilidad en aisladores del modelo XAL-02.



## 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, para cada grupo de edificios, se muestran mediante gráficas, las demandas de cortante basal, de cortante en las columnas, de distorsión de entrepiso, de velocidad de entrepiso y de aceleración de entrepiso. También se muestra, el promedio de la energía de entrada para cada grupo de edificios, y el balance energético para el sismo con menor factor de escala, en dicho balance se muestra como se distribuye la energía de entrada, disipándose mediante los diferentes mecanismos considerados: disipación por deformación, por amortiguamiento Raleigh, disipación por daño en vigas, disipación por daño en columnas, disipación por daño en contravientos, disipación por histéresis en los dispositivos amortiguadores y disipación por histéresis de los aisladores. La energía se encuentra normalizada con respecto a la energía de entrada del sistema de marcos, para cada grupo de edificios.

La Figura 152 muestra la demanda máxima de cortante basal para los diferentes sistemas estructurales estudiados, normalizada con respecto a la demanda en el sistema de marcos.

La Figura 153 izquierda muestra la demanda máxima de cortante únicamente en las columnas de los diferentes sistemas estructurales, normalizadas con respecto a la demanda en el sistema de marcos. La parte inferior de la línea representa el mínimo valor del cociente, la parte superior representa el máximo valor del cociente y la marca representa el promedio.

En la Figura 153 derecha, se muestra la demanda máxima de distorsión de entrepiso de los diferentes sistemas estructurales normalizada con respecto a la demanda en el sistema de marcos. La parte inferior de la línea representa el mínimo valor del cociente, la parte superior representa el máximo valor del cociente y la marca representa el promedio.

En la Figura 154 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** izquierda, se muestra la demanda máxima de velocidad de entrepiso de los diferentes sistemas estructurales normalizada con respecto a la demanda en el sistema de marcos. La parte inferior de la línea representa el mínimo valor del cociente, la parte superior representa el máximo valor del cociente y la marca representa el promedio.

En la Figura 154 derecha, se muestra la demanda máxima de aceleración de entrepiso de los diferentes sistemas estructurales normalizada con respecto a la demanda en el sistema de marcos. La parte inferior de la línea representa el mínimo valor del cociente, la parte superior representa el máximo valor del cociente y la marca representa el promedio.

De la Figura 155 a la Figura 157, se muestra la demanda de energía promedio en los diferentes sistemas estructurales normalizada con respecto a la demanda en el sistema de marcos, y el balance energético mencionado anteriormente.



6.1. Demandas normalizadas grupo G1.

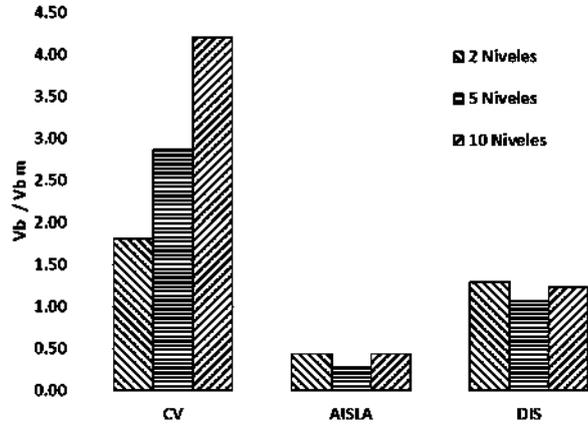


Figura 152. Cortante basal.

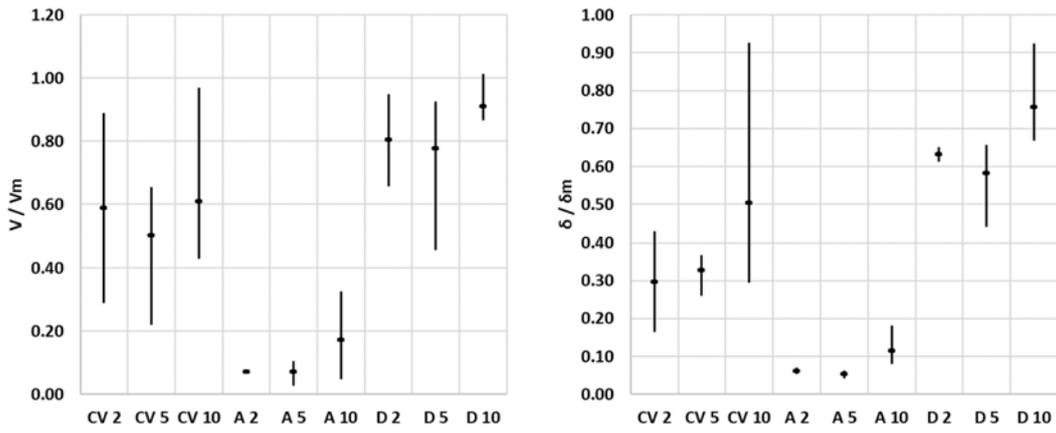


Figura 153. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha).

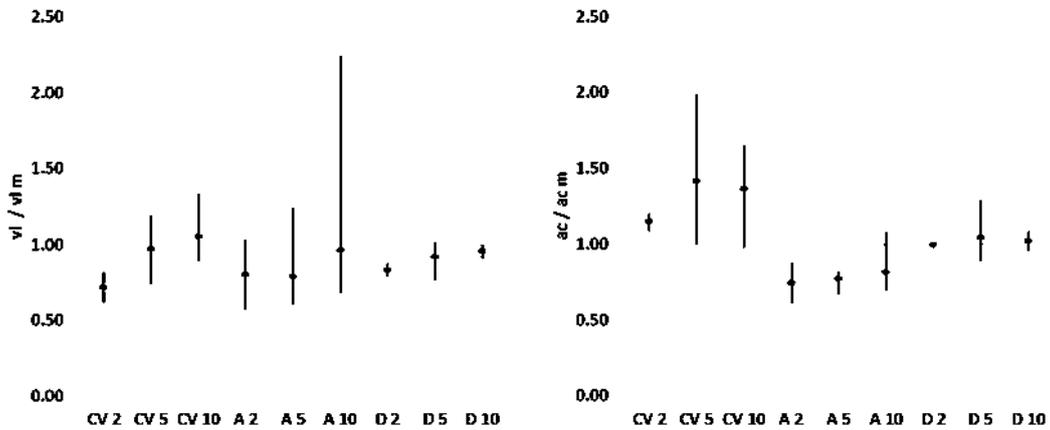


Figura 154. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha).

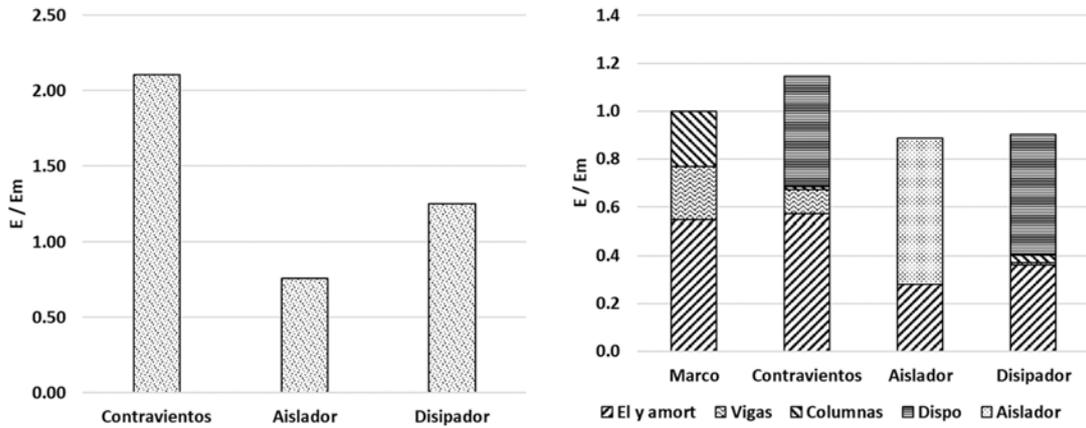


Figura 155. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles.

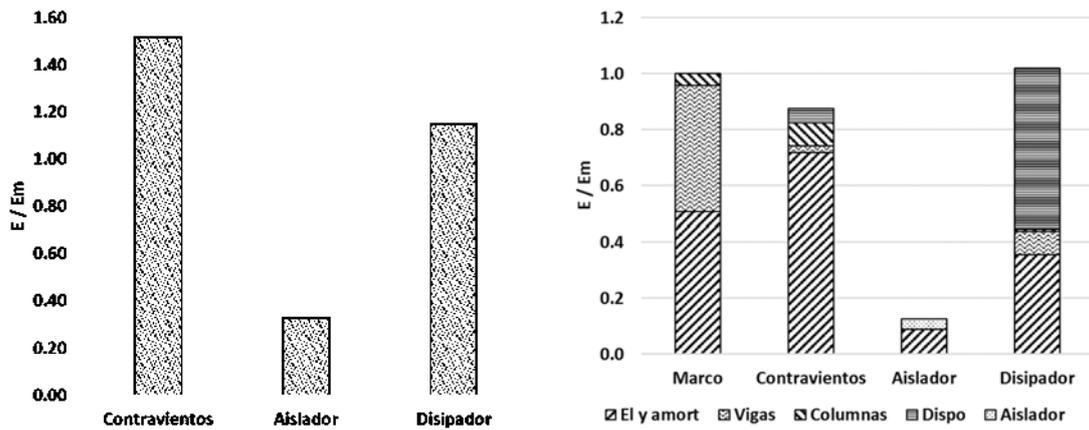


Figura 156. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles.

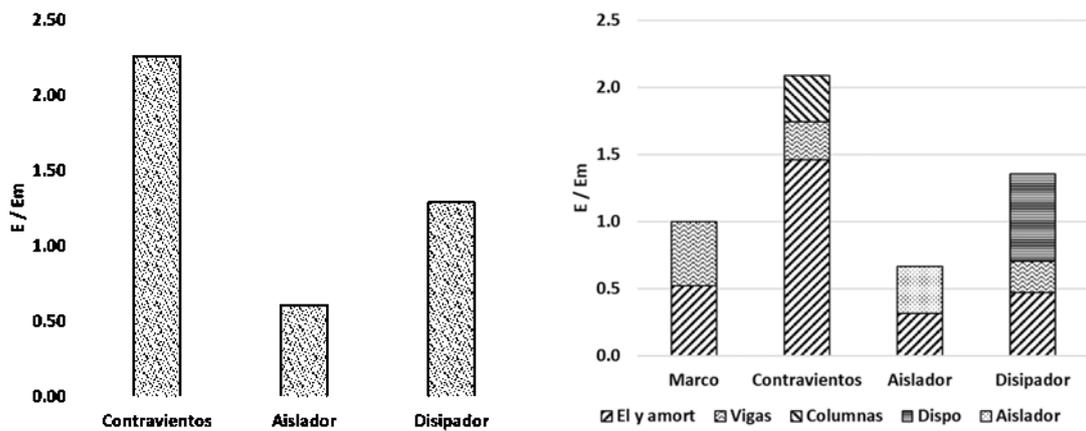


Figura 157. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles.



6.2. Demandas normalizadas grupo G2.

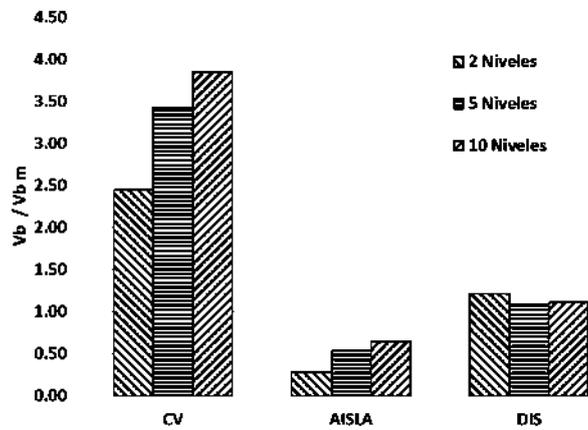


Figura 158. Cortante basal.

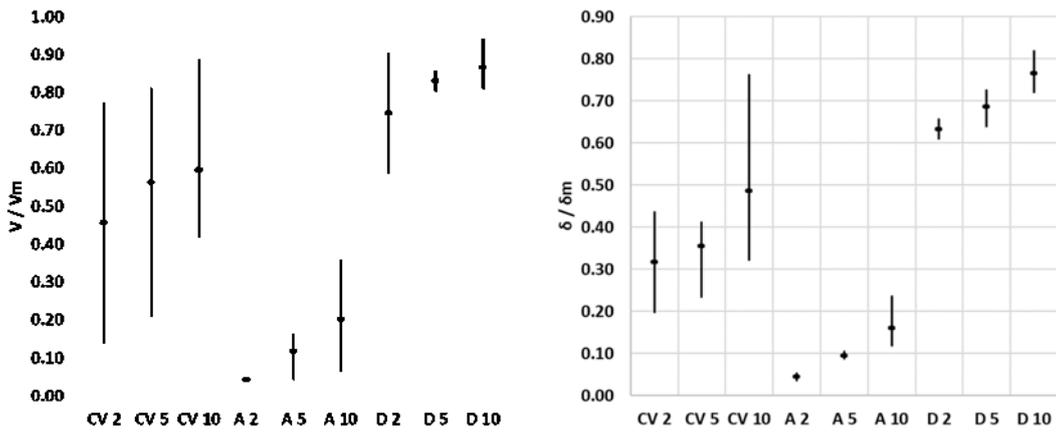


Figura 159. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha).

