

**Universidad de Costa Rica**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Civil**

**Comparación del desempeño analítico ante cargas sísmicas de un edificio de concreto reforzado de gran altura de acuerdo con un diseño sismorresistente convencional y otro con el uso de sistemas de aislamiento elastoméricos.**

**Trabajo de Graduación**

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

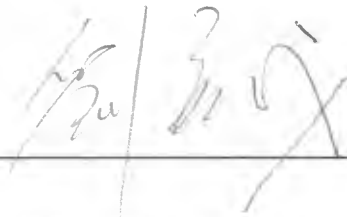
**Diego Alberto Eskenazi Lépiz**

Director de Proyecto de Graduación:

**Ing. Yi Cheng Liu Kuan, M.Sc.**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

**Miembros del comité asesor**



---

Ing. Yi Cheng Liu Kuan, M.Sc.

Director



---

Ing. Diego Hidalgo Leiva, PhD.

Asesor



---

Ing. Erich Neurohr Bustamante, M.S.E.

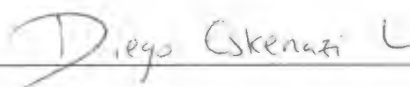
Asesor



---

Ing. Luis Diego Salas De la Fuente, M.Sc.

Asesor



---

Diego Alberto Eskenazi Lépiz

Graduando



**Fecha:** 2018, junio, 25

**El suscrito, Diego Alberto Eskenazi Lépiz**, cédula 1-1563-0655, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B32390**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Comparación del desempeño analítico ante cargas sísmicas de un edificio de concreto reforzado de gran altura de acuerdo con un diseño sismorresistente convencional y otro con el uso de sistemas de aislamiento elastoméricos**, bajo la dirección del **Ing. Yi Cheng Liu Kuan, M.Sc.**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

**Nota:** De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

## **Dedicatoria**

*A Dios, a mi familia y a mis amigos por el apoyo incondicional durante este proceso.*

*"Porque yo sé muy bien los planes que tengo para ustedes —afirma el SEÑOR—, planes de bienestar y no de calamidad, a fin de darles un futuro y una esperanza."*

**Jeremías 29:11**

## **Agradecimientos**

A Dios, por siempre darme la fuerza y la sabiduría para completar cada reto que se me presente.

A mi familia, por su amor y apoyo incondicional, no sólo durante mi carrera profesional sino en todos los momentos de mi vida.

A mis amigos, por motivarme a lo largo del desarrollo de esta investigación y por siempre acompañarme en mis aventuras.

A mi director de tesis Ing. Yi Cheng Liu, M.Sc., por su disposición y actitud a siempre ayudarme, no sólo con esta investigación sino también a lo largo de la carrera.

A mis asesores de tesis Ing. Diego Hidalgo, PhD., Ing. Erich Neurohr, M.S.E. e Ing. Luis Diego Salas, M.Sc., por la ayuda brindada en la elaboración de este trabajo.

A los profesores Ing. Alejandro Navas, M.Sc., Ing. Andrés Abarca, M.Sc. e Ing. Rubén Salas, PhD., por su ayuda a lo largo de mi carrera profesional.

A la empresa IECA Internacional S.A., por su disposición a colaborar con el desarrollo de este proyecto.

## Índice general

|   |     |
|---|-----|
| Dedicatoria .....   | iv  |
| Agradecimientos .....   | v   |
| Índice general.....   | vi  |
| Índice de figuras .....   | x   |
| Índice de cuadros.....  | xvi |
| Resumen .....   | xix |
| 1. Introducción .....   | 1   |
| 1.1 Problema específico.....                                    | 1   |
| 1.2 Importancia .....   | 3   |
| 1.3 Objetivos.....  | 4   |
| 1.3.1 Objetivo general .....                                    | 4   |
| 1.3.2 Objetivos específicos .....                               | 5   |
| 1.4 Antecedentes teóricos y prácticos del problema.....         | 5   |
| 1.5 Alcance .....   | 11  |
| 1.6 Limitaciones .....  | 12  |
| 1.7 Normativa aplicable.....                                    | 13  |
| 2 Marco teórico.....  | 16  |
| 2.1 Sismología general .....                                    | 16  |
| 2.2 Sismicidad en Costa Rica .....                              | 22  |
| 2.3 Respuesta dinámica de un edificio ante eventos sismos ..... | 30  |
| 2.4 Diseño sismorresistente en Costa Rica .....                 | 32  |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.5   | Principios del aislamiento sísmico .....   | 37 |
| 2.6   | Aisladores de caucho con núcleo de plomo (LRB) .....   | 39 |
| 2.7   | Análisis de respuesta en el tiempo.....  | 49 |
| 2.7.1 | Requisitos para edificios con base convencional .....  | 51 |
| 2.7.2 | Requisitos para edificios con aislamiento sísmico .....  | 52 |
| 2.7.3 | Escalamiento de acelerogramas .....  | 53 |
| 2.7.4 | Incursión en el rango inelástico de los elementos propensos a la formación de rótulas plásticas..... | 55 |
| 2.8   | Revisión del sistema de aislamiento sísmico .....  | 58 |
| 3     | Metodología.....   | 66 |
| 4     | Descripción del edificio e información básica .....  | 73 |
| 4.1   | Descripción del edificio .....   | 73 |
| 4.1.1 | Clasificación según el CSCR-02.....  | 75 |
| 4.1.2 | Descripción de los materiales .....  | 77 |
| 4.1.3 | Descripción de las cargas de diseño.....   | 78 |
| 4.1.4 | Descripción del sistema de fundación .....   | 79 |
| 4.1.5 | Descripción de las columnas .....  | 80 |
| 4.1.6 | Descripción de los muros estructurales .....   | 81 |
| 4.1.7 | Descripción de los entrepisos .....  | 91 |
| 4.1.8 | Descripción de los techos.....   | 91 |
| 4.2   | Condición geológica de la zona.....  | 92 |
| 5     | Análisis estructural y diseño de los LRB.....  | 94 |
| 5.1   | Modelo estructural original.....   | 94 |
| 5.1.1 | Modelo estructural sin sistemas de protección sísmica .....  | 94 |