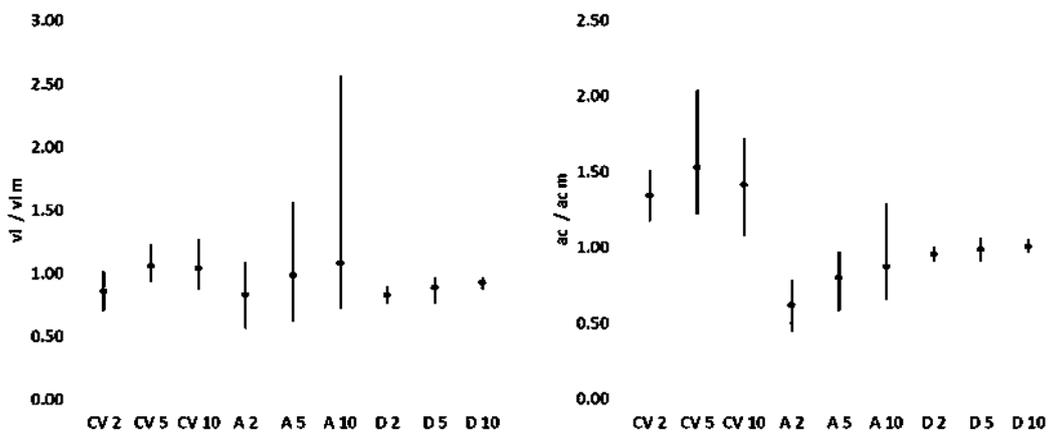


Figura 160. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha).

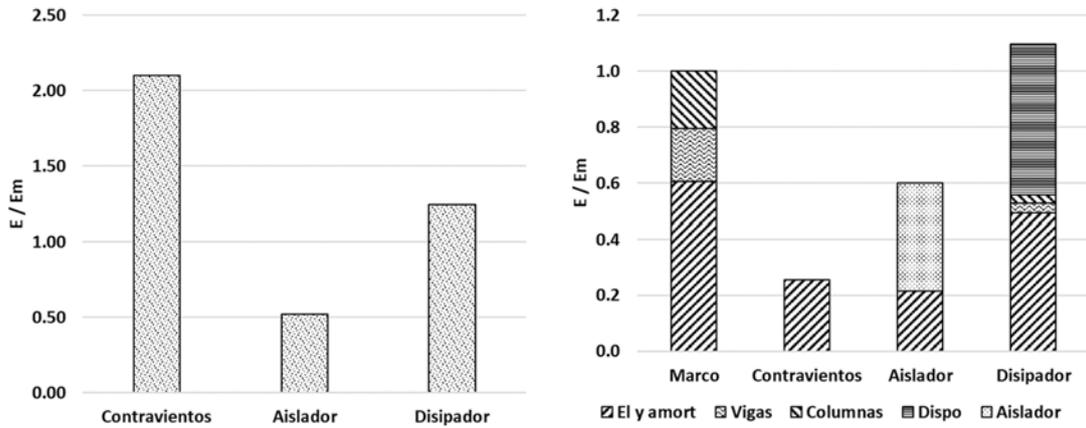


Figura 161. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles.

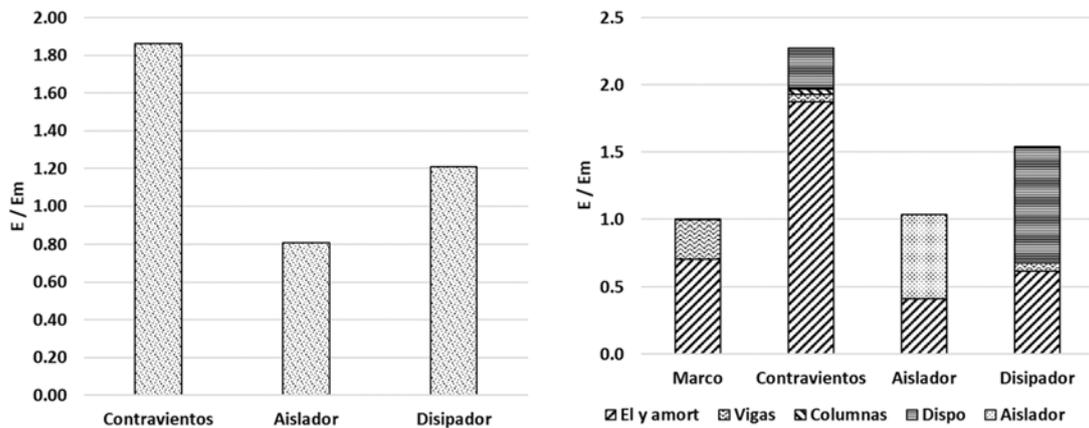


Figura 162. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles.

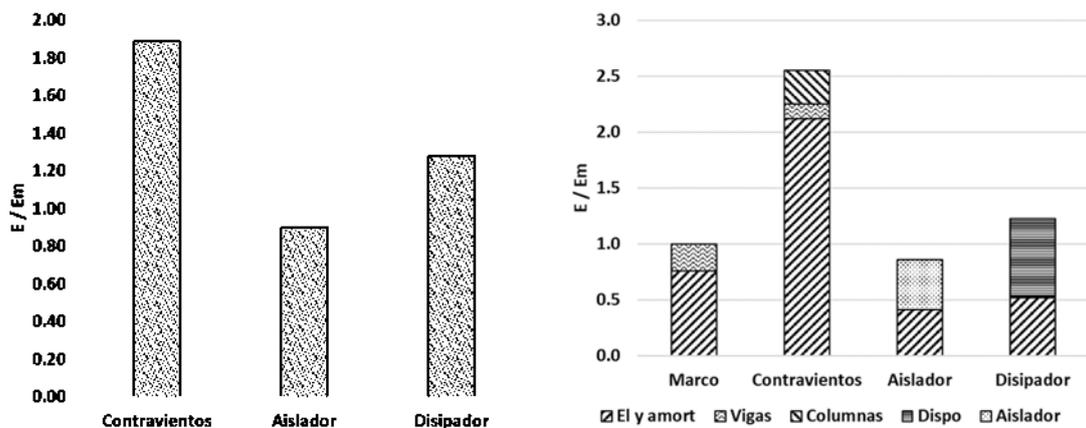


Figura 163. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles.



6.3. Demandas normalizadas grupo G3.

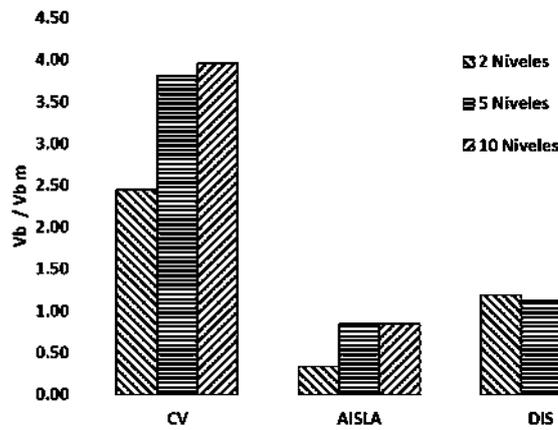


Figura 164. Cortante basal.

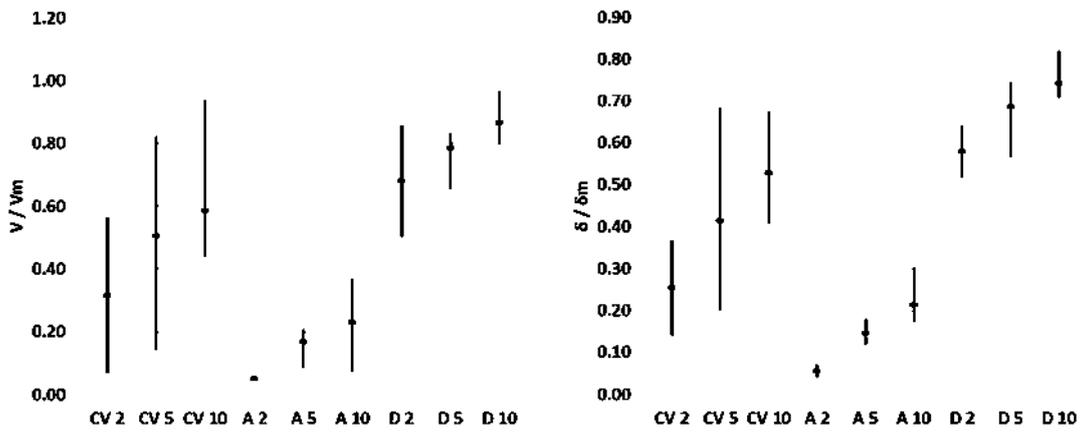


Figura 165. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha).

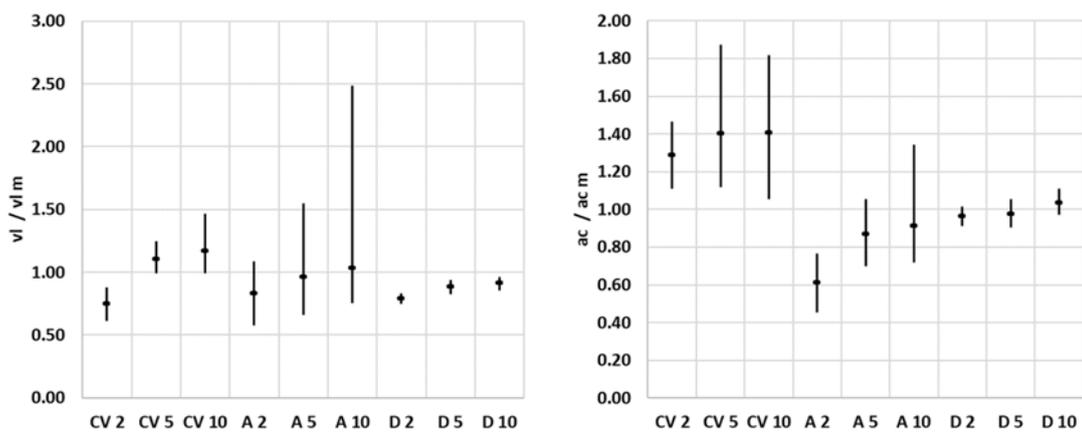


Figura 166. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha).

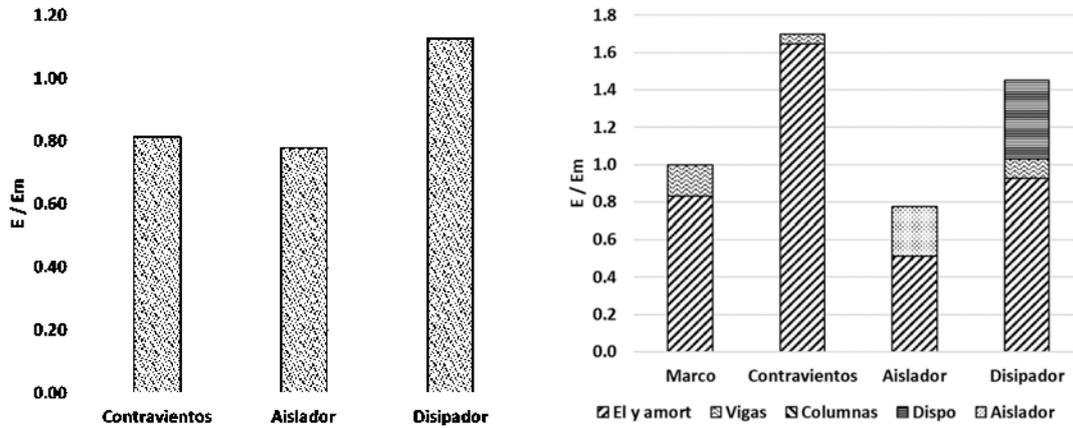


Figura 167. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles.

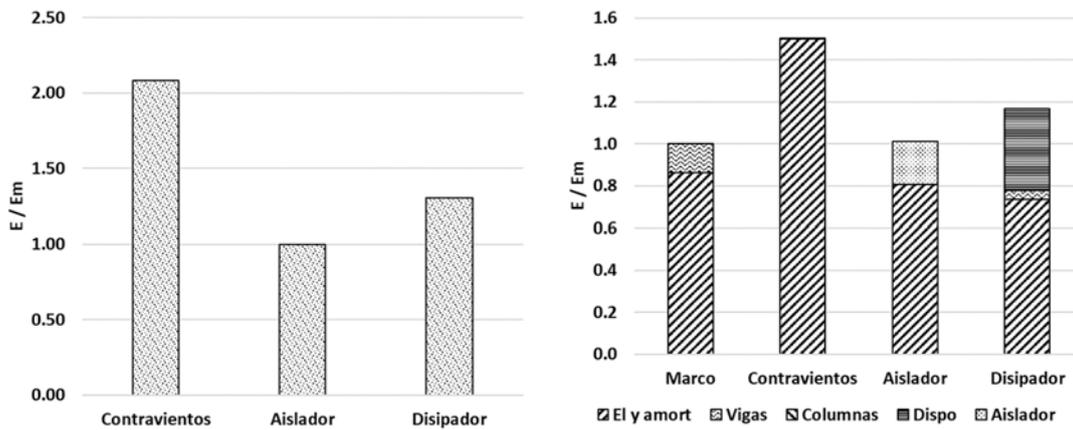


Figura 168. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles.

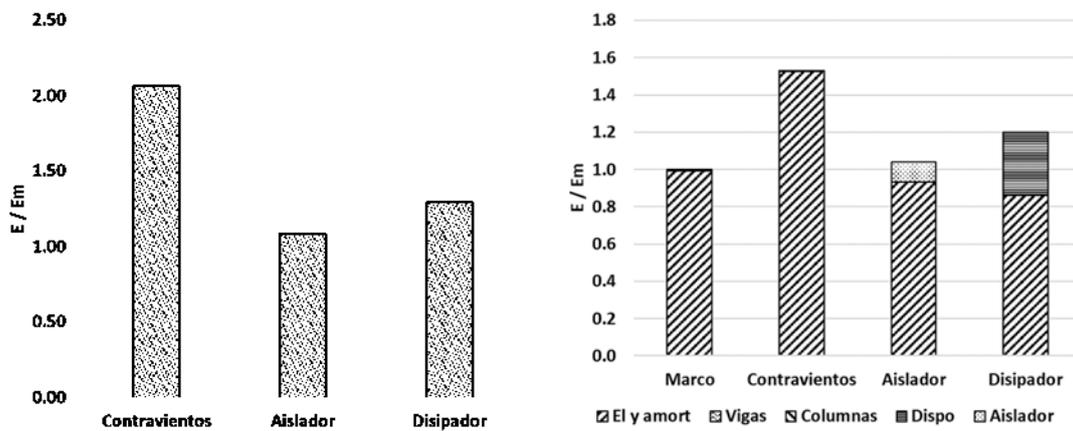


Figura 169. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles.