|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.1.2 | Análisis modal.....  | 97  |
| 5.2   | Revisión preliminar de la incursión del edificio con base convencional en el rango inelástico..... | 100 |
| 5.3   | Modelo estructural con sistemas de protección sísmica .....  | 107 |
| 5.4   | Diseño de los LRB .....  | 109 |
| 5.5   | Análisis modal.....  | 115 |
| 6     | Resultados de los análisis de respuesta en el tiempo.....  | 118 |
| 6.1   | Demanda sísmica .....  | 118 |
| 6.1.1 | Selección.....   | 118 |
| 6.1.2 | Acelerogramas escalados.....   | 119 |
| 6.1.3 | Espectros de respuesta de aceleración originales.....  | 127 |
| 6.1.4 | Espectros de respuesta de aceleración escalados.....   | 129 |
| 6.2   | Incursiones en el rango inelástico.....  | 132 |
| 6.3   | Patrones de derivas y desplazamientos máximos .....  | 137 |
| 6.4   | Patrones de aceleraciones.....   | 139 |
| 6.5   | Comparación según los terremotos.....  | 140 |
| 6.6   | Revisión de los sistemas de protección sísmica .....   | 151 |
| 7     | Conclusiones y recomendaciones.....  | 154 |
| 7.1   | Conclusiones.....  | 154 |
| 7.2   | Recomendaciones .....  | 156 |
| 8     | Fuentes de consulta .....  | 158 |
| 9     | Apéndices.....   | 165 |
| 9.1   | Apéndice A: Análisis de momento-curvatura de los muros.....  | 165 |
| 9.1.1 | Apéndice A.1: Diagramas de momento-curvatura .....   | 165 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 9.1.2 | Apéndice A.2: Revisión preliminar de la incursión de los muros estudiados en el rango inelástico ..... | 168 |
| 9.1.3 | Apéndice A.3: Factores de agrietamiento de los muros estudiados .....                                  | 169 |
| 9.2   | Apéndice B: Diseño del LRB .....   | 170 |
| 9.3   | Apéndice C: Análisis de respuesta en el tiempo .....   | 172 |
| 9.3.1 | Apéndice C.1: Espectros de respuesta de aceleración escalados .....                                    | 172 |
| 9.3.2 | Apéndice C.2: Incursiones de los muros en el rango inelástico.....                                     | 176 |
| 9.3.3 | Apéndice C.3: Patrón de derivas máximas.....   | 182 |
| 9.3.4 | Apéndice C.4: Patrón de desplazamientos máximos .....  | 183 |
| 9.3.5 | Apéndice C.5: Patrón de aceleraciones máximas.....   | 184 |
| 9.3.6 | Apéndice C.6: Demanda sobre los sistemas de protección sísmica .....                                   | 185 |
| 9.3.7 | Apéndice C.7: Parámetros mínimos de diseño del LRB según normativas consultadas .....                  | 187 |
| 10    | Anexos .....   | 189 |
| 10.1  | Anexo A: Catálogo de LRB de DIS .....  | 189 |
| 10.2  | Anexo B: Catálogo de amortiguadores viscosos de ITT Infrastructure ...                                 | 190 |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Ondas sísmicas de cuerpo. ....  | 17 |
| <b>Figura 2.</b> Ondas sísmicas de superficie. ....  | 18 |
| <b>Figura 3.</b> Registro de ondas sísmicas en un acelerograma.....  | 19 |
| <b>Figura 4.</b> Cinturón de Fuego del Pacífico.....   | 23 |
| <b>Figura 5.</b> Mapa tectónico del Occidente. ....  | 24 |
| <b>Figura 6.</b> Epicentros de algunos de los sismos sentidos en Costa Rica en el 2015. .  | 25 |
| <b>Figura 7.</b> Epicentro e intensidades del Terremoto de Damas del 2004. ....  | 27 |
| <b>Figura 8.</b> Epicentro e intensidades del Terremoto de Cinchona del 2009. ....   | 28 |
| <b>Figura 9.</b> Epicentro e intensidades del Terremoto de Sámara del 2012. ....   | 30 |
| <b>Figura 10.</b> Modos de vibración de un edificio. ....  | 31 |
| <b>Figura 11.</b> Zonificación sísmica de Costa Rica. ....   | 34 |
| <b>Figura 12.</b> Espectro de respuesta de aceleración horizontal de diseño del CSCR-10/14 para ZIII, S3 y un amortiguamiento del 5%. .... | 36 |
| <b>Figura 13.</b> Respuesta sísmica de un edificio con base fija y uno aislado de base....   | 38 |
| <b>Figura 14.</b> Partes constitutivas de un aislador elastomérico LRB. ....   | 39 |
| <b>Figura 15.</b> Ejemplo del efecto de aisladores LRB en el espectro de respuesta de diseño. ....   | 40 |
| <b>Figura 16.</b> Ciclos de histéresis de distintos aisladores elastoméricos. ....   | 41 |
| <b>Figura 17.</b> Modelo de dos grados de libertad de un edificio aislado de base. ....  | 43 |
| <b>Figura 18.</b> Modelo bilineal de un LRB. ....  | 45 |
| <b>Figura 19.</b> Ciclo de histéresis de un amortiguador viscoso. ....   | 48 |
| <b>Figura 20.</b> Diagrama típico de momento-curvatura para concreto reforzado.....  | 56 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 21.</b> Modelo de Mander et al. (1988b) para concreto confinado.....                                      | 57  |
| <b>Figura 22.</b> Metodología de la investigación. ....   | 72  |
| <b>Figura 23.</b> Ubicación geográfica del edificio Sabana Real. ....   | 73  |
| <b>Figura 24.</b> Vista aérea del edificio Sabana Real. ....  | 74  |
| <b>Figura 25.</b> Entrepisos típicos de Sabana Real. ....   | 76  |
| <b>Figura 26.</b> Secciones de los muros del nivel 0+0,00 - 0+3,20 (MC1-MC4a). ....                                 | 82  |
| <b>Figura 27.</b> Secciones de los muros del nivel 0+0,00 - 0+3,20 m (MC5-MC9). ....                                | 83  |
| <b>Figura 28.</b> Secciones de los muros del nivel 0+00 - 0+3,20 m (MC10-MC12). ....                                | 84  |
| <b>Figura 29.</b> Planta de muros del primer nivel. ....  | 86  |
| <b>Figura 30.</b> Secciones de los muros del nivel 9+60 – 12+80 m (MC7-MC9). ....                                   | 87  |
| <b>Figura 31.</b> Secciones de los muros del nivel 9+60 – 12+80 m (MC10-MC12). ....                                 | 88  |
| <b>Figura 32.</b> Planta de muros del cuarto nivel. ....  | 90  |
| <b>Figura 33.</b> Modelo estructural original del edificio Sabana Real. ....  | 94  |
| <b>Figura 34.</b> Modos de vibración del edificio sin aislamiento sísmico (1-4) ....                                | 98  |
| <b>Figura 35.</b> Modos de vibración del edificio sin aislamiento sísmico (5, 8-9, 11). ....                        | 99  |
| <b>Figura 36.</b> Diagramas de momento-curvatura de algunos de los muros del primer nivel<br>en su eje fuerte. .... | 101 |
| <b>Figura 37.</b> Diagramas de momento-curvatura de algunos de los muros del cuarto nivel<br>en su eje fuerte. .... | 101 |
| <b>Figura 38.</b> Diagramas de momento curvatura de algunos de los muros del primer nivel<br>en su eje débil. ....  | 103 |
| <b>Figura 39.</b> Diagramas de momento curvatura de algunos de los muros del cuarto nivel<br>en su eje débil. ....  | 103 |
| <b>Figura 40.</b> Factores de agrietamiento reales de los muros del primer nivel. ....                              | 106 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 41.</b> Factores de agrietamiento reales de los muros del cuarto nivel. ....                      | 106 |
| <b>Figura 42.</b> Vista en elevación del modelo con base aislada del edificio Sabana Real.<br>.....         | 107 |
| <b>Figura 43.</b> Ubicación de los LRB en el primer nivel del modelo aislado del edificio Sabana Real. .... | 108 |
| <b>Figura 44.</b> Ubicación de los amortiguadores viscosos en el eje B. ....                                | 111 |
| <b>Figura 45.</b> Ubicación de los amortiguadores viscosos en el eje G. ....                                | 112 |
| <b>Figura 46.</b> Ubicación de los amortiguadores viscosos en el eje 1. ....                                | 113 |
| <b>Figura 47.</b> Ubicación de los amortiguadores viscosos en el eje 4. ....                                | 114 |
| <b>Figura 48.</b> Modos de vibración del edificio con protección sísmica (1-2). ....                        | 116 |
| <b>Figura 49.</b> Modos de vibración del edificio con protección sísmica (3,6,12). ....                     | 117 |
| <b>Figura 50.</b> Acelerogramas escalados del Terremoto de Cinchona en la dirección N00E.<br>.....          | 121 |
| <b>Figura 51.</b> Acelerogramas escalados del Terremoto de Cinchona en la dirección N90E.<br>.....          | 121 |
| <b>Figura 52.</b> Acelerogramas escalados del Terremoto de Cinchona en la dirección UPDO.<br>.....          | 122 |
| <b>Figura 53.</b> Acelerogramas escalados del Terremoto de Damas en la dirección N00E.<br>.....             | 123 |
| <b>Figura 54.</b> Acelerogramas escalados del Terremoto de Damas en la dirección N90E.<br>.....             | 123 |
| <b>Figura 55.</b> Acelerogramas escalados del Terremoto de Damas en la dirección UPDO.<br>.....             | 124 |
| <b>Figura 56.</b> Acelerogramas escalados del Terremoto de Sámara en la dirección N00E.<br>.....            | 125 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 57.</b> Acelerogramas escalados del Terremoto de Sámara en la dirección N90E.<br>.....   | 125 |
| <b>Figura 58.</b> Acelerogramas escalados del Terremoto de Sámara en la dirección UPDO.<br>.....   | 126 |
| <b>Figura 59.</b> Espectros de aceleración horizontal de los terremotos en estudio.....  | 127 |
| <b>Figura 60.</b> Espectros de aceleración vertical de los terremotos en estudio.....  | 128 |
| <b>Figura 61.</b> Espectros de respuesta horizontal del Terremoto de Cinchona escalados al<br>sismo de diseño horizontal.....  | 129 |
| <b>Figura 62.</b> Espectro de respuesta vertical del Terremoto de Cinchona escalado al<br>sismo de diseño vertical.....  | 130 |
| <b>Figura 63.</b> Espectros de respuesta horizontal del Terremoto de Cinchona escalados al<br>sismo máximo horizontal. ....  | 131 |
| <b>Figura 64.</b> Espectro de respuesta vertical del Terremoto de Cinchona escalado al<br>sismo máximo vertical. ....  | 131 |
| <b>Figura 65.</b> Número de incursiones en el rango inelástico de los muros del primer nivel<br>actuando en su sentido fuerte, durante el Terremoto de Cinchona..... | 132 |
| <b>Figura 66.</b> Número de incursiones en el rango inelástico de los muros del primer nivel<br>actuando en su sentido débil, durante el Terremoto de Cinchona.....  | 134 |
| <b>Figura 67.</b> Número de incursiones en el rango inelástico de los muros del cuarto nivel<br>actuando en su sentido fuerte, durante el Terremoto de Cinchona..... | 135 |
| <b>Figura 68.</b> Número de incursiones en el rango inelástico de los muros del cuarto nivel<br>actuando en su sentido débil, durante el Terremoto de Cinchona.....  | 136 |
| <b>Figura 69.</b> Derivas máximas absolutas durante el Terremoto de Cinchona. ....   | 137 |
| <b>Figura 70.</b> Desplazamientos máximos absolutos durante el Terremoto de Cinchona.<br>.....   | 138 |
| <b>Figura 71.</b> Patrón de aceleraciones durante el Terremoto de Cinchona. ....   | 139 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 72.</b> Gráfico comparativo de los desplazamientos máximos en el techo.....  | 141 |
| <b>Figura 73.</b> Gráfico comparativo de las aceleraciones máximas en el techo. ....   | 142 |
| <b>Figura 74.</b> Gráfico comparativo de los momentos en el eje fuerte del muro 5 del primer nivel.....  | 143 |
| <b>Figura 75.</b> Gráfico comparativo de los momentos en el eje fuerte del muro 5 del cuarto nivel.....  | 145 |
| <b>Figura 76.</b> Gráfico comparativo de los momentos en el eje fuerte del muro 21 del primer nivel. ....                                      | 146 |
| <b>Figura 77.</b> Gráfico comparativo de la resultante de los desplazamientos horizontales en los LRB. ....                                    | 147 |
| <b>Figura 78.</b> Ciclo de histéresis del LRB con mayor demanda de desplazamiento (K3), ante el sismo máximo de Sámara. ....                   | 149 |
| <b>Figura 79.</b> Ciclo de histéresis del LRB con menor demanda de desplazamiento (K15), ante el sismo máximo de Sámara. ....                  | 149 |
| <b>Figura 80.</b> Ciclo de histéresis del amortiguador viscoso con mayor demanda de desplazamiento (K55), ante el sismo máximo de Sámara. .... | 150 |
| <b>Figura 81.</b> Resumen del cálculo del diagrama de momento-curvatura del muro 5 del nivel 1, en el eje fuerte.....                          | 167 |
| <b>Figura 82.</b> Espectros de respuesta horizontal del Terremoto de Damas escalados al sismo de diseño horizontal.....                        | 172 |
| <b>Figura 83.</b> Espectro de respuesta vertical del Terremoto de Damas escalado al sismo de diseño vertical.....                              | 172 |
| <b>Figura 84.</b> Espectros de respuesta horizontal del Terremoto de Sámara escalados al sismo de diseño horizontal.....                       | 173 |
| <b>Figura 85.</b> Espectro de respuesta vertical del Terremoto de Sámara escalado al sismo de diseño vertical.....                             | 173 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 86.</b> Espectros de respuesta horizontal del Terremoto de Damas escalados al sismo máximo horizontal. ....  | 174 |
| <b>Figura 87.</b> Espectro de respuesta vertical del Terremoto de Damas escalado al sismo máximo vertical. ....        | 174 |
| <b>Figura 88.</b> Espectros de respuesta horizontal del Terremoto de Sámara escalados al sismo máximo horizontal. .... | 175 |
| <b>Figura 89.</b> Espectro de respuesta vertical del Terremoto de Sámara escalado al sismo máximo vertical. ....       | 175 |
| <b>Figura 90.</b> Derivas máximas absolutas durante el Terremoto de Damas.....   | 182 |
| <b>Figura 91.</b> Derivas máximas absolutas durante el Terremoto de Sámara.....  | 182 |
| <b>Figura 92.</b> Desplazamientos máximos absolutos durante el Terremoto de Damas.                                     | 183 |
| <b>Figura 93.</b> Desplazamientos máximos absolutos durante el Terremoto de Sámara. ....                               | 183 |
| <b>Figura 94.</b> Patrón de aceleraciones durante el Terremoto de Damas. ....  | 184 |
| <b>Figura 95.</b> Patrón de aceleraciones durante el Terremoto de Sámara. ....   | 184 |
| <b>Figura 96.</b> Relación fuerza-velocidad de los amortiguadores viscosos de ITT Infraestructure. ....                | 190 |



## Índice de cuadros

|  |     |
|--|-----|
| <b>Cuadro 1.</b> Edificios altos en las inmediaciones de La Sabana. ....   | 1   |
| <b>Cuadro 2.</b> Tabla de Intensidad de Mercalli Modificada. ....  | 21  |
| <b>Cuadro 3.</b> Aceleración pico efectiva (en términos de la gravedad) para distintos tipos de suelo y zonas sísmicas de Costa Rica. .... | 35  |
| <b>Cuadro 4.</b> Coeficientes de amortiguamiento $B_D$ o $B_M$ . ....  | 59  |
| <b>Cuadro 5.</b> Clasificación de los muros del primer nivel según su sección transversal. ....  | 85  |
| <b>Cuadro 6.</b> Clasificación de los muros del cuarto nivel según su sección transversal. ....  | 89  |
| <b>Cuadro 7.</b> Modos de vibración importantes en el edificio sin sistemas de protección sísmica. ....                                    | 97  |
| <b>Cuadro 8.</b> Revisión preliminar de la incursión en el rango inelástico de los muros del primer nivel. ....                            | 104 |
| <b>Cuadro 9.</b> Revisión preliminar de la incursión en el rango inelástico de los muros del cuarto nivel. ....                            | 104 |
| <b>Cuadro 10.</b> Modos de vibración importantes en el edificio con sistemas de protección sísmica. ....                                   | 115 |
| <b>Cuadro 11.</b> Demanda en los LRB producto del Terremoto de Cinchona. ....  | 151 |
| <b>Cuadro 12.</b> Demanda en los amortiguadores viscosos producto del Terremoto de Cinchona. ....  | 152 |
| <b>Cuadro 13.</b> Parámetros de entrada para calcular la capacidad a flexión de cada tipo de muro. ....                                    | 165 |
| <b>Cuadro 14.</b> Resultados de los diagramas de momento-curvatura de los muros del primer nivel. ....                                     | 166 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Cuadro 15.</b> Resultados de los diagramas de momento-curvatura de los muros del cuarto nivel. ....  | 166 |
| <b>Cuadro 16.</b> Revisión de la incursión en el rango inelástico de los muros del primer nivel.....  | 168 |
| <b>Cuadro 17.</b> Revisión de la incursión en el rango inelástico de los muros del cuarto nivel.....  | 168 |
| <b>Cuadro 18.</b> Factores de agrietamiento reales de los muros del primer nivel. ....  | 169 |
| <b>Cuadro 19.</b> Factores de agrietamiento reales de los muros del cuarto nivel.....   | 169 |
| <b>Cuadro 20.</b> Iteraciones para determinar la rigidez efectiva necesaria en los LRB para garantizar la estabilidad estructural del edificio.....   | 170 |
| <b>Cuadro 21.</b> Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del primer nivel en el edificio sin aislamiento sísmico, durante el Terremoto de Cinchona.                 | 176 |
| <b>Cuadro 22.</b> Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del cuarto nivel en el edificio sin aislamiento sísmico, durante el Terremoto de Cinchona.                 | 176 |
| <b>Cuadro 23.</b> Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del primer nivel en el edificio sin aislamiento sísmico, durante el Terremoto de Damas. ..                 | 177 |
| <b>Cuadro 24.</b> Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del cuarto nivel en el edificio sin aislamiento sísmico, durante el Terremoto de Damas. ..                 | 177 |
| <b>Cuadro 25.</b> Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del primer nivel en el edificio sin aislamiento sísmico, durante el Terremoto de Sámara. .                 | 178 |
| <b>Cuadro 26.</b> Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del cuarto nivel en el edificio sin aislamiento sísmico, durante el Terremoto de Sámara. .                 | 178 |
| <b>Cuadro 27.</b> Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del primer nivel en el edificio con sistemas de protección sísmica, durante el Terremoto de Cinchona. .... | 179 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Cuadro 28.</b> Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del cuarto nivel en el edificio con sistemas de protección sísmica, durante el Terremoto de Cinchona. .... | 179 |
| <b>Cuadro 29.</b> Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del primer nivel en el edificio con sistemas de protección sísmica, durante el Terremoto de Damas. ....    | 180 |
| <b>Cuadro 30.</b> Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del cuarto nivel en el edificio con sistemas de protección sísmica, durante el Terremoto de Damas. ....    | 180 |
| <b>Cuadro 31.</b> Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del primer nivel en el edificio con sistemas de protección sísmica, durante el Terremoto de Sámara. ....   | 181 |
| <b>Cuadro 32.</b> Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del cuarto nivel en el edificio con sistemas de protección sísmica, durante el Terremoto de Sámara. ....   | 181 |
| <b>Cuadro 33.</b> Demanda en los LRB producto del Terremoto de Damas. ....  | 185 |
| <b>Cuadro 34.</b> Demanda en los LRB producto del Terremoto de Sámara. ....   | 185 |
| <b>Cuadro 35.</b> Demanda en los amortiguadores viscosos producto del Terremoto de Damas. ....  | 186 |
| <b>Cuadro 36.</b> Demanda en los amortiguadores viscosos producto del Terremoto de Sámara. ....   | 186 |
| <b>Cuadro 37.</b> Propiedades mecánicas de los LRB de DIS. ....   | 189 |
| <b>Cuadro 38.</b> Propiedades mecánicas de algunos amortiguadores viscosos de ITT Infrastructure. ....  | 190 |

Eskenazi Lépiz, Diego Alberto

*Comparación del desempeño analítico ante cargas sísmicas de un edificio de concreto reforzado de gran altura de acuerdo con un diseño sismorresistente convencional y otro con el uso de sistemas de aislamiento elastoméricos.*

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R.:

D. A. Eskenazi L., 2018

xxii, 190, [26]h; ils. col. – 68 refs.