6.4. Demandas normalizadas grupo G4.

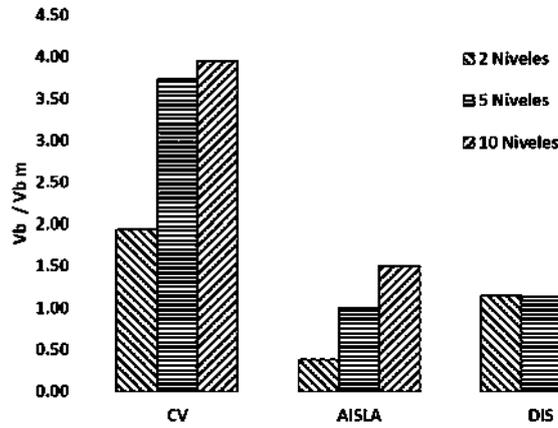


Figura 170. Cortante basal.

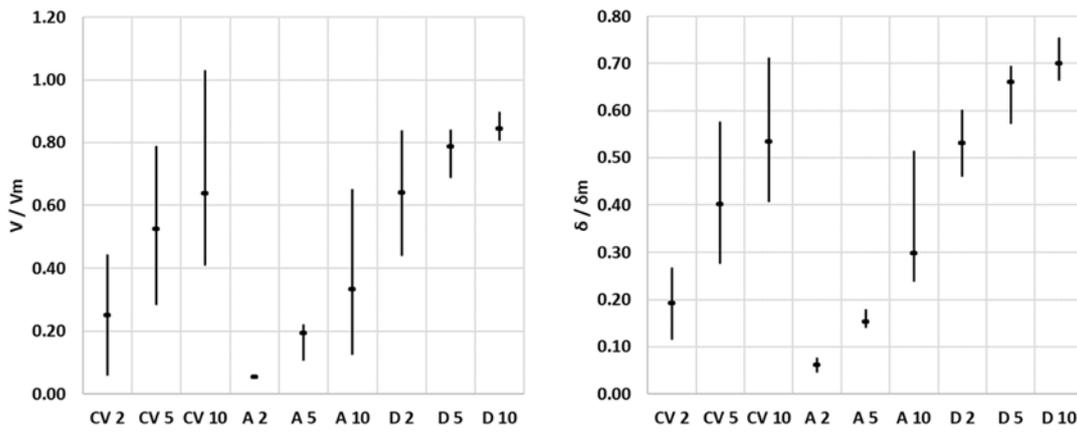


Figura 171. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha).

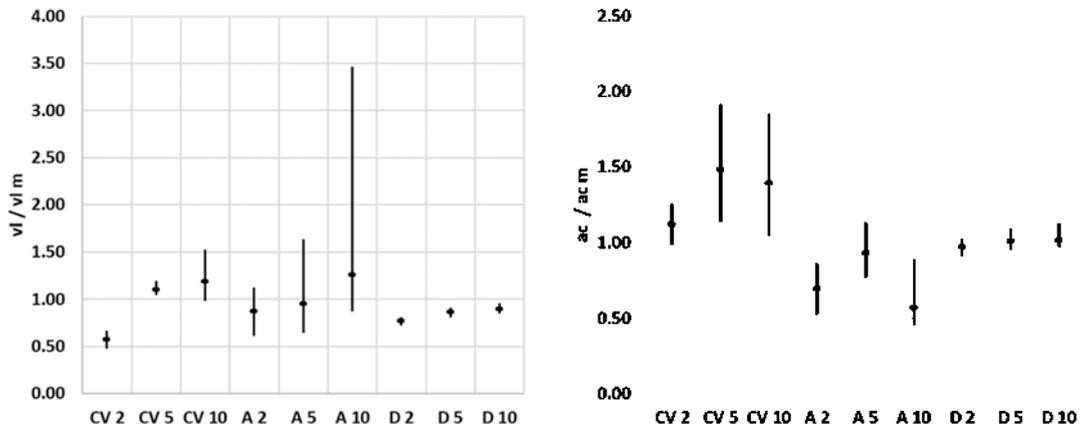


Figura 172. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha).

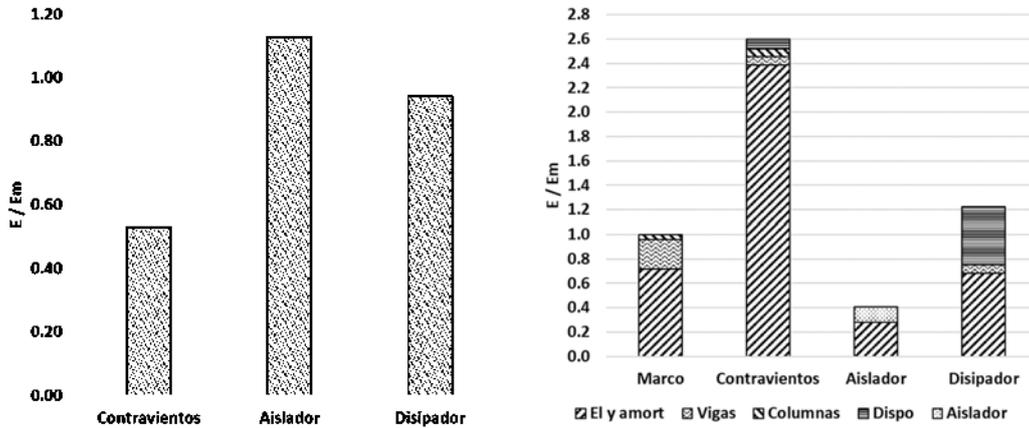


Figura 173. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles.

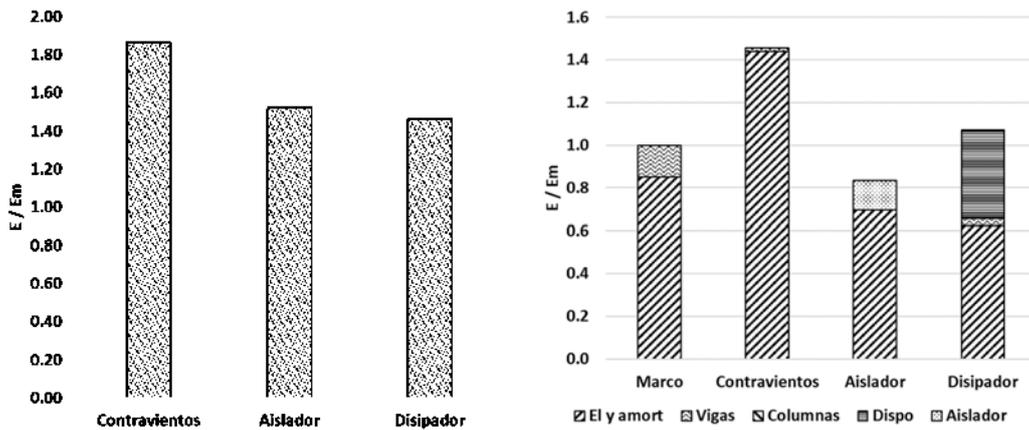


Figura 174. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles.

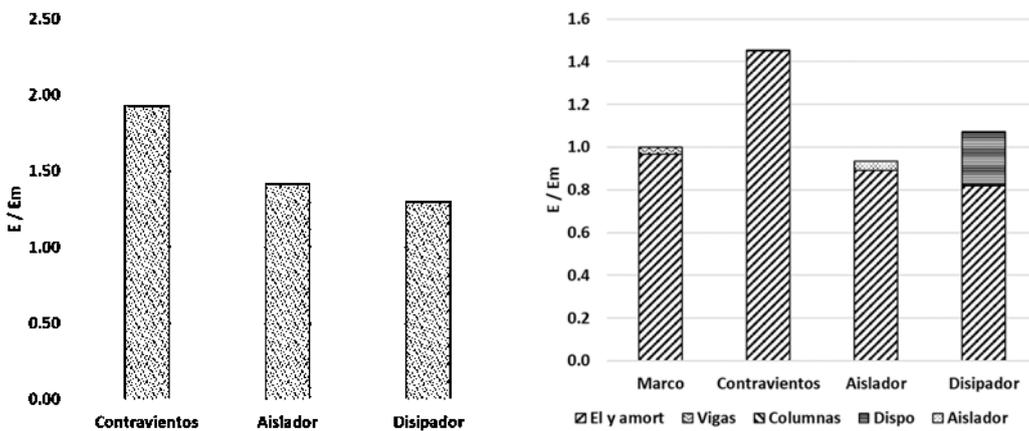


Figura 175. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles.



6.5. Demandas normalizadas grupo G5.

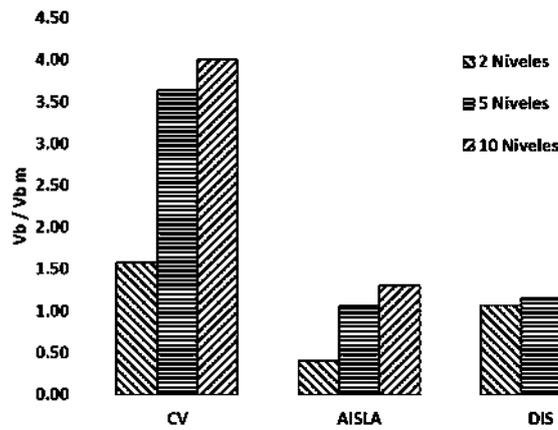


Figura 176. Cortante basal.

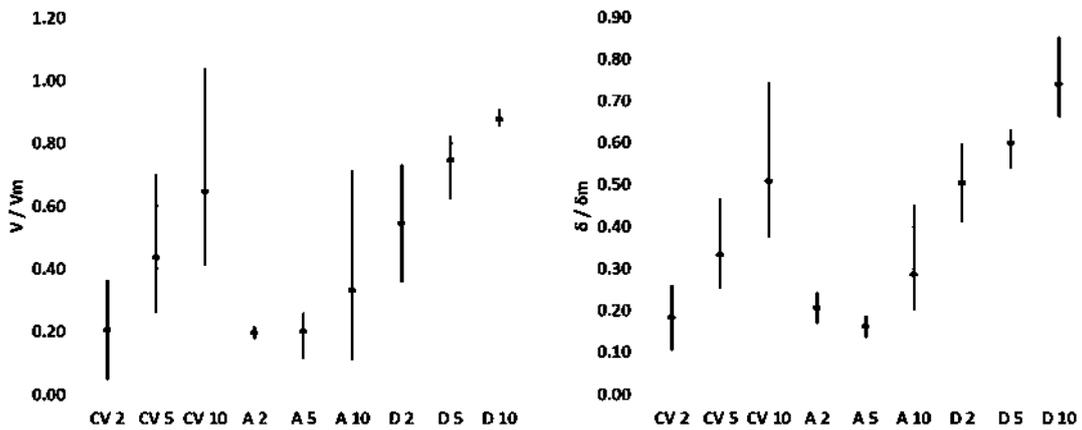


Figura 177. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha).

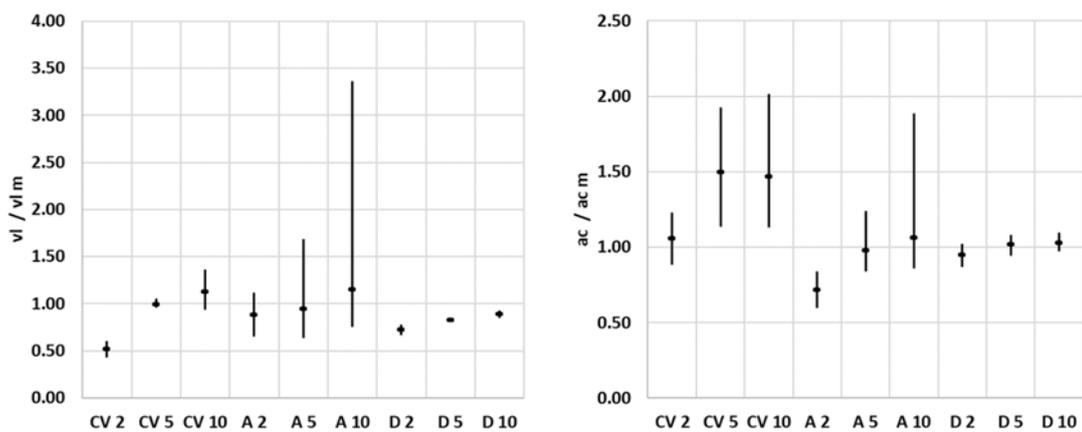


Figura 178. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha).

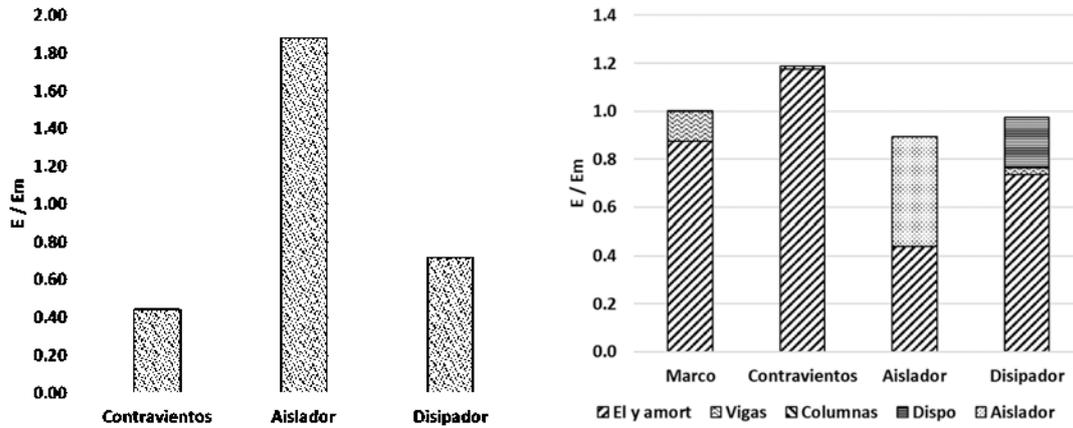


Figura 179. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles.