## **Resumen**

Estudiar la aplicabilidad de los sistemas de aislamiento elastoméricos -con núcleo de plomo- en Costa Rica resulta importante, sabiendo que ha sido una técnica exitosa en el diseño sismorresistente de edificios alrededor del mundo. En Costa Rica se ha dado un aumento importante en la construcción de edificios altos en años recientes. Por lo tanto, el análisis de nuevas tecnologías es sin duda de gran interés ya que pueden traer mejores desempeños estructurales.

Se realizó un análisis elástico de respuesta en el tiempo con tres terremotos nacionales, limitando el comportamiento no-lineal a los aisladores sísmicos, en el modelo estructural del edificio Sabana Real, con y sin aislamiento sísmico. Esto con el fin de medir las ventajas del aislamiento sísmico en edificios altos de concreto reforzado.

En esta investigación se comprobó que, para estructuras altas y pesadas, es un reto diseñar el sistema de aislamiento sísmico para que pueda resistir la demanda de cargas axiales pero que, a su vez, sea lo suficientemente flexible para alargar de gran manera el período de vibración de la estructura, con el fin de reducir la demanda sísmica sobre los elementos estructurales de la misma. Además, se concluyó que esta tecnología no fue suficiente para observar los beneficios teóricos del aislamiento sísmico, en su totalidad, en el edificio estudiado, no sólo por el reto anterior sino también porque es un edificio con irregularidad moderada y esbelto. Otro problema de utilizar aisladores elastoméricos con núcleo de plomo en la base de edificios altos de concreto reforzado es el manejo de las tensiones, ya que estos son incapaces de resistir dichas cargas. D.A.E.L.

**AISLAMIENTO SÍSMICO, LRB, EDIFICIOS ALTOS, CONCRETO REFORZADO**

Ing. Yi Cheng Liu Kuan, M.Sc.

Escuela de Ingeniería Civil

## 1. Introducción

### 1.1 Problema específico

Actualmente se están desarrollando edificios de gran altura en el Área Metropolitana de Costa Rica, específicamente en la ciudad de San José, manteniendo las técnicas de diseño sismorresistente tradicional sin sistemas de protección sísmica. Sin embargo, en varias partes del mundo se han producido aisladores sísmicos de base que permiten reducir la demanda en los elementos estructurales y han mostrado ser exitosos al implementarlos en edificios de Nueva Zelanda, Japón, Estados Unidos y Chile, como se verá en los antecedentes. A la fecha, se desconoce si los sistemas de aislamiento sísmico beneficiarían al tipo de edificios que se están desarrollando en Costa Rica. Por lo tanto, es necesario preguntarse si utilizar sistemas de aislamiento elastoméricos – con núcleo de plomo- en la base de edificios de concreto reforzado, de gran altura, es una práctica que también podría llegar a ser exitosa en Costa Rica.

En la zona central-oeste de la capital existe un alza en el desarrollo de edificios de gran altura, aquellos con más de 20 niveles sobre la superficie. Cerca de La Sabana se cuenta con los siguientes edificios altos, todos de concreto reforzado:

**Cuadro 1.** Edificios altos en las inmediaciones de La Sabana.

| Proyecto            | Estado     | Fecha | Ubicación   | No. de niveles (sin sótanos) |
|---------------------|------------|-------|-------------|------------------------------|
| Torre Paseo Colón 1 | Finalizado | 2013  | Paseo Colón | 27                           |
| Torre Paseo Colón 2 | Finalizado | 2015  | Paseo Colón | 29                           |
| Torre Rohrmoser     | Finalizado | 2017  | Rohrmoser   | 23                           |
| Latitud Los Yoses   | Finalizado | 2017  | San Pedro   | 22                           |

Fuente: CTBUH, 2017.

Otros edificios en la capital con altura considerable son: Torres del Parque, Torres Roble Sabana, Brisas del Oeste, Metropolitan Tower, Torres del Lago, Sabana Real, Vistas del Parque, Vistas del Robledal y Vistas de Nunciatura.

Los edificios anteriores, al igual que la mayoría de edificios de concreto reforzado que se han desarrollado en el país, son edificios que clasifican como tipo dual o tipo muro, para ductilidades de 1,5 y 3,0 usualmente. A pesar de ser propensos a altos desplazamientos en sus niveles superiores y a grandes esfuerzos en sus elementos estructurales, se han seguido diseñado con un diseño sismorresistente tradicional, utilizando concretos de alta resistencia en los primeros niveles. Para cumplir con la filosofía del Código Sísmico de Costa Rica de prevenir el colapso de la edificación ante eventos sísmicos fuertes, se aumenta la rigidez de los elementos estructurales y se agregan muros de corte. Como efecto, los edificios son más rígidos y, en ciertos casos, más costosos. De acuerdo con esta filosofía de diseño, y para no aumentar drásticamente el costo de la obra, se permite que los elementos estructurales entren en el rango inelástico y, en algunos casos, hasta sufrir deformaciones permanentes, comprometiendo, a ese nivel, la funcionalidad de la estructura (CCSCR, 2014).

Países como Nueva Zelanda, Japón, Estados Unidos y Chile, entre otros, han implementado sistemas de aislamiento sísmico en la base de sus edificios, en su mayoría en edificios de baja a mediana altura. El uso de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (Lead Rubber Bearing, o LRB por sus siglas en inglés) ha probado ser la técnica de aislamiento sísmico más conveniente para edificios alrededor del mundo. Los LRB no sólo disipan gran parte de la energía que llega a la base de la estructura sino que también aumentan su período fundamental. Esto puede llegar a reducir a una cuarta parte las aceleraciones sísmicas en los elementos estructurales sujetos a ondas con períodos cortos, permitiendo que la superestructura se diseñe elásticamente para comportarse como un cuerpo rígido ante cargas dinámicas. Como resultado, disminuyen sus derivas y los daños en sus elementos no estructurales, que suelen ser más valiosos que la estructura en sí (PUCC, s.f.).

A pesar de los beneficios de implementar esta técnica en edificios de concreto reforzado en varios países del mundo, no se ha vuelto una práctica común en los diseños de edificios en Costa Rica; esto a pesar de que la sismicidad en el país es igual o superior que en los países mencionados anteriormente. Las fallas locales activas y el proceso de

subducción entre las placas tectónicas bajo el área continental de Costa Rica son las responsables de que Costa Rica esté catalogada como un país de alta sismicidad; el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR) clasifica al cantón de San José como una zona III, una de las de mayor sismicidad en el territorio nacional (CCSCR, 2014).

Como el diseño sismorresistente es gobernado por fuerzas y desplazamientos internos, utilizar la tecnología del aislamiento sísmico sería una opción por considerar ya que, al reducir la energía que entra a la estructura, limitaría las derivas y se disminuiría la demanda sobre los distintos elementos estructurales de una edificación. Además, el CSCR-10/14 permite adoptar nuevos métodos de diseño, siempre y cuando sean más rigurosos que los existentes en el mismo (CCSCR, 2014).

De manera general, el uso de LRB en la base de edificios permite diseños más eficientes y seguros. Las obras aisladas en su base pueden ser hasta cinco veces más seguras que las de base fija y, al ser sometidas a fuerzas sísmicas, sólo tendrían que resistir, por ejemplo, una décima parte de los esfuerzos generados en edificios con base fija (PUCC, s.f.). Por esta razón, parece conveniente considerar esta tecnología en el diseño de edificios altos, específicamente en aquellos que se están construyendo en Costa Rica.

Con base en lo anterior, el problema específico de investigación consiste en determinar si es posible usar sistemas de aislamiento sísmico, con éxito, en edificios de gran altura en el país, limitando la investigación al desempeño analítico. Quedarán otros aspectos por resolver en proyectos de investigación futuros, como por ejemplo: la estabilidad y durabilidad de los aisladores sísmicos, así como la diferencia en costos al diseñar edificios de concreto reforzado, de gran altura, con aislamiento sísmico.

## **1.2 Importancia**

Estudiar la aplicabilidad de los sistemas de aislamiento elastoméricos -con núcleo de plomo- en Costa Rica resulta importante, sabiendo que ha sido una técnica exitosa en el diseño sismorresistente de edificios alrededor del mundo, de baja a mediana altura principalmente, y que se ha estudiado por más de treinta años, pues garantizan la

seguridad y la tranquilidad de los ocupantes de un edificio durante un evento sísmico. Esto ya que en Costa Rica se ha dado un aumento importante en la construcción de edificios altos en años recientes, habiendo sido todos diseñados con sistemas sismorresistentes tradicionales (tipo muro, tipo dual) con base fija, y la técnica del aislamiento sísmico no es común en edificios con tales alturas. Por lo tanto, el análisis de nuevas tecnologías es sin duda de gran interés ya que pueden traer no sólo mejores desempeños estructurales (en resistencia y en servicio) en los sistemas utilizados sino, quizás, hasta reducciones importantes de costo.

Los análisis de este tipo deben involucrar la comparación en las derivas del edificio, en las fuerzas internas de sus elementos estructurales, en las aceleraciones en los distintos niveles del edificio, en sus ciclos de histéresis, así como en el desempeño inelástico del mismo y los costos de implementar esta tecnología; lo anterior respecto al diseño sismorresistente tradicional.

Dado lo anterior, la importancia de estudiar en este proyecto el tema de aislamiento sísmico en la base de un edificio de gran altura diseñado en Costa Rica resulta evidente pues, a pesar de que no es común aislar sísmicamente una estructura alta, sí se ha logrado en otros países, como se comentará en los antecedentes de esta investigación.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Comparar el desempeño analítico, ante cargas sísmicas, de un edificio de concreto reforzado de gran altura con un diseño sismorresistente tradicional contra otro que utilice sistemas de aislamiento elastoméricos –con núcleo de plomo-, en la ciudad de San José.



### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Realizar una investigación bibliográfica y resumir experiencias internacionales sobre el uso de sistemas de aislamiento sísmico en edificios de diferentes alturas y de concreto reforzado, principalmente.
- Seleccionar los acelerogramas para realizar el análisis elástico de respuesta en el tiempo, considerando la no-linealidad en los apoyos LRB, que servirá para comparar el desempeño analítico del edificio Sabana Real, en San José, con y sin aislamiento sísmico, ante cargas sísmicas reales y escaladas a la demanda del CSCR-10/14.
- Implementar la mejor configuración de un sistema de aislamiento sísmico basal, mediante LRB, en el modelo estructural del edificio Sabana Real.
- Realizar el análisis estructural comparativo obteniendo los parámetros de desempeño del edificio Sabana Real para las condiciones de base con y sin aislamiento sísmico.

### **1.4 Antecedentes teóricos y prácticos del problema**

La tecnología de colocar aisladores sísmicos elastoméricos en la base de edificios ha sido ampliamente utilizada alrededor del mundo, generalmente usando LRB. Dentro de los líderes en este campo destacan Nueva Zelanda, Japón, Estados Unidos y Chile. A continuación se comentan algunos antecedentes teóricos y prácticos del problema, divididos según la altura de la obra aislada.

#### **Edificios de baja a mediana altura**

El LRB se inventó en Nueva Zelanda en 1982 cuando se le agregó al aislador elastomérico usual un núcleo de plomo porque aumentaba su amortiguamiento y se recrystalizaba rápidamente después de sufrir deformaciones plásticas (Robinson, 1998).

El museo Te Papa Tongarewa, de concreto reforzado y construido en 1993 en Nueva Zelanda, tiene cinco niveles (23 m en altura), un área total de 35 000 m<sup>2</sup> y se asienta sobre 142 LRB y varios aisladores de fricción debajo de sus muros de corte. Para un

sismo con período de retorno de 250 años, la aceleración máxima bajó de 1,02g con base fija a 0,33g con base aislada, siendo  $g$  la gravedad. Otros edificios históricos de Nueva Zelanda de mampostería confinada y aislados de base lograron aumentar sus períodos fundamentales en un factor de seis (Robinson, 1998).

Por otro lado, Japón demostró que el aislamiento sísmico es una alternativa barata y segura ya que mejora el desempeño estructural del edificio ante fuerzas sísmicas. Los beneficios probados fueron: drástica reducción en los daños, disminución en las derivas del edificio y poca afectación en su funcionabilidad, algo difícil de controlar en estructuras sin aisladores sísmicos (Kawamura et al., 2000).

Un ejemplo de lo anterior es el edificio principal de la Corporación Taisei, construido en 1964 en el Pacífico-Central de Japón, una zona altamente sísmica. El edificio es de concreto reforzado y tiene 16 niveles. Por la amenaza de que ocurra un sismo de  $M_w=8$ , se colocaron 22 LRB de 70-80 cm de diámetro en el centro de las columnas del octavo nivel y el período fundamental de la superestructura aumentó en un factor de tres. De un análisis elástico-lineal se determinó que las aceleraciones sísmicas y la fuerza cortante en ese nivel se reducirían a una décima parte de las originales (Kawamura et al., 2000). A pesar de que este caso no sea de aislamiento sísmico en la base de una estructura, muestra los beneficios de la tecnología, aun implementándola en niveles intermedios.

Otro ejemplo es un edificio japonés de telecomunicaciones, aislado de su base, que soportó las cargas sísmicas del Gran Terremoto de Hanshin de 1995 ( $M_w=6,9$ ), sin sufrir daños significativos. La aceleración en el sexto nivel fue de 0,13g en comparación con 0,40g en la base (Robinson, 1998). Los beneficios del aislamiento sísmico son obvios ya que la aceleración se redujo en los niveles superiores, contrario a lo que sucede en los edificios de base convencional donde la aceleración aumenta en dichos niveles ya que en esos puntos se tienen mayores desplazamientos laterales y la aceleración y el desplazamiento son directamente proporcionales.

Por otro lado, Estados Unidos también lidera el campo del aislamiento sísmico. El Terremoto de Northridge ( $M_w=6,7$ ) de 1994 en Los Ángeles fue uno de los más

desastrosos en la zona. El hospital de la Universidad del Sur de California (USC), de siete niveles y con marcos de acero, se encuentra aislado sobre LRB y, ante la demanda sísmica del terremoto, tuvo aceleraciones de 0,21g en la azotea y de 0,49g en la base (Robinson, 1998).

Chile también ha desarrollado la tecnología del aislamiento sísmico en los últimos años. Durante el terremoto de Chile del 27 de febrero del 2010 ( $M_w=8,8$ ), un edificio de cuatro niveles, de concreto reforzado en el primer nivel y de mampostería confinada en los últimos tres niveles, no sufrió daños significativos. El edificio logró reducir la aceleración a 0,22g en niveles superiores, comparado con 0,30g en la base; sin embargo, se amplificó la aceleración vertical (Boroschek et al., 2012).

En cuanto a Costa Rica, la técnica del aislamiento sísmico basal no es adoptada por la mayoría de los diseñadores estructurales en el país. A pesar de que existen varios estudios analíticos y nacionales sobre el tema, sólo se ha construido un edificio con aislamiento sísmico en el país. Este es el caso del nuevo centro de datos para la Caja de Ande (González y Zamora, 2013).

Dicho edificio está situado en San José, Costa Rica, y es de concreto reforzado. Su estructura es tipo muro, presenta regularidad tanto en planta como en altura y tiene dos niveles. La losa de 50 cm de espesor utilizada como entrepiso a nivel del terreno está desligada del terreno mediante nueve péndulos de fricción de doble superficie cóncava, que se apoyan sobre pedestales cimentados en placas aisladas, unidas con vigas de acople. Mediante este sistema de aislamiento, se pudo reducir el cortante basal en un 50% y también aumentar el nivel de servicio para controlar los daños producto de un sismo extremo con período de retorno de 1000 años, en comparación con el objetivo de desempeño de proteger la vida humana establecido por el CSCR para un período de retorno de 475 años. Además, las fuerzas internas generadas por el sismo extremo son menores al cortante de agrietamiento teórico, por lo que las grietas que se presenten en los elementos estructurales serán de baja dimensión y no requerirán de una reparación urgente. Lo anterior garantiza que el centro de datos

mantenga su funcionamiento, aun durante este nivel de demanda sísmica (González y Zamora, 2013).

De manera analítica, en una tesis de licenciatura del Tecnológico de Costa Rica de Cubillo (2015), se estudió la respuesta sísmica de tres edificios bidimensionales de concreto reforzado y tipo marco (10, 15 y 20 niveles), aislados de su base, y se comprobó que:

- Los modos de vibración mayores participan más en edificios altos.
- En los suelos blandos ocurre una amplificación de ondas sísmicas en la estructura.
- El aislamiento sísmico tiene mayores beneficios en edificios de menor altura ya que es capaz de alargar más su período fundamental.

Así mismo, Brenes (2001), en su tesis de licenciatura de la Universidad de Costa Rica, demostró que edificios entre cuatro y ocho niveles (incluyendo sótanos) pueden incrementar su período de vibración en un factor de 3-4, en caso de utilizar aislamiento sísmico. Debido a esto, la demanda sísmica se reduce en hasta cinco veces y la aceleración basal, que puede llegar a ser un noveno de la inicial, se mantiene constante a lo largo de la altura del edificio. Además, encontró que los sistemas de aislamiento sísmico son menos eficientes conforme aumenta la demanda de carga axial puesto que los aisladores sísmicos se deben rigidizar para resistir dicha demanda, reduciendo su flexibilidad lateral.

### **Edificios de gran altura**

La sede de la Corporación Shimizu, en Tokio, fue construida en el 2012 y es de los primeros edificios altos de concreto reforzado (100 m de altura) en construirse sobre aisladores sísmicos, específicamente sobre: 32 LRB, 10 aisladores elastoméricos comunes y 10 amortiguadores viscosos. Estos se colocaron entre el primer y segundo sótano. De acuerdo con un análisis de respuesta elástica, la superestructura puede experimentar una reducción del 20% en la aceleración sísmica, por nivel. Por esta razón, los muros estructurales, que reciben el 80% de la fuerza cortante de la

estructura sismorresistente, se diseñaron con un menor espesor. La superestructura se diseñó para que se comporte de forma rígida ante sismos extremos, sin sufrir daños (Nakagawa et al., 2015). Por lo tanto, aun en edificios altos, el aislamiento sísmico es ventajoso.

Otro líder en tecnologías antisísmicas en edificios altos es Chile, de los mejores en Latinoamérica. El condominio Torre del Sol tiene 19 niveles (46,6 m de altura), un área de 19 000 m<sup>2</sup> y se encuentra aislado de su base mediante LRB. Este es el edificio aislado más alto de Latinoamérica. Se utilizaron LRB por su probada resistencia, facilidad de modelación, resistencia ante agentes ambientales y buen funcionamiento (independientemente de la frecuencia de carga). Por medio de análisis dinámicos no-lineales y con los acelerogramas de siete sismos históricos de la zona, se determinó que el aislamiento sísmico permite una reducción de hasta 88% en la fuerza cortante en la base del edificio. Además, se comprobó que los mayores desplazamientos ocurren en los aisladores sísmicos (Boroschek et al., 2012).

Mencionado lo anterior, es necesario recalcar que el aislamiento sísmico en edificios de gran altura y de concreto reforzado tiene retos significativos. Esto ya que una estructura de este tipo es pesada y demanda una alta capacidad axial sobre los aisladores sísmicos, reduciendo su flexibilidad lateral y, por lo tanto, afectando su habilidad de alargar el período de la superestructura. Tal fue el caso del Edificio Ñuñoa Capital, dos estructuras de 33 niveles (cuatro sótanos) de concreto reforzado. Uno de los retos principales de los diseñadores fue encontrar una combinación de aisladores sísmicos y amortiguadores viscosos que tuvieran la suficiente rigidez vertical para resistir los altos esfuerzos de compresión a los que estarán sometidos pero que también permitieran una flexibilidad lateral tal que el período de la superestructura aumentara y redujera la demanda sísmica sobre los elementos estructurales. Además, al ser estructuras altas y con una relación de aspecto ancho-alto baja, controlar las tensiones en los aisladores sísmicos fue un problema (Boroschek et al., 2017).

Debido a que aumentar el período de vibración en estructuras altas no es sencillo, es común combinar LRB y amortiguadores viscosos para proporcionar un amortiguamiento

mayor y así reducir la demanda de carga sobre los distintos elementos estructurales, como se mencionó en varios de los casos anteriores.

### **Conclusiones de estudios generales**

En otros estudios estadounidenses, reportados por Alhan y Gavin (2004), se han dado algunas recomendaciones para tomar en cuenta a la hora de implementar el sistema de aislamiento sísmico en edificios:

- Edificios con aislamiento sísmico y construidos cerca de una falla local podrían ser sometidos a ondas sísmicas con mayor frecuencia, provocando mayores desplazamientos en el sistema de aislamiento sísmico y afectando la estabilidad del edificio, por lo que podrían llegar a ser contraproducentes.
- Si se aumenta el amortiguamiento en los aisladores sísmicos se reducirían las derivas en la superestructura pero aumentarían las aceleraciones dentro de ella.
- Aumentar el límite de fluencia en los aisladores sísmicos disminuiría el desplazamiento en el nivel de aislamiento pero aumentaría las derivas en los niveles superiores.
- Los sistemas de aislamiento sísmico que almacenan energía de histéresis reducen más los desplazamientos relativos y la aceleración sísmica.

Por otro lado, Fernández (1997), en su tesis de maestría de la Universidad de Costa Rica, también demostró que el período de la estructura con base fija influye directamente en los beneficios del aislamiento sísmico pues estos serán mayores en estructuras con bajos períodos de vibración. Además, demostró que los modos de vibración superiores en estructuras aisladas tienen poca participación por lo que las frecuencias relacionadas con dichos modos no son transmitidas a la superestructura. Finalmente, Fernández concluyó que el aislamiento sísmico reduce la torsión en planta producto de la disminución en la carga lateral que llega a la estructura, pero enfatizó en que los problemas de rigidez son más críticos que los problemas de excentricidad.

En cuanto al análisis de costos a nivel nacional, en una tesis de licenciatura de la Universidad de Costa Rica de Brenes (2001), se demostró que el uso de aislamiento

sísmico permite una reducción de hasta un 67% en las dimensiones originales de los elementos estructurales. Esta tecnología permite reducir los costos de obra gris en un 30%, pero aumenta el costo del sistema electromecánico dada la demanda de un sistema flexible que se acomode a los desplazamientos del sistema de aislamiento. Finalmente, concluyó que, si el costo del sistema de aislamiento sísmico es menor a un 9% del costo final de la edificación, resulta rentable utilizar esta tecnología; la estimación anterior está limitada a edificios entre cuatro y ocho niveles, incluyendo sótanos.

Como la mayoría de las investigaciones costarricenses sobre aislamiento sísmico han sido limitadas a edificios de baja altura, este proyecto pretende determinar los beneficios que tendría esta tecnología en edificaciones existentes de gran altura y diseñadas con la normativa sismorresistente de Costa Rica, a pesar de que ya cuentan con un período de vibración alto y la reducción de la demanda sísmica podría no ser significativa.

## **1.5 Alcance**

El alcance de este proyecto es comparar el desempeño analítico ante cargas sísmicas de un edificio de concreto reforzado de gran altura, diseñado con una cimentación convencional y otro con el uso de sistemas de aislamiento elastoméricos -con núcleo de plomo-, para la ciudad de San José, mediante un análisis elástico de respuesta en el tiempo que considere la respuesta no-lineal en los apoyos LRB. La razón por la cual no se realizó un análisis no-lineal de respuesta en el tiempo es debido a la complejidad de dicho análisis sobre los muros estructurales (elemento sismorresistente principal del edificio utilizado en esta investigación). Para dicho análisis, se utilizaron los acelerogramas de tres terremotos con gran impacto a nivel nacional.

En este trabajo se estudió el edificio Sabana Real, cuya descripción se encuentra en el capítulo 4. Para considerar el aislamiento sísmico basal en dicho edificio fue necesario modificar las condiciones de apoyo de los muros del primer nivel en su modelo estructural original. Este modelo fue facilitado por la empresa de diseño estructural

IECA Internacional S.A, que también suministró los planos estructurales para efectos de análisis. Queda fuera del alcance de este proyecto rediseñar el edificio considerando los beneficios del aislamiento sísmico.

Además, este estudio no consideró el efecto de fallas locales cercanas al edificio. Estas podrían generar pulsos de ondas con períodos cortos, afectando la respuesta estructural del edificio aislado y demandando un desplazamiento mayor en el sistema de aislamiento sísmico.

Dada la información anterior, este proyecto está limitado a:

- **Límites geográficos:** se condiciona a edificios en el distrito de Mata Redonda, pues ahí se encuentra el edificio Sabana Real, cimentados sobre el mismo tipo de suelo que el edificio en análisis (suelo S3, según la clasificación del CSCR-02).
- **Límites temporales:** se utilizaron acelerogramas de tres de los terremotos con epicentro en Costa Rica que causaron los mayores daños a nivel nacional. Por lo tanto, el comportamiento estructural del edificio está limitado a la excitación sísmica generada por estos.
- **Límites específicos:** los resultados de esta investigación están limitados a edificios de concreto reforzado de tipo muro, con una altura similar a los 17 niveles sobre el terreno, utilizando concretos de alta resistencia (CAR) en los primeros niveles y con irregularidad moderada. Además, deberán ser edificios con uso comercial-habitacional. El comportamiento estructural de un edificio, ante cargas sísmicas, depende de los factores mencionados anteriormente, así como del tipo de suelo.