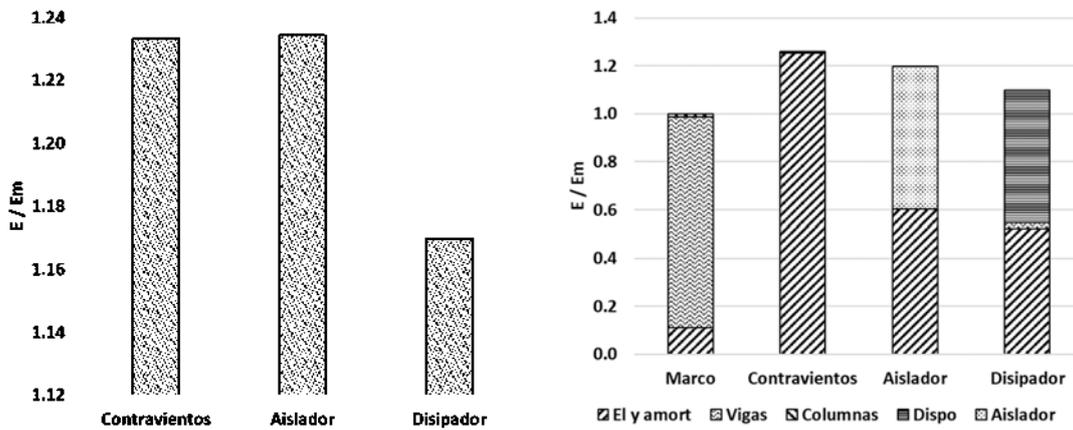


Figura 180. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles.

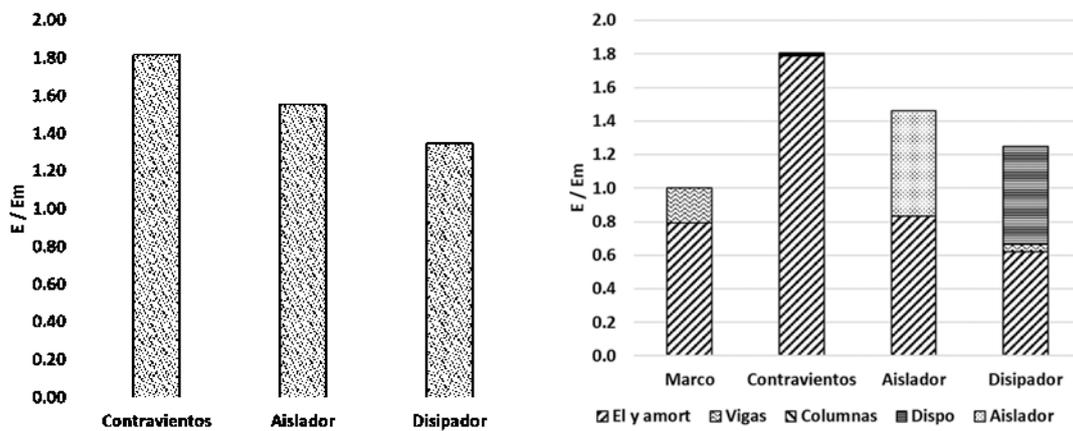


Figura 181. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles.



6.6. Demandas normalizadas grupo G6.

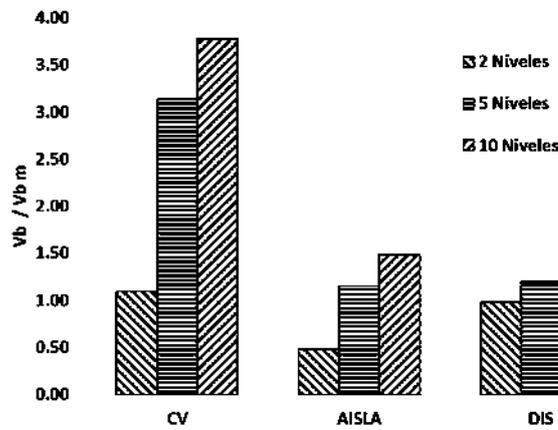


Figura 182. Cortante basal.

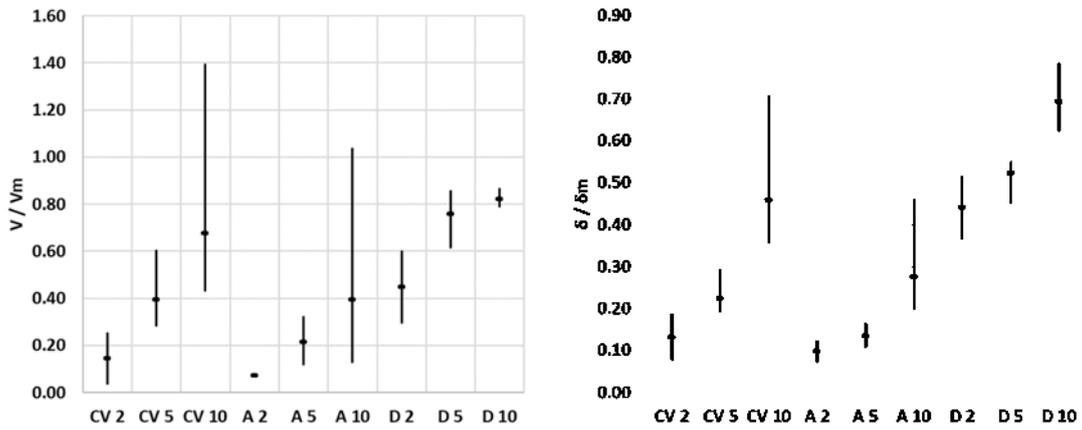


Figura 183. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha).

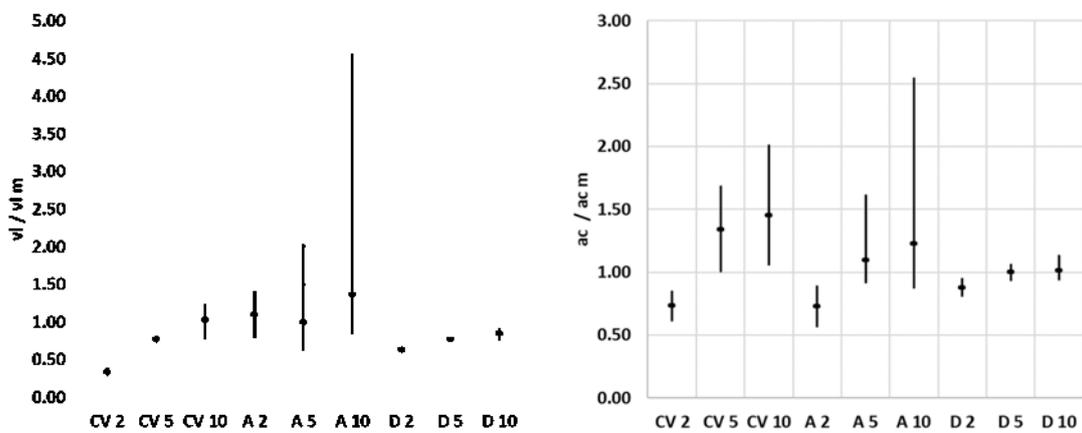


Figura 184. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha).

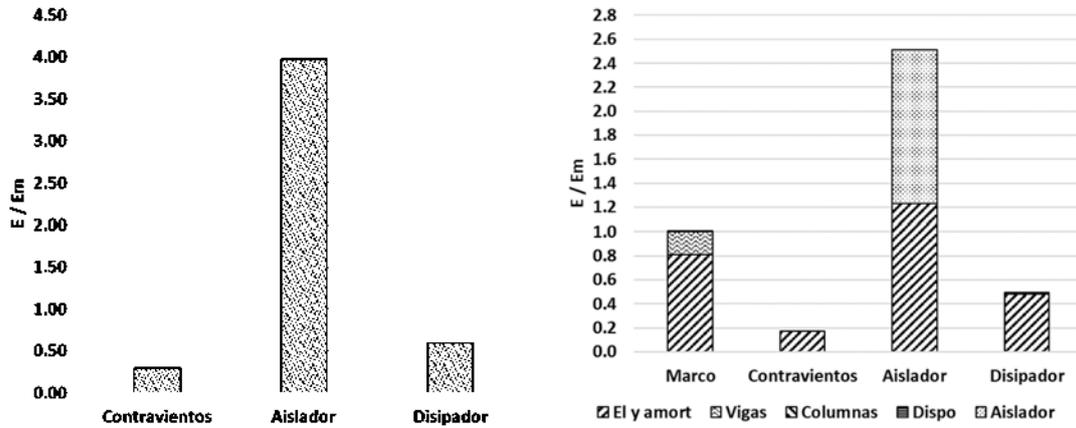


Figura 185. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles.

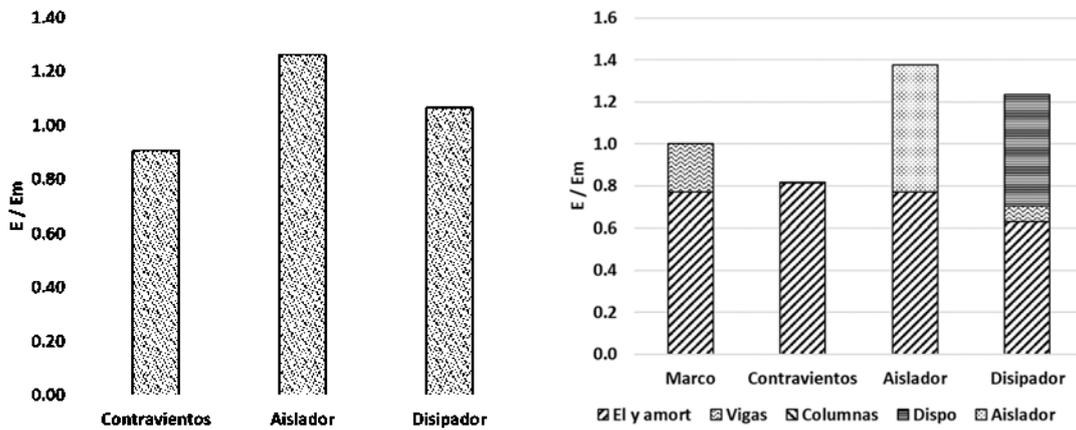


Figura 186. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles.

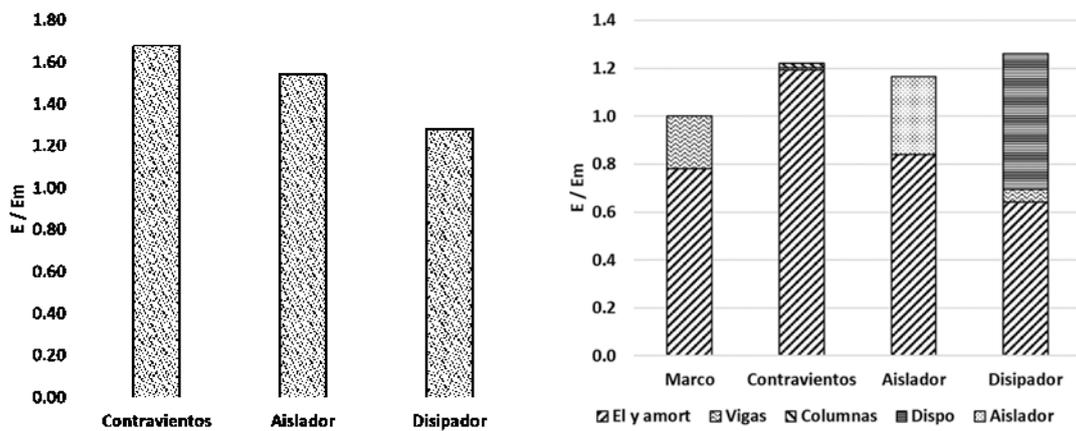


Figura 187. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles.



6.7. Demandas normalizadas grupo G7.

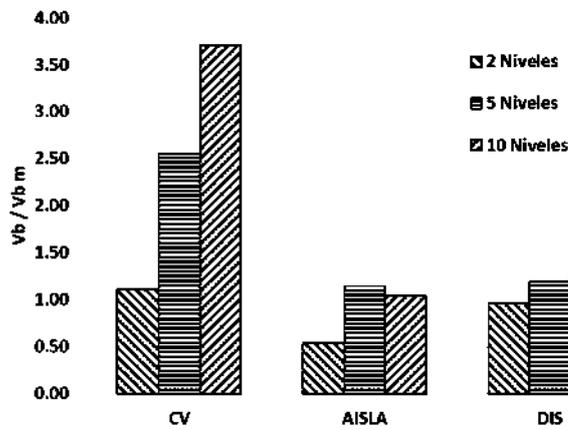


Figura 188. Cortante basal.

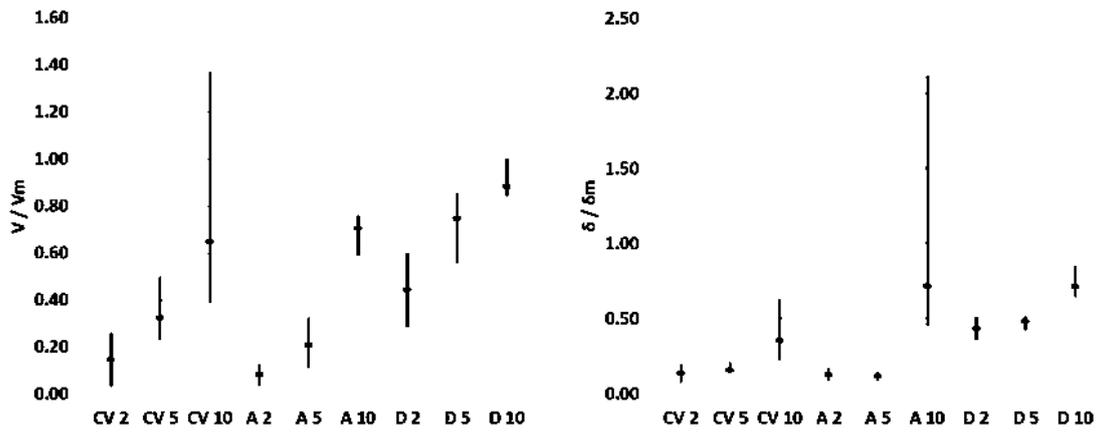


Figura 189. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha).