## 1.6 Limitaciones

- El edificio se analizó en su condición de diseño pues no se consideraron deterioros ni diferencias constructivas con el modelo estructural del mismo.
- Dada la complejidad analítica y el esfuerzo computacional de hacer un análisis no-lineal de respuesta en el tiempo para elementos tipo muro (como los que hay



en el edificio en cuestión), se decidió realizar una investigación cualitativa entre el edificio Sabana Real con y sin aislamiento sísmico, teniendo como criterio principal la incursión de los elementos estructurales principales (muros) en el rango inelástico. Por lo tanto, el comportamiento no-lineal se limitó a los sistemas de protección sísmica.

- Los acelerogramas que se utilizaron para el análisis de respuesta en el tiempo del edificio no necesariamente fueron medidos en las inmediaciones de La Sabana ya que los registros disponibles, ideales para el análisis, eran limitados. Por lo tanto, puede que no se refleje el efecto del sitio en la respuesta estructural del edificio.
- Dado que el CSCR-10/14 no establece la demanda sísmica vertical para las distintas zonas sísmicas de Costa Rica, los espectros de respuesta de aceleración vertical se asumieron como  $2/3$  del horizontal establecido por el CSCR-10/14, tanto para el sismo de diseño como para sismo máximo.
- La normativa NCh-2745 requiere utilizar acelerogramas verticales en el análisis de respuesta en el tiempo pero no especifica cómo escalar las demandas verticales. Por esta razón, se adoptó un método de escalamiento similar al propuesto por la normativa ASCE 7-10 para los acelerogramas horizontales.
- No se abarcaron criterios geotécnicos ni constructivos que deben ser considerados al diseñar y construir una edificación con aislamiento sísmico.
- La investigación no incluye un análisis de costos asociado a aislar basalmente un edificio de concreto reforzado de gran altura. La decisión de adoptar o no un sistema de aislamiento sísmico en el edificio se basó únicamente en el desempeño estructural, pero en la realidad también es necesario considerar el factor económico.

## **1.7 Normativa aplicable**

A continuación se procede a dar un breve resumen de los objetivos de cada una de las normas consultadas en esta investigación y cómo se relacionaron con esta:

### **Código Sísmico de Costa Rica (CSCR-10/14) y comentario**

Este código establece los requisitos mínimos que se deben tomar en consideración a la hora de analizar, diseñar y construir edificaciones (principalmente), desde un punto de vista sismorresistente, que se vayan a desarrollar en Costa Rica (CCSCR, 2014). El edificio Sabana Real se diseñó cumpliendo con el CSCR-02 y la importancia de esta normativa en el proyecto va dirigida hacia el análisis y no tanto al diseño.

Con ayuda de este código se clasificó la estructura y se determinó su regularidad tanto en planta como en altura. Además, se obtuvieron los espectros de respuesta de aceleración horizontal de la estructura para su sitio de cimentación y zona sísmica, con ductilidad y sobrerresistencia unitaria. Por otro lado, esta normativa incluye requisitos para el análisis de respuesta en el tiempo de estructuras, pero no con el detalle que lo hace la norma ASCE 7-10.

### **Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica (NCh275-13)**

Esta normativa es chilena y es el resultado de la tropicalización del capítulo de aislamiento sísmico del Uniform Building Code de 1997 (INN, 2013). Por lo tanto, contiene requisitos y sugerencias para diseñar y analizar edificaciones que cuentan con un sistema de aislamiento sísmico.

Chile es de los mejores líderes latinoamericanos en el desarrollo de tecnologías de aislamiento sísmico y, como Costa Rica no tiene una normativa específica para este tema, se utilizó la normativa NCh275-13 para tener un criterio de revisión del sistema de aislamiento sísmico por utilizar en conjunto con la siguiente normativa estadounidense.

### **Cargas mínimas de Diseño para Edificios y Otras Estructuras (ASCE 7-10)**

Esta normativa estadounidense plantea los requisitos mínimos de carga a la hora de diseñar y analizar edificaciones y otras estructuras (ASCE, 2010). También, trae un capítulo sobre cómo debe ser el análisis de respuesta en el tiempo y de cómo seleccionar y escalar los acelerogramas que se van a usar en el mismo. Por lo tanto, esta normativa se usó con ese fin. Además, incluye un capítulo de cómo revisar

aisladores sísmicos, lo cual se complementó, en este proyecto, con las disposiciones de la normativa NCh275-13.

## **2 Marco teórico**

### **2.1 Sismología general**

Un sismo ocurre cuando se libera la energía almacenada en la corteza terrestre, debido a deslizamientos de la misma a lo largo de una falla preexistente. Dependiendo del tamaño de la falla, se pueden producir terremotos de gran magnitud. Estas fallas tienen una forma irregular, conformada por fracturas en varias direcciones. La mayoría de los terremotos ocurren en fallas situadas en los bordes entre placas tectónicas donde, al moverse constantemente, se deforman sus bordes rocosos y esto va almacenando energía elástica hasta llegar a un punto donde se vence la resistencia friccional del material y estas vuelvan a su posición original. A pesar de que el desplazamiento y la liberación de energía ocurren en el punto más débil de la falla, conocido como el hipocentro, el desplazamiento se puede seguir dando a lo largo de la falla hasta encontrar un punto débil (zonas que no han superado la resistencia friccional del elemento o discontinuidades en el material). Este desplazamiento consecutivo aumenta el nivel de esfuerzos en zonas alejadas de la falla, provocando un nuevo desplazamiento y la liberación de gran parte de la energía elástica acumulada en ese tramo de la falla (Tarbuck et al., 2005).

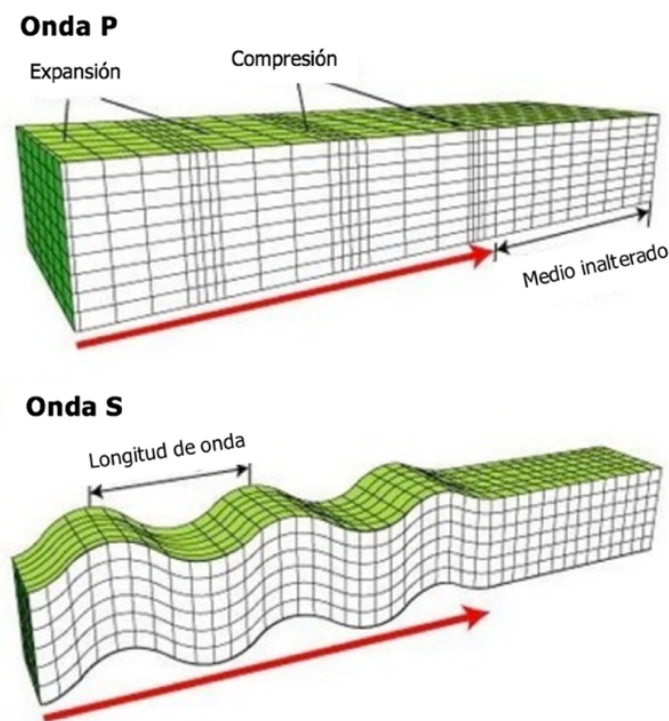
Una vez que se libera la energía elástica, se generan ondas sísmicas que se desplazan en las dos direcciones horizontales y en la dirección vertical, todas a lo largo de la falla. El comportamiento de estas ondas sísmicas depende de la manera en que interactúen con el medio que atraviesan, de la distancia que recorran y de su ubicación en la tierra. Además, están influenciadas por el tipo de falla que genere el evento sísmico. Una superficie de rotura pequeña genera sismos de corta duración. Sin embargo, zonas de ruptura grandes implican fuertes vibraciones y largas duraciones de ondas sísmicas, provocando posibles sismos de gran magnitud (Tarbuck et al., 2005).

El comportamiento de estas ondas sísmicas se registra en sismogramas. Estos registran la sacudida sísmica en la dirección y posición donde se coloque el sismógrafo, instrumento de medición que detecta el movimiento del terreno en la dirección en la

que trabaje; generalmente, se coloca un sismógrafo que registre las vibraciones en el sentido norte-sur, otro en el sentido este-oeste y otro en el sentido vertical.

Gracias a estos registros es que se puede caracterizar el comportamiento de las ondas sísmicas, ya sea por su forma de propagarse, su velocidad o su amplitud. Estas pueden ser divididas en dos grupos principales. Las ondas de cuerpo son aquellas que viajan en el interior de la tierra y son las que se registran primero en los sismogramas. Por otro lado, las ondas superficiales son aquellas que viajan en el exterior de la tierra (cerca de la superficie) y se registran después de las ondas de cuerpo (Tarbuck et al., 2005).

Las ondas de cuerpo se dividen en dos tipos: ondas primarias (P) y ondas secundarias (S). A continuación, se muestra el comportamiento de dichas ondas en el interior de la tierra:



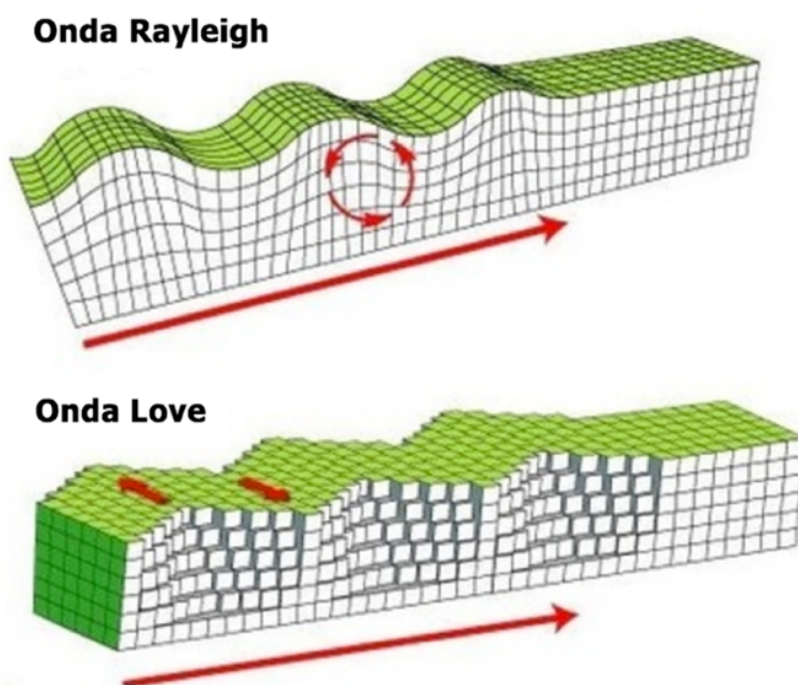
**Figura 1.** Ondas sísmicas de cuerpo.

Fuente: University of Waikato, 2007.

Modificado por: Eskenazi, 2018.

Como se observa en la figura anterior, las ondas primarias actúan en el sentido de propagación de la onda, comprimiendo y expandiendo el medio. Por esta razón, pueden viajar en todo tipo de material (sólido, líquido y gas) ya que estos se oponen a cambios volumétricos impuestos por la acción de las ondas P y son capaces de recuperar elásticamente su estado inicial una vez que las ondas cesen. Por otro lado, las ondas secundarias se mueven de forma sinusoidal en la dirección perpendicular a la propagación de la onda. Este comportamiento implica un cambio de forma, por lo que este tipo de onda sólo es capaz de viajar a través sólidos (Tarbuck et al., 2005).

Por otro lado, se encuentran las ondas superficiales, que a su vez se dividen en ondas Rayleigh (R) y ondas Love (L). Su comportamiento en la superficie de la tierra se muestra a continuación:



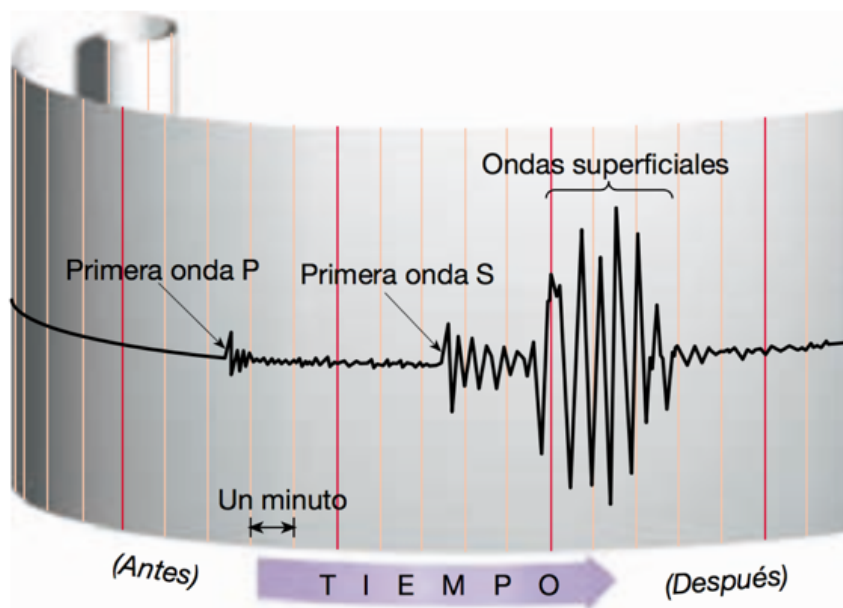
**Figura 2.** Ondas sísmicas de superficie.

Fuente: University of Waikato, 2007.

Modificado por: Eskenazi, 2018.

De la figura anterior se observa que las ondas R presentan un comportamiento elíptico retrógrado alrededor de la dirección de propagación de la onda (LIS, 2011d). Por otro lado, las ondas L presentan un comportamiento sinusoidal en el plano horizontal, perpendicular a la dirección de la propagación de las ondas. Por lo tanto, las ondas L son las que más afectan a las cimentaciones de obras estructurales (Tarbuck et al., 2005).

Como se mencionó anteriormente, un sismograma (o acelerograma en el caso específico de un registro de aceleración sísmica) registra estos tipos de onda en la dirección y posición en la que se coloque el instrumento de medición. Un ejemplo típico se muestra a continuación:



**Figura 3.** Registro de ondas sísmicas en un acelerograma.

Fuente: Tarbuck et al., 2005.

Como se puede observar, las ondas de cuerpo, conformadas por ondas primarias (P) y ondas secundarias (S), se registran primero ya que son las que tienen mayores velocidades; específicamente, las ondas primarias viajan más rápido que las ondas secundarias pero las ondas secundarias tienen una mayor amplitud. Después de que se registran las ondas de cuerpo, se manifiestan las ondas superficiales cuya velocidad

es inferior a las ondas de cuerpo pero tienen mayor amplitud. Además, como las ondas superficiales no viajan por el interior de la tierra, estas generalmente mantienen su amplitud por un mayor período de tiempo, por lo que son el tipo de onda que más dañan a las estructuras (Tarbuck et al., 2005). Generalmente, una mayor amplitud de onda implica una mayor cantidad de energía transportada (LIS, 2011d). Esto justifica el argumento anterior y se debe tener especial cuidado con los sismos poco profundos ya que tienen una mayor presencia de ondas superficiales (ILCE, s.f.) y, por lo tanto, provocan efectos devastadores si están situados cerca de centros urbanos, dependiendo de la vulnerabilidad sísmica de las obras civiles.

### **Magnitud e intensidad**

Un sismo se puede caracterizar por medio de su magnitud y de su intensidad. La magnitud es un parámetro objetivo y se calcula con base en la energía liberada. En cambio, la intensidad es un parámetro subjetivo que depende del nivel de daño y de la percepción del mismo por parte de las personas.


La magnitud de un sismo depende de la energía liberada y no de donde se mida. Se puede medir en escala de Richter, con base en la amplitud máxima de ondas, o en la escala de magnitud de momento ( $M_w$ ), con base en el área de ruptura de la falla y el máximo desplazamiento que esta experimente (LIS, 2011b). La escala de Richter se desarrolló para medir la magnitud de los sismos poco profundos en el Sur de California. Sin embargo, se satura a escalas altas por lo que no predice de manera correcta un sismo de gran magnitud. Por esta razón, se desarrolló la escala de magnitud de momento, que examina el período largo de las ondas sísmicas. Esta última se calibró de manera que los sismos de baja/media magnitud tuvieran una magnitud similar a la calculada mediante la escala de Richter. Sin embargo, su utilidad radica en sismos de gran magnitud pues es la única escala de magnitud que no se satura a altas escalas (Tarbuck et al., 2005).

Por otro lado, la intensidad es el nivel de daño que produce un sismo y la percepción que tienen las personas sobre él; a diferencia de la magnitud, este parámetro sí depende del lugar de medición y se puede medir en la escala de Mercalli Modificada.



Esta escala, según se muestra a continuación, consta de doce grados de intensidad (LIS, 2011b):

**Cuadro 2.** Tabla de Intensidad de Mercalli Modificada.

| Grado                               | <b>Tabla de Intensidad Mercalli Modificada (IMM)</b><br>Descripción  |  |
|-------------------------------------|--|---|
| <b>I. Imperceptible por humanos</b> | Imperceptible para las personas. Sólo puede ser detectado por los sismógrafos.   |   |
| <b>II. Muy leve</b>                 | Sentido sólo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios u otra situación favorable.  |   |
| <b>III. Leve</b>                    | Perceptible por algunas personas dentro de los edificios, especialmente en pisos altos. Objetos colgados oscilan de un lado a otro. Muchos no lo reconocen como sismo. Sensación semejante al paso de un camión pequeño.   |   |
| <b>IV. Moderado</b>                 | Sentido por la mayoría de personas dentro de los edificios y por pocas personas en el exterior durante el día. Durante la noche, algunas personas pueden despertarse. Platos, puertas y ventanas vibran. Las paredes y armazones de madera crujen. Los automóviles detenidos se balancean. Sensación semejante al paso de un camión grande.  |   |
| <b>V. Un poco Fuerte</b>            | Sacudida sentida casi por todas las personas, quienes duermen se despiertan. Los líquidos se agitan y algunos se derraman. Los objetos pequeños e inestables son desplazados o volcados, unos pocos pueden llegar a romperse. Las puertas se balancean, se abren o se cierran. Los cuadros de las paredes se mueven. Se afectan los péndulos de los relojes mecánicos.   |   |
| <b>VI. Fuerte</b>                   | Sacudida sentida por todas las personas; muchas se asustan y salen al exterior. La gente camina inestablemente. Algunas piezas de vajilla o vidrios de ventanas se rompen. Adornos, libros, etc., caen de las estanterías. Los cuadros se caen de las paredes. Los muebles se mueven o vuelcan. Pocos casos de agrietamiento en paredes de block, caída de repellos débiles y agrietamiento en paredes de adobe y bahareque. Se observa la sacudida en los árboles, postes y otros objetos altos. Las campanas pequeñas suenan en iglesias, escuelas y colegios.                           |   |
| <b>VII. Muy fuerte</b>              | Difícil mantenerse de pie. Muebles dañados. Daños insignificantes en estructuras de buen diseño y construcción. Daños leves a moderados en estructuras ordinarias bien construidas. Daños considerables estructuras pobremente construidas. Perceptible por personas en vehículos en movimiento. Caída de cielos rasos, ladrillos sueltos, piedras, tejas, cornisas y otros elementos arquitectónicos no asegurados. Se producen olas en estanques y el agua se ve enturbiada por el lodo. Pequeños corrimientos y hundimientos en arena o montones de grava. Las campanas grandes suenan. |   |
| <b>VIII. Destructivo</b>            | Conducción de autos afectada. Daños ligeros en estructuras de diseño especialmente bueno; considerable en estructuras ordinarias con colapso parcial; grande en estructuras pobremente construidas. Los muebles pesados se vuelcan. La estructura de las casas se mueve sobre los cimientos si no están sujetas; trozos de pared sueltos o arrancados. Ramas de árboles rotas. Arena y lodo son proyectados en pequeñas cantidades. Cambios en el caudal o temperatura de fuentes y pozos. Grietas en suelo húmedo y pendientes fuertes.   |   |
| <b>IX. Ruinoso</b>                  | Pánico generalizado. Los edificios bien construidos sufren un daño considerable. Daño general en los cimientos. Las estructuras de armazón que no están bien cimentadas se desplazan. Armazones arruinados. Daños serios en embalses. Tuberías subterráneas rotas. Amplias grietas en el suelo. En áreas de aluvión hay eyección de arena y barro, aparecen fuentes y volcanes de arena.   |   |
| <b>X. Desastroso</b>                | Algunas estructuras de madera bien construidas quedan destruidas. La mayoría de las construcciones y estructuras de armazón destruidas con sus cimientos. Puentes destruidos. Daños serios en presas, diques y terraplenes. Agrietamiento considerable en el terreno; ocurren grandes deslizamientos de taludes. El agua salta de las orillas de los canales, ríos, lagos, etc. Arena y barro desplazados horizontalmente en playas y tierras llanas. Las vías de los trenes llegan a doblarse ligeramente.  |   |
| <b>XI. Muy desastroso</b>           | Muchos edificios colapsan. Algunos puentes destruidos. Las vías de los trenes se doblan de forma considerable. Tuberías subterráneas completamente fuera de servicio.  |   |
| <b>XII. Catastrófico</b>            | Casi todo se destruye. Los objetos son arrojados al aire. Las ondas quedan "fossilizadas" en el terreno en forma pliegues. Perturbaciones de las cotas de nivel (ríos, lagos y mares). Se puede observar el desplazamiento de grandes masas de rocas.  |   |

Fuente: RSN, s.f.b.

A pesar de que la escala de Mercalli Modificada es ampliamente utilizada a nivel mundial, tiene un problema y es que fue definida para edificios de California. Por lo tanto, no considera diferencias en la densidad de población, en la calidad constructiva ni en el suelo de cimentación para otros lugares del mundo. Es decir, dos sismos con magnitud diferente podrían ser catalogados bajo la misma escala de intensidad y es por esto que esta escala de intensidades no mide la dimensión de un sismo de manera precisa (Tarbuck et al., 2005).

Otra limitación de las escalas de intensidad en general es que sólo pueden ser aplicadas a zonas pobladas, por lo que no es posible conocer la intensidad de un sismo en una región remota de la tierra (Tarbuck et al., 2005).

## **Amplificación de ondas sísmicas en suelos blandos**

Las ondas sísmicas también se pueden ver afectadas por el estrato que atraviesen. Una onda que atravesase un estrato de roca o suelo firme, no encuentra problema atravesándolo por lo que lo hace de manera rápida (poca duración) y las ondas sísmicas no sufren amplificación alguna. Sin embargo, ocurre lo contrario cuando una onda sísmica atraviesa un estrato de suelo blando o poco consolidado. Este tipo de suelo no es tan eficiente transmitiendo energía sísmica como lo es un suelo denso/rígido, por lo que la onda tarda más atravesándolo y su amplificación aumenta (DNR, 2012).

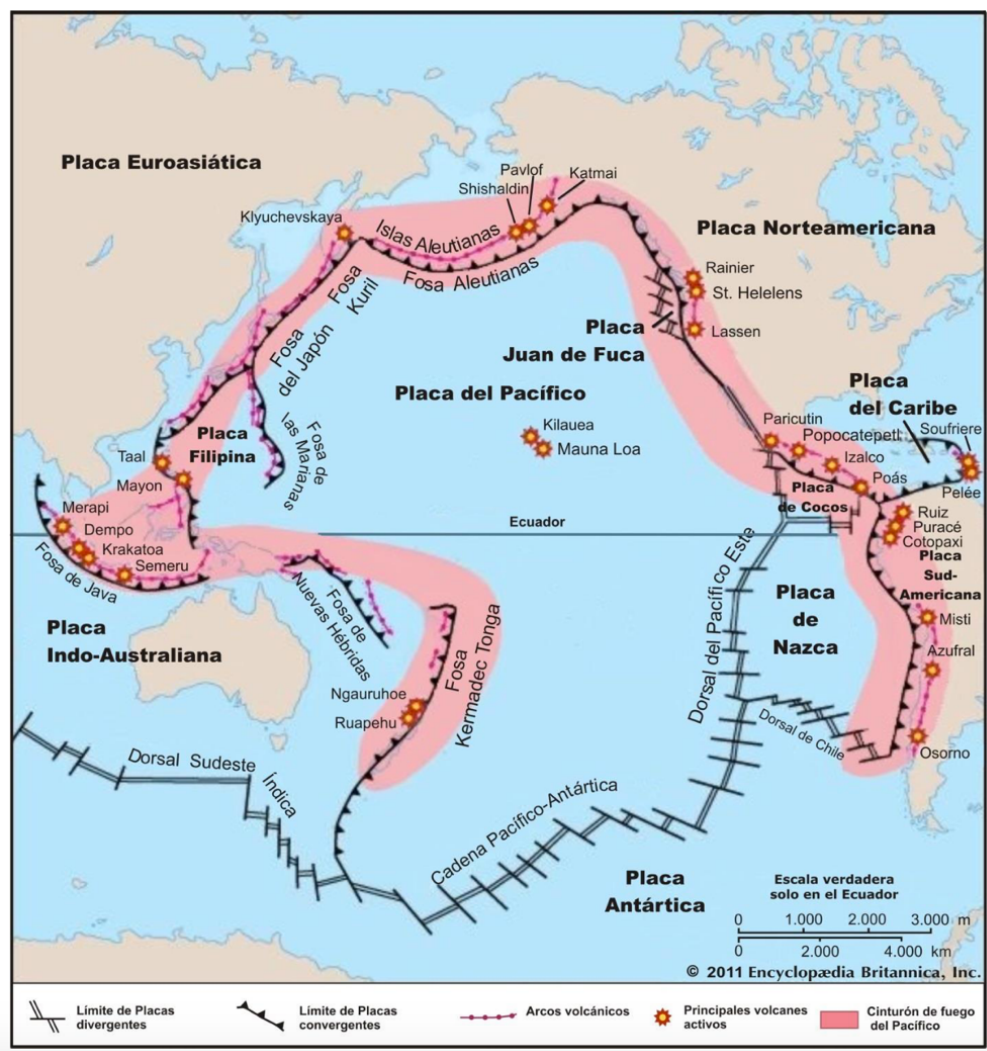
En resumen, el fenómeno de amplificación de ondas sísmicas debido a suelos blandos deja como resultado ondas con mayores amplitudes, menores frecuencias y mayores duraciones. Por lo tanto, estructuras sobre suelos blandos son sometidas a sacudidas sísmicas mayores para rangos de frecuencias más bajas (LIS, 2011a).