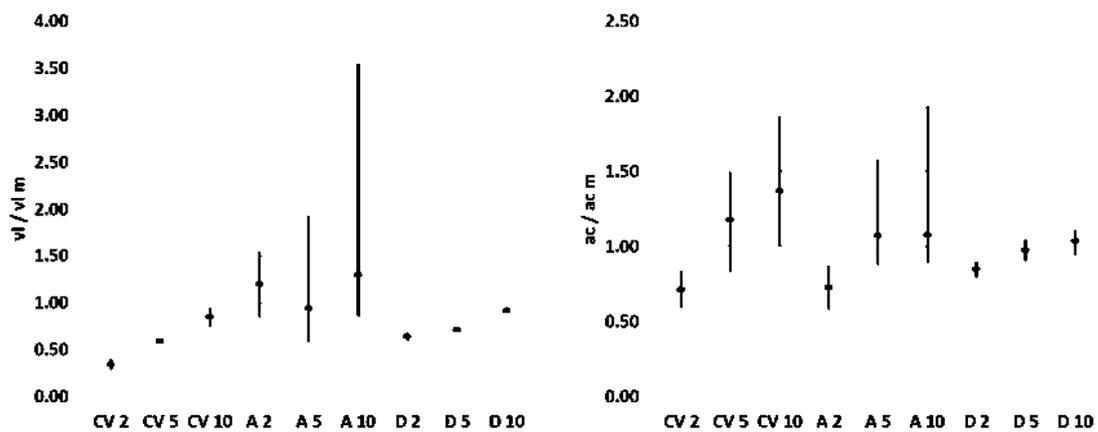


Figura 190. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha).

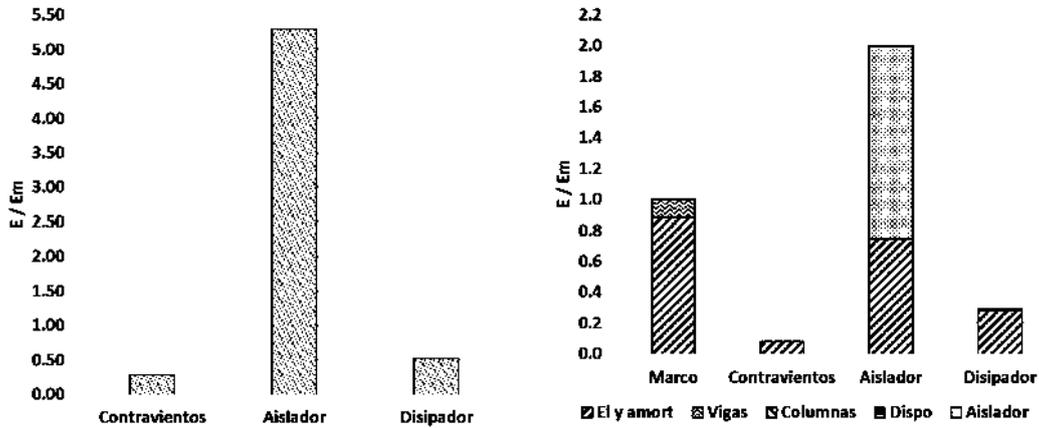


Figura 191. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles.

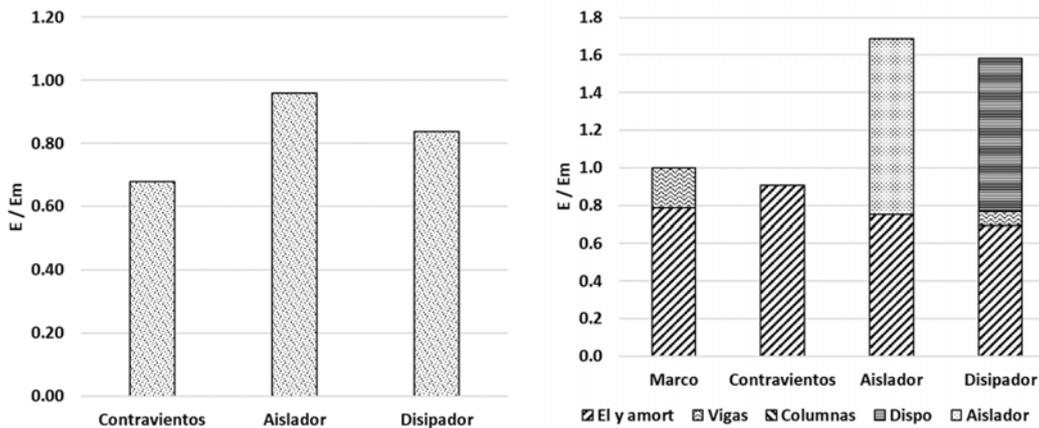


Figura 192. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles.

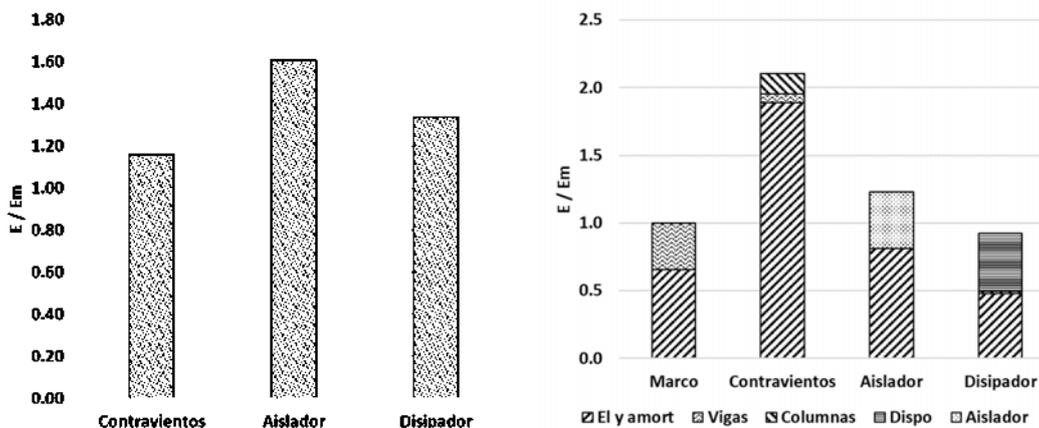


Figura 193. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles.



6.8. Demandas normalizadas grupo G8.

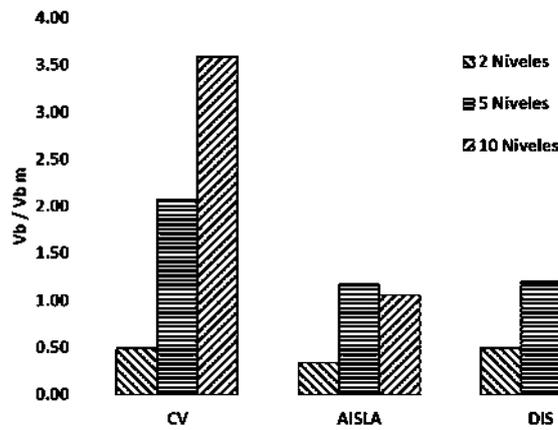


Figura 194. Cortante basal.

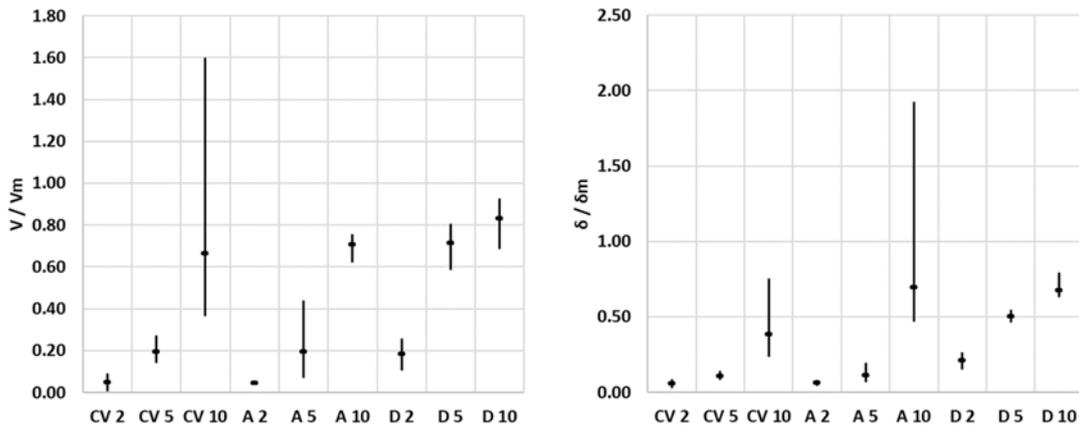


Figura 195. Cortante en columnas (izquierda), distorsión de entrepiso (derecha).

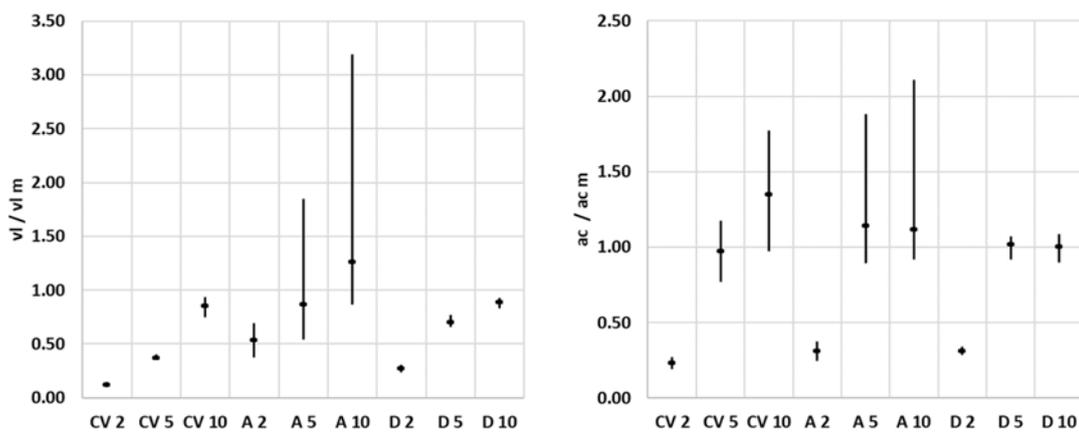


Figura 196. Velocidad de entrepiso (izquierda), aceleración de entrepiso (derecha).

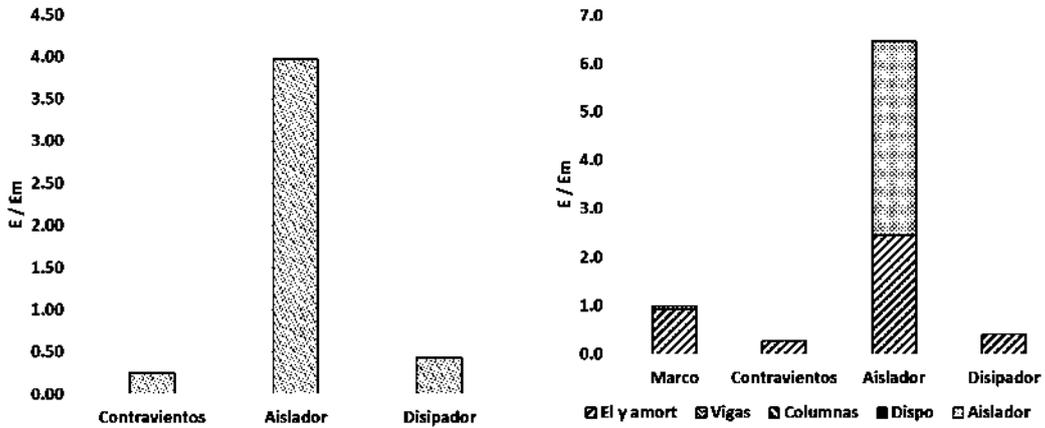


Figura 197. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 2 niveles.

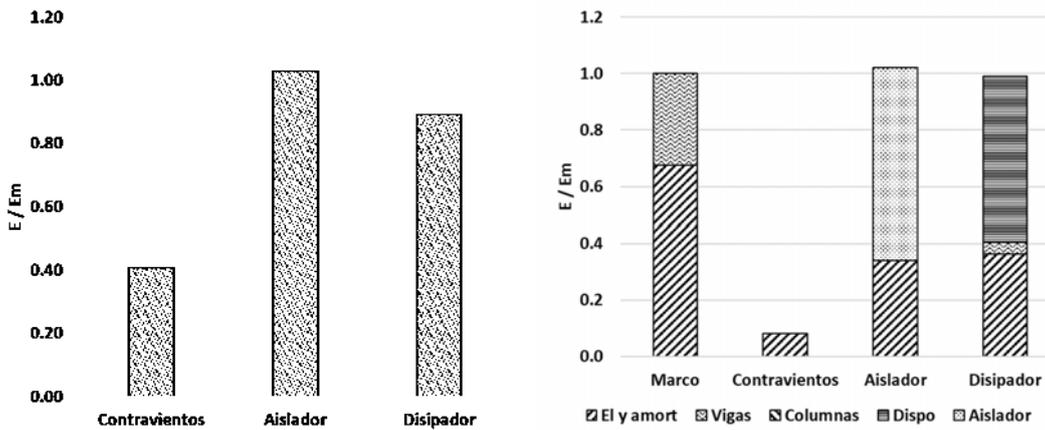


Figura 198. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 5 niveles.

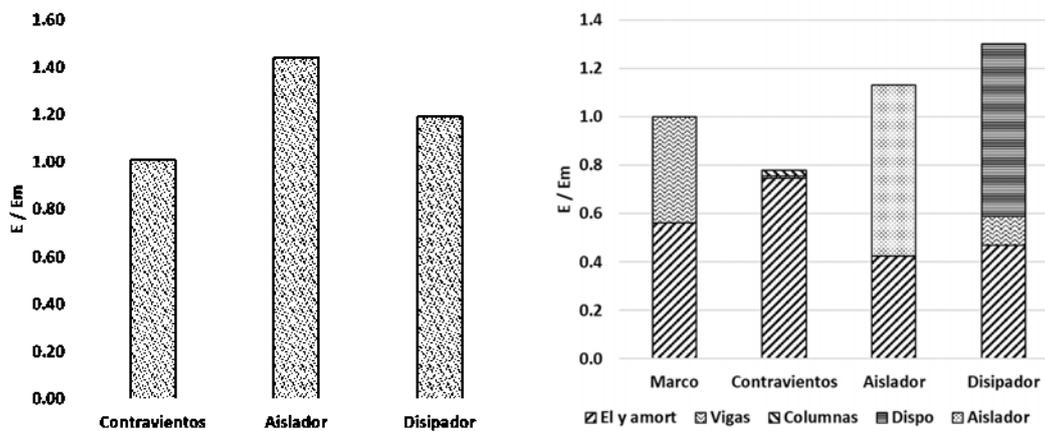


Figura 199. Energía de entrada (izquierda) y balance de energía (derecha) para el edificio de 10 niveles.

### 6.9. Sensibilización sobre los resultados.

A fin de sensibilizar sobre los resultados de los análisis realizados, se presenta en las siguientes tablas las demandas de los diferentes sistemas estructurales, normalizadas con respecto a la demanda del sistema de marcos. En la cuarta columna de la tabla se muestra el valor de  $T/T_{dom}$ , en que  $T$  es el periodo del edificio de control a base de marcos y  $T_{dom}$  es el periodo dominante de la demanda, obtenida como el promedio del periodo para el cual se presenta la ordenada máxima de los espectros de cada grupo. Estos valores son indicativos de la eficiencia en general del sistema elegido por el diseñador.

*Tabla 10. Demanda normalizada para los ocho grupos de edificios*

Orden	Grupo	Niveles	T/Tdom	CORTANTE BASAL			CORTANTE MARCO			DISTORSIÓN			VELOCIDAD			ACELERACIÓN			ENERGÍA DE ENTRADA		
				CV	AISLA	DIS	CV	AISLA	DIS	CV	AISLA	DIS	CV	AISLA	DIS	CV	AISLA	DIS	CV	AISLA	DIS
1	G1	2	2.45	1.82	0.43	1.30	0.59	0.07	0.80	0.30	0.06	0.63	0.72	0.80	0.83	1.14	0.74	1.00	2.10	0.76	1.25
2	G1	5	6.24	2.87	0.27	1.07	0.50	0.07	0.78	0.33	0.05	0.58	0.97	0.79	0.92	1.41	0.77	1.05	1.52	0.33	1.15
3	G1	10	11.36	4.20	0.44	1.23	0.61	0.17	0.91	0.50	0.12	0.76	1.05	0.96	0.96	1.36	0.81	1.02	2.26	0.61	1.29
4	G2	2	1.65	2.44	0.28	1.21	0.46	0.04	0.74	0.32	0.05	0.63	0.86	0.83	0.83	1.34	0.62	0.95	2.10	0.52	1.25
5	G2	5	5.20	3.42	0.53	1.08	0.56	0.12	0.83	0.35	0.10	0.69	1.06	0.98	0.88	1.53	0.80	0.99	1.86	0.81	1.21
6	G2	10	9.03	3.85	0.64	1.11	0.60	0.20	0.87	0.49	0.16	0.77	1.04	1.08	0.92	1.41	0.87	1.01	1.89	0.90	1.28
7	G3	2	1.33	2.45	0.33	1.19	0.32	0.05	0.68	0.25	0.06	0.58	0.75	0.83	0.79	1.29	0.61	0.96	0.81	0.78	1.13
8	G3	5	4.49	3.80	0.85	1.12	0.50	0.17	0.78	0.41	0.15	0.69	1.10	0.96	0.89	1.40	0.87	0.98	2.09	1.00	1.30
9	G3	10	7.91	3.95	0.84	1.16	0.59	0.23	0.86	0.53	0.21	0.74	1.17	1.03	0.92	1.41	0.91	1.04	2.07	1.09	1.30
10	G4	2	1.47	1.93	0.38	1.15	0.25	0.05	0.64	0.19	0.06	0.53	0.57	0.87	0.77	1.12	0.69	0.97	0.53	1.13	0.94
11	G4	5	4.97	3.73	1.00	1.13	0.53	0.19	0.79	0.40	0.15	0.66	1.10	0.95	0.86	1.48	0.93	1.01	1.87	1.52	1.47
12	G4	10	9.60	3.95	1.50	1.08	0.64	0.33	0.84	0.53	0.30	0.70	1.19	1.26	0.90	1.39	0.57	1.02	1.93	1.42	1.30
13	G5	2	1.07	1.58	0.41	1.07	0.21	0.20	0.55	0.18	0.21	0.50	0.51	0.88	0.72	1.06	0.72	0.95	0.44	1.88	0.72
14	G5	5	3.61	3.63	1.06	1.15	0.44	0.20	0.75	0.33	0.16	0.60	0.99	0.94	0.83	1.49	0.98	1.02	1.23	1.23	1.17
15	G5	10	6.98	4.00	1.31	1.18	0.65	0.33	0.88	0.51	0.29	0.74	1.12	1.15	0.89	1.47	1.06	1.03	1.82	1.55	1.35
16	G6	2	0.64	1.10	0.48	0.98	0.14	0.07	0.45	0.13	0.10	0.44	0.34	1.10	0.64	0.73	0.73	0.88	0.29	3.97	0.60
17	G6	5	2.15	3.14	1.15	1.20	0.39	0.21	0.76	0.22	0.14	0.52	0.77	1.00	0.77	1.34	1.10	1.00	0.91	1.26	1.07
18	G6	10	4.16	3.78	1.48	1.14	0.67	0.39	0.82	0.46	0.28	0.69	1.02	1.36	0.85	1.45	1.22	1.01	1.68	1.55	1.28
19	G7	2	0.52	1.11	0.54	0.97	0.15	0.08	0.44	0.14	0.13	0.43	0.34	1.20	0.64	0.71	0.73	0.85	0.28	5.30	0.53
20	G7	5	1.76	2.56	1.15	1.19	0.32	0.21	0.75	0.16	0.12	0.48	0.60	0.94	0.71	1.18	1.07	0.97	0.68	0.96	0.84
21	G7	10	3.41	3.71	1.04	1.29	0.64	0.71	0.88	0.35	0.72	0.71	0.85	1.30	0.92	1.37	1.08	1.04	1.16	1.61	1.34
22	G8	2	0.52	0.49	0.34	0.49	0.05	0.04	0.18	0.06	0.06	0.21	0.12	0.53	0.27	0.23	0.31	0.31	0.25	3.97	0.43
23	G8	5	1.76	2.07	1.17	1.20	0.19	0.19	0.71	0.11	0.11	0.50	0.37	0.87	0.70	0.97	1.14	1.02	0.41	1.03	0.89
24	G8	10	3.41	3.59	1.06	1.23	0.66	0.71	0.83	0.38	0.70	0.67	0.85	1.26	0.88	1.35	1.11	1.00	1.01	1.44	1.19

Los valores inferiores a uno implican una reducción de la demanda con respecto al edificio de marcos y los valores superiores a uno implican un incremento en la demanda con respecto al edificio de control.

Para facilitar el análisis de los datos, en la Tabla 11, se aplica una escala de color, de forma que el menor valor de cada columna, es verde sólido y el mayor rojo sólido. En la Tabla 12 se muestran los datos ordenados con respecto al valor de  $T/T_{dom}$ .



Tabla 11. Demanda normalizada para los ocho grupos de edificios, aplicando escala de color

Orden	Grupo	Niveles	T/Tdom	CORTANTE BASAL			CORTANTE MARCO			DISTORSIÓN			VELOCIDAD			ACELERACIÓN			ENERGÍA DE ENTRADA		
				CV	AISLA	DIS	CV	AISLA	DIS	CV	AISLA	DIS	CV	AISLA	DIS	CV	AISLA	DIS	CV	AISLA	DIS
1	1	2	2.45	1.82	0.43	1.30	0.59	0.07	0.80	0.30	0.06	0.63	0.72	0.80	0.83	1.14	0.74	1.00	2.10	0.76	1.25
2	1	5	6.24	2.87	0.27	1.07	0.50	0.07	0.78	0.33	0.05	0.58	0.97	0.79	0.92	1.41	0.77	1.05	1.52	0.33	1.15
3	1	10	11.36	4.20	0.44	1.23	0.61	0.17	0.91	0.50	0.12	0.76	1.05	0.96	0.96	1.36	0.81	1.02	2.26	0.61	1.29
4	2	2	1.65	2.44	0.28	1.21	0.46	0.04	0.74	0.32	0.05	0.63	0.86	0.83	0.83	1.34	0.62	0.95	2.10	0.52	1.25
5	2	5	5.20	3.42	0.53	1.08	0.56	0.12	0.83	0.35	0.10	0.69	1.06	0.98	0.88	1.53	0.80	0.99	1.86	0.81	1.21
6	2	10	9.03	3.85	0.64	1.11	0.60	0.20	0.87	0.49	0.16	0.77	1.04	1.08	0.92	1.41	0.87	1.01	1.89	0.90	1.28
7	3	2	1.33	2.45	0.33	1.19	0.32	0.05	0.68	0.25	0.06	0.58	0.75	0.83	0.79	1.29	0.61	0.96	0.81	0.78	1.13
8	3	5	4.49	3.80	0.85	1.12	0.50	0.17	0.78	0.41	0.15	0.69	1.10	0.96	0.89	1.40	0.87	0.98	2.09	1.00	1.30
9	3	10	7.91	3.95	0.84	1.16	0.59	0.23	0.86	0.53	0.21	0.74	1.17	1.03	0.92	1.41	0.91	1.04	2.07	1.09	1.30
10	4	2	1.47	1.93	0.38	1.15	0.25	0.05	0.64	0.19	0.06	0.53	0.57	0.87	0.77	1.12	0.69	0.97	0.53	1.13	0.94
11	4	5	4.97	3.73	1.00	1.13	0.53	0.19	0.79	0.40	0.15	0.66	1.10	0.95	0.86	1.48	0.93	1.01	1.87	1.52	1.47
12	4	10	9.60	3.95	1.50	1.08	0.64	0.33	0.84	0.53	0.30	0.70	1.19	1.26	0.90	1.39	0.57	1.02	1.93	1.42	1.30
13	5	2	1.07	1.58	0.41	1.07	0.21	0.20	0.55	0.18	0.21	0.50	0.51	0.88	0.72	1.06	0.72	0.95	0.44	1.88	0.72
14	5	5	3.61	3.63	1.06	1.15	0.44	0.20	0.75	0.33	0.16	0.60	0.99	0.94	0.83	1.49	0.98	1.02	1.23	1.23	1.17
15	5	10	6.98	4.00	1.31	1.18	0.65	0.33	0.88	0.51	0.29	0.74	1.12	1.15	0.89	1.47	1.06	1.03	1.82	1.55	1.35
16	6	2	0.64	1.10	0.48	0.98	0.14	0.07	0.45	0.13	0.10	0.44	0.34	1.10	0.64	0.73	0.73	0.88	0.29	3.97	0.60
17	6	5	2.15	3.14	1.15	1.20	0.39	0.21	0.76	0.22	0.14	0.52	0.77	1.00	0.77	1.34	1.10	1.00	0.91	1.26	1.07
18	6	10	4.16	3.78	1.48	1.14	0.67	0.39	0.82	0.46	0.28	0.69	1.02	1.36	0.85	1.45	1.22	1.01	1.68	1.55	1.28
19	7	2	0.52	1.11	0.54	0.97	0.15	0.08	0.44	0.14	0.13	0.43	0.34	1.20	0.64	0.71	0.73	0.85	0.28	5.30	0.53
20	7	5	1.76	2.56	1.15	1.19	0.32	0.21	0.75	0.16	0.12	0.48	0.60	0.94	0.71	1.18	1.07	0.97	0.68	0.96	0.84
21	7	10	3.41	3.71	1.04	1.29	0.64	0.71	0.88	0.35	0.72	0.71	0.85	1.30	0.92	1.37	1.08	1.04	1.16	1.61	1.34
22	8	2	0.52	0.49	0.34	0.49	0.05	0.04	0.18	0.06	0.06	0.21	0.12	0.53	0.27	0.23	0.31	0.31	0.25	3.97	0.43
23	8	5	1.76	2.07	1.17	1.20	0.19	0.19	0.71	0.11	0.11	0.50	0.37	0.87	0.70	0.97	1.14	1.02	0.41	1.03	0.89
24	8	10	3.41	3.59	1.06	1.23	0.66	0.71	0.83	0.38	0.70	0.67	0.85	1.26	0.88	1.35	1.11	1.00	1.01	1.44	1.19

Tabla 12. Demanda normalizada para los ocho grupos de edificios, ordenados con respecto a T/Tdom