La amplificación de ondas sísmicas también puede ocurrir cuando el material que penetra la onda tiene una frecuencia de vibración igual a la de la onda atravesándolo. En este caso, ocurre resonancia ya que ambos elementos vibran de la misma forma y la amplitud de las ondas aumenta. El mismo fenómeno ocurre cuando las ondas sísmicas que llegan a la base de las estructuras tienen la misma frecuencia de vibración que las estructuras, provocando una mayor amplitud en la respuesta (Tarbuck et al., 2005). Por esta razón, hay que tener especial cuidado con edificios altos (altos períodos de vibración) cimentados sobre suelos blandos, que pueden aumentar el período de las ondas sísmicas y entrar en resonancia con los edificios.

## **2.2 Sismicidad en Costa Rica**

Costa Rica es parte del Cinturón de Fuego del Pacífico, zona que contiene el 80% de los volcanes a nivel mundial. Este cinturón de volcanes, mostrado en la siguiente figura, fue formado por el proceso de subducción entre varias placas tectónicas, proceso mediante el cual una placa se introduce debajo de otra y provoca la expulsión del magma, formando los volcanes (INPRES, s.f.). Además, este proceso conlleva una

intensa actividad sísmica por lo que gran parte de los terremotos a nivel mundial ocurren dentro de este cinturón.



**Figura 4.** Cinturón de Fuego del Pacífico.

Fuente: INRPES, s.f..

Como se mencionó anteriormente, el proceso de subducción entre placas tectónicas provoca una gran actividad sísmica. En el caso de Costa Rica, la subducción ocurre entre la placa de Cocos y la placa del Caribe, siendo la del Cocos la que se introduce debajo de la placa del Caribe. La ubicación de estas se muestra a continuación en un mapa tectónico del occidente:

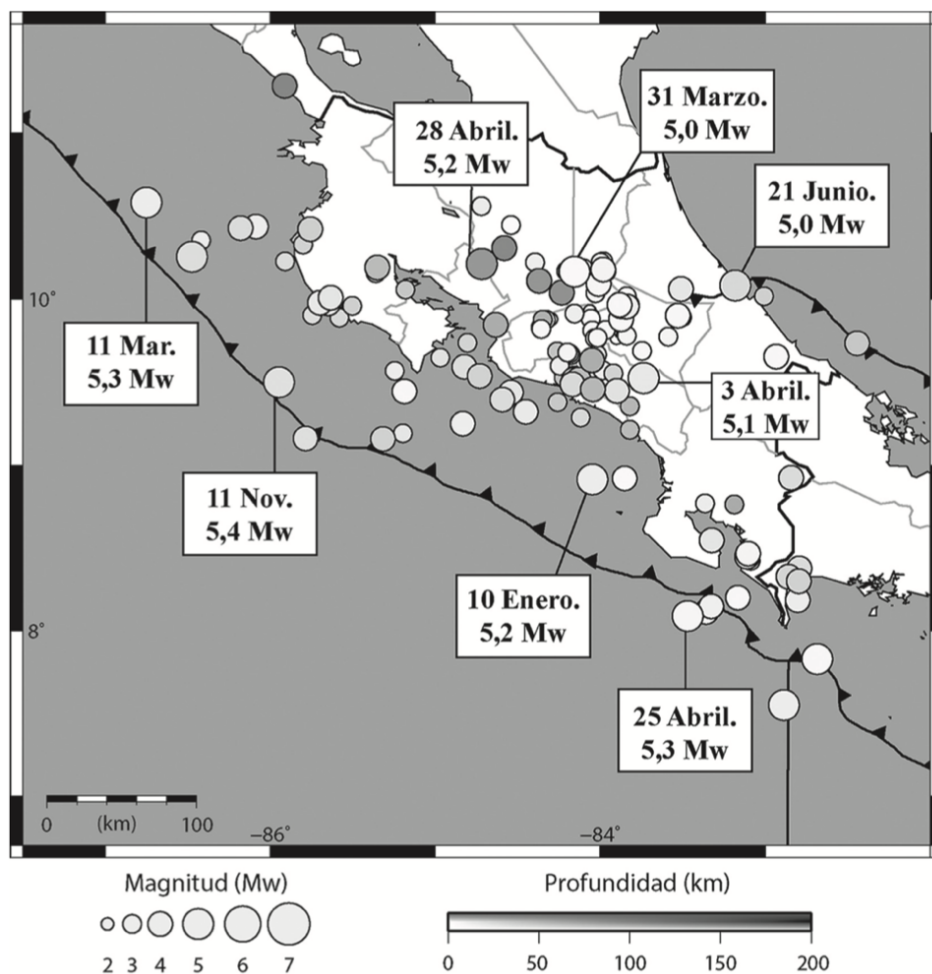


**Figura 5.** Mapa tectónico del Occidente.

Fuente: Tarbuck et al., 2005.

Modificado por Eskenazi, 2018.

Cuando ocurre la subducción entre la placa de Cocos y la del Caribe, se van generando entramamientos a lo largo de la superficie de contacto. Estos montículos son zonas de alta concentración de energía y, una vez que se libera, se puede generar un terremoto. Aun así, no todos los terremotos que son producto del proceso de subducción ocurren por la liberación de energía concentrada en los puntos de entramamiento (LIS, 2011c). En Costa Rica, la subducción entre estas placas y el sistema de fallamiento local son las fuentes principales de sismos. Debido a estos mecanismos, Costa Rica experimenta anualmente varios sismos de magnitud considerable. Por ejemplo, en la siguiente figura se muestra la actividad sísmica de Costa Rica durante el 2015.



**Figura 6.** Epicentros de algunos de los sismos sentidos en Costa Rica en el 2015.

Fuente: Linkimer et al., 2015.

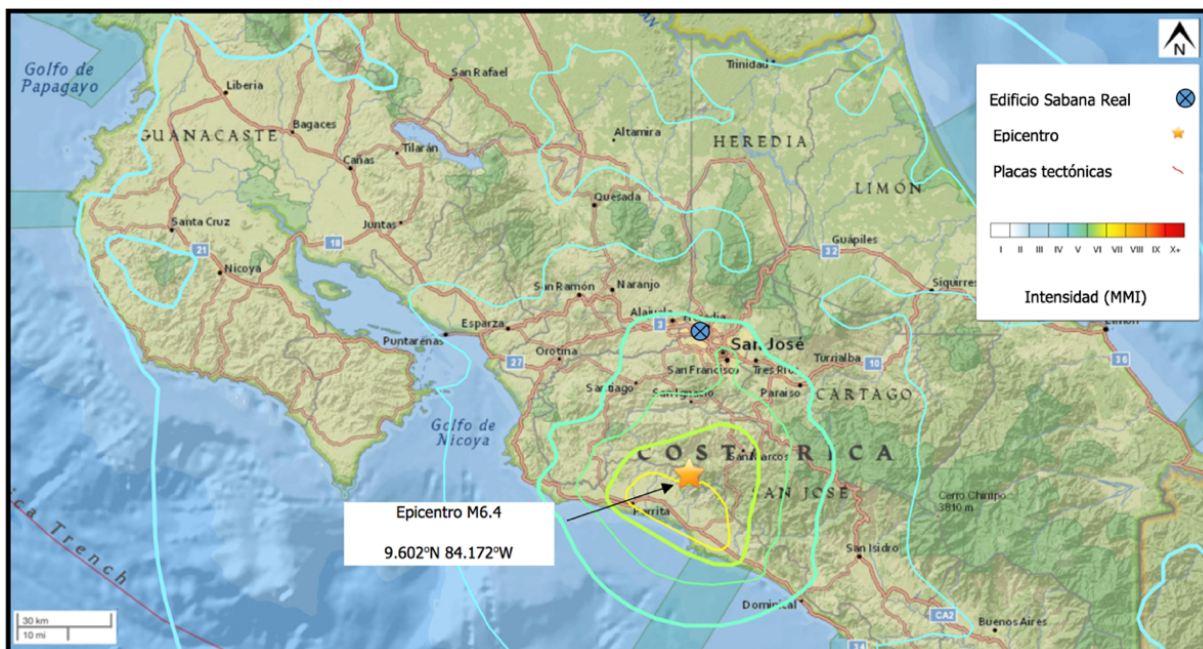
Se puede observar en la figura anterior que la provincia de San José fue epicentro de varios sismos con  $M_w > 5$  durante el 2015. Por lo tanto, la ciudad de San José es una zona altamente sísmica (Linkimer et al., 2015).

Uno de los sismos nacionales recientes más fuertes fue el de Parrita, ocurrido el 13 de noviembre del 2017. Este sismo tuvo una magnitud  $M_w = 6,5$ , una intensidad máxima de VIII en la escala de Mercalli Modificada y ocurrió a una profundidad de 19,4 km (USGS, 2017). Además, en años anteriores, Costa Rica ha sido epicentro de varios terremotos con efectos devastadores. Dentro de estos se encuentran el Terremoto de Damas (2004), el Terremoto de Cinchona (2009) y el Terremoto de Sámara (2012). Estos terremotos se usaron en el análisis de respuesta en el tiempo de esta investigación y se describen a continuación:

#### **Terremoto de Damas, Costa Rica (2004)**

El Terremoto de Damas (Quepos) del 20 de noviembre del 2004 tuvo magnitud  $M_w = 6,2$  y una intensidad máxima de VII en la escala de Mercalli Modificada. Este fue provocado por una ruptura en la falla Damas, de 13,0 km de longitud, a una profundidad de 25,0 km y con epicentro a 9,0 km noroeste de Quepos. La mayoría de los daños reportados ocurrieron en las cercanías del epicentro, con 500 viviendas presentando daños estructurales, así como 27 puentes y varias carreteras. Las viviendas afectadas sufrieron daños tanto por errores constructivos como por asentamientos diferenciales producto de la licuación de los suelos arenosos. También, se reportaron deslizamientos en la carretera Braulio Carrillo, así como la interrupción de servicios de agua y luz en varias localidades del país (RSN, 2004).

El mapa de intensidades del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) para este evento sísmico se muestra a continuación:



**Figura 7.** Epicentro e intensidades del Terremoto de Damas del 2004.

Fuente: USGS, 2014b.

Modificado por: Eskenazi, 2018.

De acuerdo con la figura anterior, la intensidad máxima fue de VII en la zona cercana al epicentro. A este nivel de intensidad se le atribuyen daños significativos a estructuras con errores constructivos, como fue el caso de la mayoría de las viviendas afectadas. El edificio Sabana Real no existía en el momento que ocurrió este terremoto. Sin embargo, en la zona donde este se sitúa hoy en día se percibió un nivel de intensidad de VI en la escala de Mercalli Modificada.

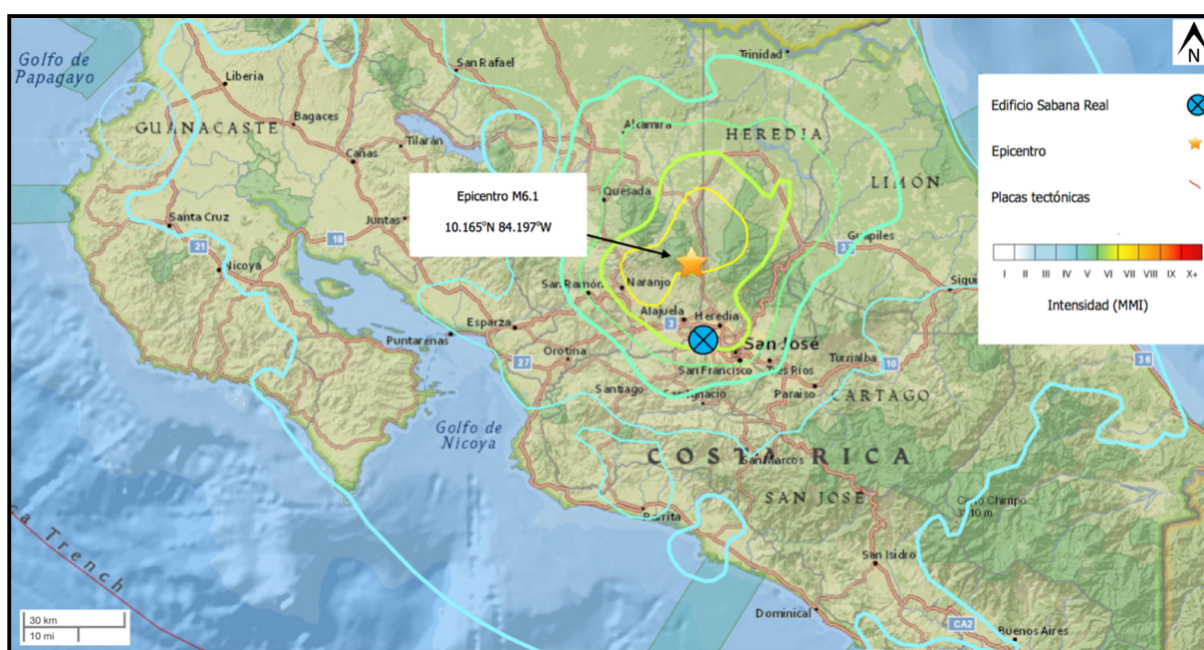
### **Terremoto de Cinchona, Costa Rica (2009)**

El Terremoto de Cinchona del 8 de enero del 2009 fue de los eventos sísmicos recientes más desastrosos del país. Este tuvo  $M_w=6,2$  e intensidad máxima de IX en la escala de Mercalli Modificada. Además, fue provocado por la falla Ángel-Vara Blanca, de 15,0 km de longitud, y sufrió una ruptura de 12,0 km de largo y 7,0 km de profundidad. Se cataloga como un terremoto superficial ya que su hipocentro fue a 3,6 km de

profundidad. El fallamiento fue oblicuo, debido a fuerzas tectónicas paralelas a la falla, y tuvo un deslizamiento horizontal de 30 cm (RSN, s.f.a).