Orden	Grupo	Niveles	T/Tdom	CORTANTE BASAL			CORTANTE MARCO			DISTORSIÓN			VELOCIDAD			ACELERACIÓN			ENERGÍA DE ENTRADA		
				CV	AISLA	DIS	CV	AISLA	DIS	CV	AISLA	DIS	CV	AISLA	DIS	CV	AISLA	DIS	CV	AISLA	DIS
19	7	2	0.52	1.11	0.54	0.97	0.15	0.08	0.44	0.14	0.13	0.43	0.34	1.20	0.64	0.71	0.73	0.85	0.28	5.30	0.53
22	8	2	0.52	0.49	0.34	0.49	0.05	0.04	0.18	0.06	0.06	0.21	0.12	0.53	0.27	0.23	0.31	0.31	0.25	3.97	0.43
16	6	2	0.64	1.10	0.48	0.98	0.14	0.07	0.45	0.13	0.10	0.44	0.34	1.10	0.64	0.73	0.73	0.88	0.29	3.97	0.60
13	5	2	1.07	1.58	0.41	1.07	0.21	0.20	0.55	0.18	0.21	0.50	0.51	0.88	0.72	1.06	0.72	0.95	0.44	1.88	0.72
7	3	2	1.33	2.45	0.33	1.19	0.32	0.05	0.68	0.25	0.06	0.58	0.75	0.83	0.79	1.29	0.61	0.96	0.81	0.78	1.13
10	4	2	1.47	1.93	0.38	1.15	0.25	0.05	0.64	0.19	0.06	0.53	0.57	0.87	0.77	1.12	0.69	0.97	0.53	1.13	0.94
4	2	2	1.65	2.44	0.28	1.21	0.46	0.04	0.74	0.32	0.05	0.63	0.86	0.83	0.83	1.34	0.62	0.95	2.10	0.52	1.25
20	7	5	1.76	2.56	1.15	1.19	0.32	0.21	0.75	0.16	0.12	0.48	0.60	0.94	0.71	1.18	1.07	0.97	0.68	0.96	0.84
23	8	5	1.76	2.07	1.17	1.20	0.19	0.19	0.71	0.11	0.11	0.50	0.37	0.87	0.70	0.97	1.14	1.02	0.41	1.03	0.89
17	6	5	2.15	3.14	1.15	1.20	0.39	0.21	0.76	0.22	0.14	0.52	0.77	1.00	0.77	1.34	1.10	1.00	0.91	1.26	1.07
1	1	2	2.45	1.82	0.43	1.30	0.59	0.07	0.80	0.30	0.06	0.63	0.72	0.80	0.83	1.14	0.74	1.00	2.10	0.76	1.25
21	7	10	3.41	3.71	1.04	1.29	0.64	0.71	0.88	0.35	0.72	0.71	0.85	1.30	0.92	1.37	1.08	1.04	1.16	1.61	1.34
24	8	10	3.41	3.59	1.06	1.23	0.66	0.71	0.83	0.38	0.70	0.67	0.85	1.26	0.88	1.35	1.11	1.00	1.01	1.44	1.19
14	5	5	3.61	3.63	1.06	1.15	0.44	0.20	0.75	0.33	0.16	0.60	0.99	0.94	0.83	1.49	0.98	1.02	1.23	1.23	1.17
18	6	10	4.16	3.78	1.48	1.14	0.67	0.39	0.82	0.46	0.28	0.69	1.02	1.36	0.85	1.45	1.22	1.01	1.68	1.55	1.28
8	3	5	4.49	3.80	0.85	1.12	0.50	0.17	0.78	0.41	0.15	0.69	1.10	0.96	0.89	1.40	0.87	0.98	2.09	1.00	1.30
11	4	5	4.97	3.73	1.00	1.13	0.53	0.19	0.79	0.40	0.15	0.66	1.10	0.95	0.86	1.48	0.93	1.01	1.87	1.52	1.47
5	2	5	5.20	3.42	0.53	1.08	0.56	0.12	0.83	0.35	0.10	0.69	1.06	0.98	0.88	1.53	0.80	0.99	1.86	0.81	1.21
2	1	5	6.24	2.87	0.27	1.07	0.50	0.07	0.78	0.33	0.05	0.58	0.97	0.79	0.92	1.41	0.77	1.05	1.52	0.33	1.15
15	5	10	6.98	4.00	1.31	1.18	0.65	0.33	0.88	0.51	0.29	0.74	1.12	1.15	0.89	1.47	1.06	1.03	1.82	1.55	1.35
9	3	10	7.91	3.95	0.84	1.16	0.59	0.23	0.86	0.53	0.21	0.74	1.17	1.03	0.92	1.41	0.91	1.04	2.07	1.09	1.30
6	2	10	9.03	3.85	0.64	1.11	0.60	0.20	0.87	0.49	0.16	0.77	1.04	1.08	0.92	1.41	0.87	1.01	1.89	0.90	1.28
12	4	10	9.60	3.95	1.50	1.08	0.64	0.33	0.84	0.53	0.30	0.70	1.19	1.26	0.90	1.39	0.57	1.02	1.93	1.42	1.30
3	1	10	11.36	4.20	0.44	1.23	0.61	0.17	0.91	0.50	0.12	0.76	1.05	0.96	0.96	1.36	0.81	1.02	2.26	0.61	1.29



En todos los casos el uso de contravientos implica un incremento en el cortante basal, dicho incremento crece con la altura del edificio y disminuye con la distancia epicentral (G1 a G8). El sistema de aisladores logra reducir el cortante basal significativamente en los grupos G1, G2 y G3, mientras que en los grupos restantes dicha reducción no es tan sustancial. Los disipadores, independientemente de la altura del edificio y de la distancia epicentral, incrementan el cortante basal entre un 10% y un 20%.

La efectividad de los contravientos para reducir la demanda de cortante sobre las columnas disminuye con la altura del edificio y se incrementa con la distancia epicentral. La efectividad de los aisladores disminuye con la altura del edificio y con la distancia epicentral. La efectividad de los disipadores disminuye con la altura del edificio y crece con la distancia epicentral.

Si se analiza la capacidad de los sistemas estructurales para reducir la demanda de distorsión de entrepiso. La efectividad de los contravientos disminuye con la altura del edificio e incrementa con la distancia epicentral. La efectividad de los aisladores disminuye con la altura del edificio y con la distancia epicentral. La efectividad de los disipadores disminuye con la altura del edificio y se incrementa con la distancia epicentral.

En general la incorporación de contravientos o sistemas de control, incrementan la energía de entrada. En el caso de los contravientos y de los disipadores de forma directa con la distancia epicentral, y en el caso de los aisladores de forma inversa con la distancia epicentral. No obstante, un parámetro más importante respecto al comportamiento esperado es la demanda de energía histerética en columnas y trabes. Los resultados muestran que la demanda histerética en los edificios de marcos una cantidad importante (en algunos casos 50% aproximadamente) de energía se disipa por daño en vigas y columnas sobre todo en los grupos con menor distancia epicentral sin dispositivos. En el caso de los edificios con aisladores de base, la energía que disipan vigas y columnas es prácticamente nula. Cuando se instalan dispositivos disipadores en la altura del edificio, la cantidad de energía que disipan las vigas y columnas se ve reducida aproximadamente un 60%. En el caso de los edificios con contravientos, la energía que disipan las vigas se reduce en un aproximadamente 90%; sin embargo, se incrementa la energía disipada en columnas, siendo en algunos casos el único tipo de energía de disipación adicional, lo que implica que mayores sollicitaciones sobre las columnas, puede incurrirse en problemas de columnas débil.

#### 6.10. Mapas de demandas.

A continuación, se muestran en gráficas tipo mapa, la demanda normalizada de cortante y de distorsión, tomando como referencia la demanda en los edificios estructurados a base de marcos.



De la observación de los mapeos, tanto de la demanda de cortante como de distorsión, se deduce que:

1. Conviene usar contravientos conforme más se aleja de la trinchera. Pues reducen más la distorsión e incrementan menos el cortante.
2. Conviene usar aisladores conforme más se acerca a la trinchera. Pues reducen más la distorsión e incrementan menos el cortante.
3. Conviene usar dispositivos conforme más se aleja de la trinchera. Pues reducen más la distorsión e incrementan menos el cortante.

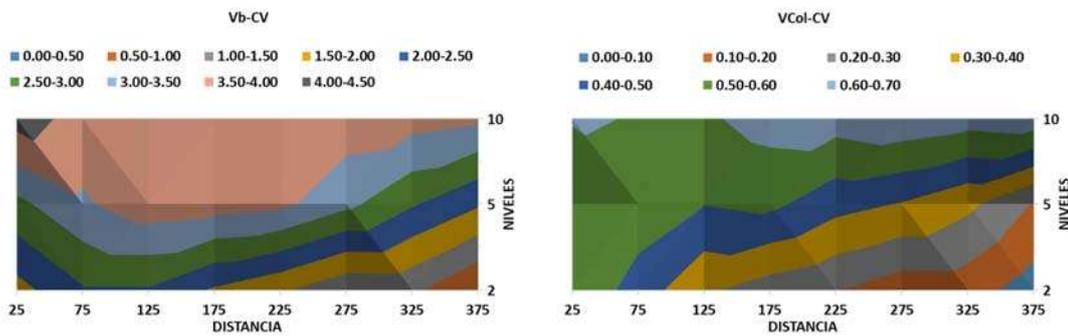


Figura 200. Demanda normalizada de cortante basal (izquierda) y de cortante en las columnas (derecha) para el sistema con contravientos.

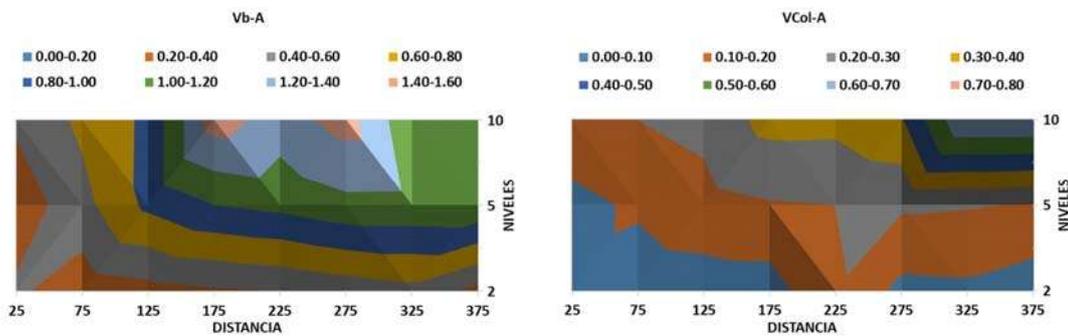


Figura 201. Demanda normalizada de cortante basal (izquierda) y de cortante en las columnas (derecha) para el sistema con aislamiento de base.

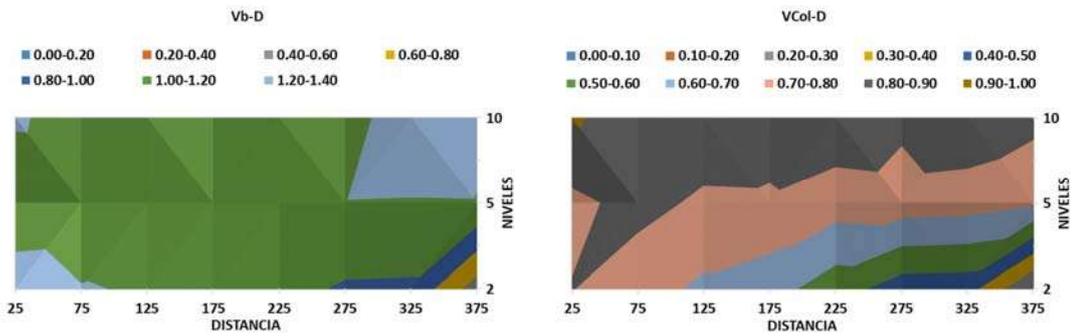
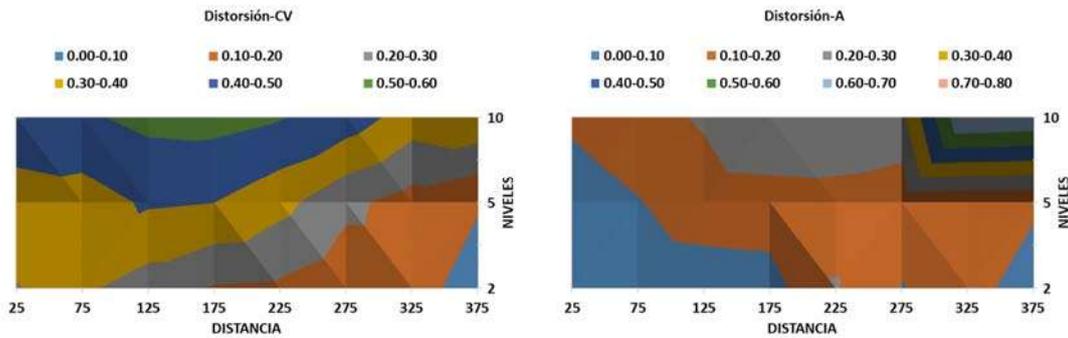
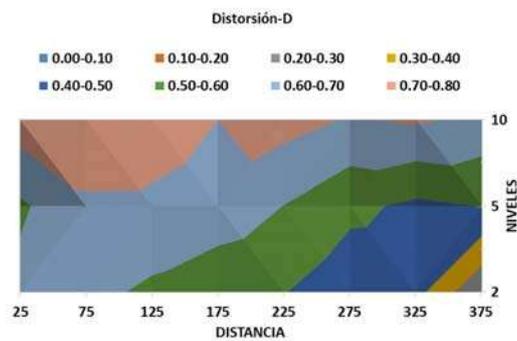


Figura 202. Demanda normalizada de cortante basal (izquierda) y de cortante en las columnas (derecha) para el sistema con disipadores.



(a)

(b)



(c)

Figura 203. (a) Demanda normalizada de distorsión en sistema con contraviento, (b) del sistema aislado y (c) del sistema con disipadores.



## 7. CONCLUSIONES

1. Las ordenadas máximas de los espectros de respuesta debidos a sismos de subducción, se mueven hacia la zona de mayores periodos, conforme crece la distancia epicentral. Lo cual significa que las componentes del movimiento con más alta frecuencia se van perdiendo conforme las ondas sísmicas se alejan de la zona de ruptura, mientras que las componentes de baja frecuencia permanecen y en algunos casos se amplifican por factores topográficos y/o de características locales del suelo. Este efecto provoca que un mismo sismo, afecte a edificios cercanos de baja altura y a edificios lejanos de gran altura.
2. La demanda producida por los acelerogramas escalados sobre los modelos no lineales de los edificios, no conduce a los edificios al nivel de daño importante. Por lo que se puede decir que el diseño de edificios mediante el análisis modal espectral ofrece un nivel de seguridad adecuado. Muchos de los colapsos de edificios ocurridos en los últimos sismos, se relacionan con problemas de estructuración y detallado (fenómenos que no se abordan en el presente trabajo).
3. En general el uso de dispositivos de control, ante sismos de subducción, reduce la demanda de distorsión de entrepiso y de cortante basal independientemente de la distancia a la trinchera de subducción y de la altura del edificio, sin embargo, los aisladores resultan ser más efectivos en zonas cercanas a la trinchera de subducción y en edificios de baja altura, mientras que los dispositivos de comportamiento elastoplástico resultan ser más efectivos en zonas lejanas a la trinchera e independientemente de la altura del edificio. En general, equipar edificios con este tipo de sistemas reduce considerablemente la respuesta sísmica esperada, por lo que es importante impulsar su uso en la práctica profesional.
4. El uso de contravientos reduce considerablemente la demanda de distorsión de entrepiso, sin embargo, incrementa la demanda de cortante basal, lo cual implica un incremento en las dimensiones de la cimentación. El MDOC2016 de diseño por sismo, que es el código vigente para diseño de estructuras en la república no advierte el fenómeno de planta baja flexible que puede ocurrir si se pandean los contravientos de planta baja, y permite el uso un factor de comportamiento sísmico  $Q=4$ , con lo cual se incrementa dicho riesgo. Las NTC17, limitan el uso a  $Q=2$  para este tipo de estructuraciones. Todos los edificios construidos con dicha estructuración diseñados con el MDOC2008 son sujetos de revisiones mediante análisis no lineales, a fin de evaluar su vulnerabilidad.
5. Los sistemas de aislamiento podrían utilizarse con mayor efectividad para distancias epicentrales en el intervalo de 0 a 150 km, mientras que los edificios con disipadores



de energía son más eficientes para epicentros localizados en el intervalo de 150 a 400 km

6. Los sistemas de aislamiento podrían utilizarse con mayor efectividad en edificios de entre 2 y 5, mientras que los edificios con disipadores de energía son más eficientes en edificios de entre 5 y 10 niveles.
7. Líneas futuras de investigación:
  - a. Analizar los modelos ante registros sísmicos de falla normal.
  - b. Incorporar irregularidades a los modelos.
  - c. Incorporar interacción suelo estructura.



## 8. REFERENCIAS

ASCE/SEI (Structural Engineering Institute). (2016). "Minimum design loads for buildings and other structures." ASCE/SEI 7-16, Reston, VA.

Base de Datos de Registros Acelerográficos de la Red Sísmica Mexicana. Consultado 8 de Abril de 2018. <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/RedAcelerografica.aspx>

Bitrán, D. B. (2001). *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99*. Sistema Nacional de Protección Civil, Cenapred, México (2001), pp.107

Buckle IG, Constantinou MC, Diclali M, Chasemi H. Seismic isolation of highway bridges. Research Report MCEER-06-SP07, MCEER, University of Buffalo, NY, 2006.

California Institute of Technology, Tectonics Observatory (2018). The unusual case of the Mexican subduction zone. Consultado 3 de Febrero de 2018 <http://www.tectonics.caltech.edu/outreach/highlights/mase/>

CEN, EN 15129:2010 Anti-seismic devices, CEN (2010)

CEN, EN 1998-1:2008 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, CEN (2008)

Cheng, F. Y., Jiang, H., & Lou, K. (2008). *Smart structures: innovative systems for seismic response control*. CRC press. Boca Raton, 2008.

Federal Reserve Bank of Kansas City (2016). How much economic damage do large earthquakes cause? Consultado 18 de abril de 2018. <https://www.kansascityfed.org/publications/research/oke/articles/2016/economic-damage-large-earthquakes>

Jara, M., Jara, J. M., & Casas, J. R. (2006). Protección sísmica de estructuras con dispositivos de control. *Morevallado*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México.

Kelly, J. M. (1988). *Base isolation in Japan, 1988*. Report No. UCB.EERC-88/20, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.

Kelly, J. M. (1997). Buckling Behavior of Elastomeric Bearings. In *Earthquake-Resistant Design with Rubber* (pp. 161-189). Springer, London.



Martelli, A., Clemente, P., De Stefano, A., Forni, M., & Salvatori, A. (2014). Recent development and application of seismic isolation and energy dissipation and conditions for their correct use. In *Perspectives on European earthquake engineering and seismology* (pp. 449-488). Springer, Cham.

Meyer, V., Becker, N., Markantonis, V., Schwarze, R., Van Den Bergh, J., Bouwer, L. & Hallegate, S. (2013). Assessing the costs of natural hazards-state of the art and knowledge gaps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(5), 1351-1373.

MOC-2008 (2009), "Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo", Instituto de Investigaciones Eléctricas y Comisión Federal de Electricidad, México, noviembre.

Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*. John Wiley & Sons, Chichester, England.

Pan, P., Ye, L., Shi, W., & Cao, H. (2012). Engineering practice of seismic isolation and energy dissipation structures in China. *Science China Technological Sciences*, 55(11), 3036-3046.

Ramirez, O. M., Constantinou, M. C., Kircher, C. A., Whittaker, A. S., Johnson, M. W., Gomez, J. D., & Chrysostomou, C. Z. (2000). *Development and evaluation of simplified procedures for the analysis and design of buildings with passive energy dissipation systems* (Doctoral dissertation, State University of New York at Buffalo).

Ruiz, S. E. (2018). Review of Guidelines for Seismic Design of Structures with Damping Systems. *The Open Civil Engineering Journal*, 12(1), pp. 195-204.

Sahoo, D. R., Singhal, T., Taraithia, S. S., & Saini, A. (2015). Cyclic behavior of shear-and-flexural yielding metallic dampers. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, 247-257.

SSN Servicio Sismológico Nacional (2017). Reporte Especial del Sismo de Tehuantepec día 7 de septiembre de 2017, (Mw 8.2). Consultado 2 de mayo de 2018. [http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX\\_rep\\_esp\\_20170907\\_Tehuantepec\\_M82.pdf](http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170907_Tehuantepec_M82.pdf)

SSN Servicio Sismológico Nacional (2017). Reporte Especial del Sismo del día 19 de septiembre de 2017, Puebla-Morelos (M 7.1). Consultado 2 de Mayo de 2018. [http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX\\_rep\\_esp\\_20170919\\_Puebla-Morelos\\_M71.pdf](http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf)

Tena-Colunga, A. (2007). "State of the Art and State of the Practice for energy dissipation and seismic isolation of structures in Mexico", Proceedings of the 10th



World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Estambul, Turquía, CD-ROM.

Yeh, C. H., Lu, L. Y., Chung, L. L., & Huang, C. S. (2004). Test of a full-scale steel frame with TADAS. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 3(2), pp. 1–16.

Zhou, F. L. (2001). Seismic isolation of civil buildings in the People's Republic of China. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3(3), pp. 268-276.

Zhou, F. L. (2015). Earthquake tragedy and application of seismic isolation, energy dissipation and other seismic control systems to protect structures in China. *Energia Ambiente e Innovazione*, 61(5), pp. 23-30.

Zhou, F. L. (2015). Earthquake tragedy and application of seismic isolation, energy dissipation and other seismic control systems to protect structures in China. *Energia Ambiente e Innovazione*, 61(5), pp. 23-30.

Zhou, F., & Tan, P. (2018). Recent progress and application on seismic isolation energy dissipation and control for structures in China. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 17(1), pp. 19-27.



## ANEXO. Código Matlab para la extracción de datos del PERFORM.

```

clc
clear all
TIPO=5; %tipo de edificio: 1-MBF, 2-MBA, 3-MCVBF, 4-MCVBA, 5-MDH
NIV=10; %niveles de edificio 2, 5 o 10
sis=1; %sismo
for AD=1:4
    ADD=int2str(AD);
    directorio=strcat('C:\Users\ESTEBAN PC\Documents\PERFORM\PERFORM-
3D\Structures\TES-HUA10-D\AD',ADD);
    cd
    folder=cd(directorio);

    %CANTIDAD DE NODOS
    filename='ECHO.txt'
    [A]=textread(filename,'%s');
    j=1;
    i=1;
    while j<2
        switch A{i,1}
            case 'NODAL'
                s1{1,1}=A{i-7,1};
                j=3;
            end
            i=i+1;
        end
        s11=char(s1);
        cantnd=str2num(s11);
        clear filename A j i s1 s11;

        %CASOS DE ANALISIS EN CADA CARPETA
        csofin=8;
        if AD>3
            csofin=8;
        end

        %NODOS DE CONTROL
        ptctr(1)=13;
        ptctr(2)=38;
        ptctr(3)=71;
        ptctr(4)=120;
        ptctr(5)=153;
        ptctr(6)=186;
        ptctr(7)=243;
        ptctr(8)=276;
        ptctr(9)=309;
        ptctr(10)=342;
        ptctr(11)=375;

        for cso=2:csofin

            %CORTANTE BASAL

```



```

f=int2str(cso);
filename=strcat('ZF00',f); %12
fid=fopen(filename,'r');
A=fread(fid,'real*4');
n=15; % en el archivo dice que 18??
dims=size(A);
dims1(1,1)=n;
dims1(1,2)=dims(1,1)/n;
A=reshape(A,dims1);
A=A';

CBH1(:,1)=A(:,1);
CBH2(:,1)=A(:,2);
dims=size(CBH1);
dims1(1,1)=2*NIV;
dims1(1,2)=dims(1,1)/2/NIV;
CBH1=reshape(CBH1,dims1);
CBH2=reshape(CBH2,dims1);
CBH1=CBH1';
CBH2=CBH2';

for i=1:2*NIV
    CBH1max(sis,i)=max(abs(CBH1(:,i)));
    CBH2max(sis,i)=max(abs(CBH2(:,i)));
    CBHmax(sis,i)=max(CBH1max(sis,i),CBH2max(sis,i))/1000;
end

%puntos=dims1(1,2)/NIV;

fclose(fid);
clear filename fid A n dims dims1 CBH1 CBH2;

%VELOCIDADES Y ACELERACIONES
filename=strcat('ZL00',f);
fid=fopen(filename,'r');
A=fread(fid,'real*4');
n=6;
dims=size(A);
dims1(1,1)=n;
dims1(1,2)=dims(1,1)/n;
A=reshape(A,dims1);
A=A';
sz=size(A);
i=1;
maxvel(28,6)=0;
maxacel(28,6)=0;
base=13;
for k=1:NIV
    for j=ptoctr(k+1):cantnd:sz(1,1)
        if j-ptoctr(k+1)<0.0001
            q=ptoctr(k);
            r=j-q;
        end
        H1(i,1)=(A(j,1)^2+A(j,2)^2)^0.5;
        H2(i,1)=(A(j,4)^2+A(j,5)^2)^0.5;
    end
end

```



```

        i=i+1;
    end
    maxvel(k,1)=max(H1(:,1));
    maxacel(k,1)=max(H2(:,1));
    i=1;
    end
    for i=1:NIV
        VELmax(sis,i)=maxvel(i,1);
        ACELmax(sis,i)=maxacel(i,1);
    end

%DESPLAZAMIENTOS
filename=strcat('ZC00',f);
fid=fopen(filename,'r');
A=fread(fid,'real*4');
n=6;
dims=size(A);
dims1(1,1)=n;
dims1(1,2)=dims(1,1)/n;
A=reshape(A,dims1);
A=A';
sz=size(A);
i=1;
maxdesp(28,6)=0;
maxdistor(28,6)=0;
%DISTORSIONES DE LOS ENTREPISOS
for k=1:NIV
    for j=ptoctr(k+1):cantnd:sz(1,1)
        if j-ptoctr(k+1)<0.0001
            q=ptoctr(k);
            r=j-q;
        end
        H1(i,1)=A(j,1)-A(j-r,1);
        H2(i,1)=A(j,2)-A(j-r,2);
        HT(i,1)=(H1(i,1)^2+H2(i,1)^2)^0.5;
        i=i+1;
    end
    maxdistor(k,1)=max(HT(:,1))/280;
    i=1;
    end
    for i=1:NIV
        DTRmax(sis,i)=maxdistor(i,1);
    end
    clear H1 H2 HT maxdistor;
%DESPLAZAMIENTO DE LOS AISLADORES
i=1;
for j=ptoctr(1):cantnd:sz(1,1)
    H1(i,1)=A(j,1);
    H2(i,1)=A(j,2);
    HT(i,1)=(H1(i,1)^2+H2(i,1)^2)^0.5;
    i=i+1;
end
DAISmax(sis,1)=max(HT);
clear H1 H2 HT

```



```

%DESPLAZAMIENTO DE LOS DISIPADORES
for piso=1:NIV
    switch piso
        case 1
            nodsup=51;
            nodinf=92;
        case 2
            nodsup=84;
            nodinf=100;
        case 3
            nodsup=133;
            nodinf=219;
        case 4
            nodsup=166;
            nodinf=223;
        case 5
            nodsup=199;
            nodinf=227;
        case 6
            nodsup=256;
            nodinf=396;
        case 7
            nodsup=289;
            nodinf=400; %51 84 133 166 199 256 289 322 355 388
        case 8
            nodsup=322;
            nodinf=404;
        case 9
            nodsup=355;
            nodinf=408;
        case 10
            nodsup=388;
            nodinf=412;
    end
    i=1;
    for j=nodsup:cantnd:sz(1,1) %51 84 133 166 199 256 289 322
355 388
        Hsup(i,1)=A(j,1);
        i=i+1;
    end
    i=1;
    for j=nodinf:cantnd:sz(1,1)%92 100 219 223 227 396 400 404
408 412
        Hinf(i,1)=A(j,1);
        Hdispo(i,1)=Hsup(i,1)-Hinf(i,1);
        i=i+1;
    end
    DDISPOmax(sis,piso)=max(Hdispo);
    clear Hsup Hinf Hdispo
end

clear filename fid A n dims dims1;

%ROTACION MAXIMA EN LA COLUMNA DE CONTROL
switch TIPO

```



```

        case 1
            filename=strcat('Z005H00',f);
        case 5
            filename=strcat('Z005H00',f);
        case 2
            filename=strcat('Z011H00',f);
        case 3
            filename=strcat('Z009H00',f);
        case 4
            filename=strcat('Z008H00',f);
    end
    fid=fopen(filename,'r');
    A=fread(fid,'real*4');
    n=6;
    dims=size(A);
    dims1(1,1)=n;
    dims1(1,2)=dims(1,1)/n;
    A=reshape(A,dims1);
    A=A';
    sz=size(A);
    i=1;
    for j=1:2:sz(1,1)
        B(i,1)=A(j,1);      %hinge 1 M2
        C(i,1)=A(j+1,1);   %hige 2 M2
        B(i,2)=A(j,2);     %M3
        C(i,2)=A(j+1,2);
        B(i,3)=A(j,3);     %P
        C(i,3)=A(j+1,3);
        B(i,4)=A(j,4);     %rot2
        C(i,4)=A(j+1,4);
        B(i,5)=A(j,5);     %rot3
        C(i,5)=A(j+1,5);
        B(i,6)=A(j,6);     %def ax1
        C(i,6)=A(j+1,6);
        R(i,1)=max(B(i,4),B(i,5));
        i=i+1;
    end
    ROTmax(sis,1)=max(abs(R(:,1)));
    clear filename fid A n dims dims1 sz i j B C R;
    sis=sis+1
end
end
end

```