Se reportaron daños locales en carreteras, viviendas y edificaciones, dejando 25 personas fallecidas, siete desaparecidas y 91 heridas. Además, se reportaron aceleraciones de hasta  $1,0g$ , pero se atenuaron al alejarse del área epicentral por ser un terremoto superficial (RSN, s.f.a). La mayoría de los daños producidos por este terremoto se dieron en obras que no respetaron los lineamientos del Código Sísmico de Costa Rica; por ejemplo: poco acero de refuerzo, falta de arriostramiento y apoyos inadecuados entre elementos estructurales (Carmona, s.f.).

El mapa de intensidades del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) para este evento sísmico se muestra a continuación:



**Figura 8.** Epicentro e intensidades del Terremoto de Cinchona del 2009.

Fuente: USGS, 2014a.

Modificado por: Eskenazi, 2018.

De la figura anterior se puede observar que la intensidad máxima del terremoto fue de VII en la escala de Mercalli Modificada. El epicentro del Terremoto de Cinchona del



2009 también coincide con la zona de mayor intensidad. De acuerdo con la escala de intensidades, a esta intensidad se le atribuyen daños significativos a estructuras mal diseñadas/construidas, que fue precisamente lo que ocurrió en Cinchona durante este terremoto. Sin embargo, el reporte de la RSN (RSN, s.f.a) indicó que se percibieron intensidades máximas de IX en la escala de Mercalli Modificada.

El edificio Sabana Real sí existía en el momento que se dio este evento sísmico y en La Sabana, donde este se encuentra, se percibió una intensidad de VI en la escala de Mercalli Modificada, de acuerdo con la figura anterior.

### **Terremoto de Sámara, Costa Rica (2012)**

El Terremoto de Sámara ocurrió el 5 de setiembre del 2012, frente a la Península de Nicoya y tuvo una profundidad de 15,4 km, clasificado como un sismo poco profundo. Se le atribuye una magnitud de momento de  $M_w=7,6$  y una aceleración máxima de 1,83g, casi el doble de la gravedad. Además, se reportaron intensidades mayores a X en la escala de Mercalli Modificada (LIS, 2012b), por lo que los daños estructurales fueron severos y varias estructuras colapsaron. El terremoto fue provocado por la subducción de la placa de Cocos bajo la placa Caribe, mediante un mecanismo de fallamiento inverso. Los daños estructurales importantes ocurrieron en la Península de Nicoya, en Jacó y hasta en Limón. En total, 15 carreteras nacionales se vieron afectadas así como 38 puentes, 1990 viviendas, 5 líneas de transmisión del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y 6 subestaciones, también del ICE. Además, en la costa de Playa Carillo se reportó un levantamiento del terreno de 45,0 cm. En otras zonas del país con arenas saturadas ocurrió la licuación y se dieron asentamientos importantes (Linkimer et al., 2013), comprometiendo la cimentación de obras estructurales. La intensidad máxima reportada por la Red Sismológica Nacional (RSN) fue de VII, pero el mapa de intensidades del USGS, en la escala de Mercalli Modificada, se muestra a continuación:



**Figura 9.** Epicentro e intensidades del Terremoto de Sámara del 2012.

Fuente: USGS, 2014c.

Modificado por: Eskenazi, 2018.

El edificio Sabana Real sí existía en el momento de este terremoto. De la figura anterior se observa que en La Sabana, zona donde se encuentra el mismo, se percibió una intensidad de VI en la escala de Mercalli Modificada.

### 2.3 Respuesta dinámica de un edificio ante eventos sísmos

Cuando las ondas sísmicas entran a la estructura, generan fuerzas inerciales pues esta busca oponerse al desplazamiento impuesto. La ecuación de movimiento para un sistema de múltiples grados de libertad es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = \ddot{u}_g \iota \quad (1)$$

donde  $m$  es la matriz de masa,  $\ddot{u}$  el vector de aceleraciones,  $c$  la matriz de amortiguamiento,  $\dot{u}$  el vector de velocidades,  $k$  la matriz de rigidez,  $u$  el vector de deformaciones,  $\ddot{u}_g$  la aceleración del terreno y  $\iota$  el vector de influencia (Chopra, 2012).

El período fundamental ( $T$ ) de una estructura es el tiempo de un ciclo de oscilación de la misma; su inverso es la frecuencia ( $f$ ) y tiene unidades de Hertz (Hz), donde 1 Hz es igual a un ciclo por segundo. Entre mayor sea la altura del edificio, mayor será su período fundamental. Además, si un edificio de concreto reforzado se agrieta, pierde rigidez y aumenta su período fundamental (Arnold, s.f.).

Estos conceptos son claves para definir la resonancia, fenómeno que ocurre cuando una estructura tiene una frecuencia de vibración similar a la de las ondas sísmicas, por lo que la amplitud de estas últimas se magnifica. Esto puede ocurrir en edificios bajos sobre suelos rígidos (ondas sísmicas con períodos cortos, generalmente) o en edificios altos sobre suelos blandos, debido a la amplificación de ondas (Arnold, s.f.). El comportamiento suelo-estructura también depende de las propiedades dinámicas del sismo.

Por otro lado, los modos de vibración de un edificio son los posibles movimientos que este pueda tener ante fuerzas dinámicas. Cada modo de vibración tiene atribuido un porcentaje de masa que vibra con la misma frecuencia. Los más comunes son:



**Figura 10.** Modos de vibración de un edificio.

Fuente: Cubillo, 2015.

El primer modo de vibración predomina en edificios de baja altura, mientras que en edificios altos los modos de vibración mayores tienen más participación (Arnold, s.f.). A estos últimos se les atribuye una mayor demanda de aceleración producto de su bajo período de vibración. En una estructura aislada sísmicamente de base, el primer modo predomina pues la superestructura simula un cuerpo rígido (Jain et al., 2004); este modo es el que requiere de menos energía para activarse pues generalmente es el que tiene la mayor masa participativa.

## 2.4 Diseño sismorresistente en Costa Rica

Antes de comentar el diseño sismorresistente en Costa Rica, es necesario definir algunos conceptos del diseño sismorresistente:

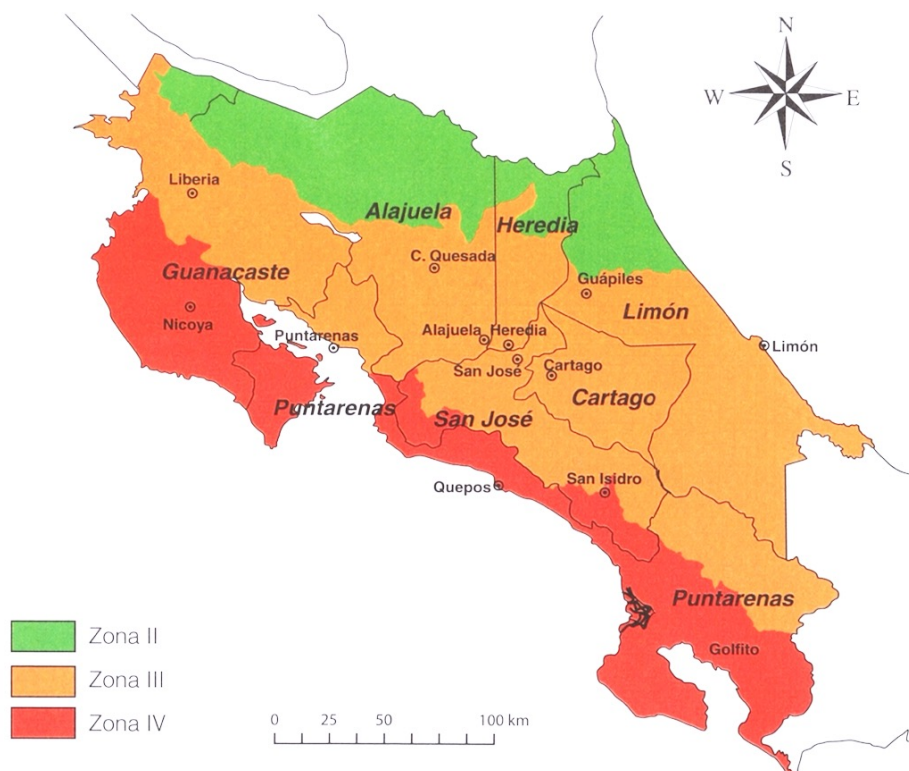
- **Resistencia:** capacidad de soportar cargas sin exceder límites de esfuerzos.
- **Rigidez:** capacidad de un elemento estructural de resistirse a un desplazamiento o a una rotación. En caso de contar con un diafragma rígido (mayoría de los casos de entresijos de concreto reforzado), la fuerza sísmica se distribuye respecto a la rigidez de los elementos verticales, recibiendo más aquellos con mayor rigidez. Entre más rígida sea la estructura, menores serán sus derivas pero tendrá una mayor frecuencia de vibración.
- **Ductilidad:** propiedad de los materiales de deformarse considerablemente después de su punto de fluencia sin provocar la falla. Esta deformación inelástica es la que disipa la energía sísmica. Se debe diseñar con una ductilidad local óptima para que las conexiones prevengan fallas frágiles y no causen el colapso del edificio.
- **Amortiguamiento:** capacidad que tiene la estructura de reducir la amplitud de las ondas sísmicas que le lleguen y se expresa como porcentaje del amortiguamiento crítico, que es el mínimo amortiguamiento necesario para que la estructura se devuelva a su posición original en un ciclo de vibración. El amortiguamiento depende de la capacidad de absorción de energía y de la fricción interna de la estructura, por lo que la aceleración sísmica aumenta conforme disminuye el amortiguamiento (Arnold, s.f.). En Costa Rica se diseña

con un amortiguamiento de 5% del crítico, indiferentemente del material o tipo de estructura (CCSCR, 2014). Este tipo de amortiguamiento es histerético ya que depende del desplazamiento y de las fuerzas de fricción entre los elementos estructurales, de manera que, al cargar una estructura con ondas sinusoidales, se obtiene un diagrama de fuerza-desplazamiento que es independiente del período de las mismas (Rodríguez y Miramontes, 2001). Los aisladores sísmicos elastoméricos con núcleo de plomo en la base de un edificio también proporcionan amortiguamiento histerético cuando se vence la resistencia a la fluencia del núcleo de plomo (Méndez et al., 2012).

- **Torsión vertical:** rotación vertical del edificio producto de una excentricidad entre el centro de masa (donde se aplica la fuerza sísmica) y el centro de rigidez (donde se resiste el sismo). La torsión aumenta los esfuerzos en elementos estructurales y se puede prevenir diseñando edificios regulares, tanto en planta como en altura (Arnold, s.f.).

El CSCR-10/14 plantea requisitos mínimos para el diseño, análisis y construcción de edificaciones sismorresistentes en Costa Rica. Su objetivo principal es salvaguardar la vida humana pero también reducir el daño estructural y minimizar su impacto socioeconómico. El código permite que los elementos estructurales entren en el rango inelástico, sin comprometer la estabilidad del edificio (CCSCR, 2014).

De acuerdo con el código, Costa Rica se divide en tres zonas sísmicas (Zona II, Zona III, Zona IV), siendo la Zona IV la que experimenta mayores aceleraciones. Esta zonificación se muestra a continuación:



**Figura 11.** Zonificación sísmica de Costa Rica.

Fuente: CCSCR, 2014.

Además, el CSCR-10/14 cataloga los suelos costarricenses en cuatro tipos:

- **Suelo tipo S1:** corresponde a un perfil de roca o suelo muy rígido/denso, teniendo este último propiedades semejantes a las de una roca.
- **Suelo tipo S2:** corresponde a un suelo medianamente rígido/denso a uno rígido/denso.
- **Suelo tipo S3:** corresponde a un perfil de 6-12 m de arcilla suave a medianamente rígida, o más de 6 m de suelos no cohesivos con baja/media densidad.
- **Suelo tipo S4:** corresponde a aquel perfil de suelo con más de 12 m de arcilla suave (CCSCR, 2014).

Por lo tanto, dependiendo de la zona y el tipo de suelo donde se vaya a construir la edificación, el CSCR-10/14 indica la aceleración pico efectiva ( $a_{ef}$ ) de diseño para un

sismo fuerte, con período de retorno de 475 años y una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años de exposición; estos valores se muestran a continuación:

**Cuadro 3.** Aceleración pico efectiva (en términos de la gravedad) para distintos tipos de suelo y zonas sísmicas de Costa Rica.

| Tipo de sitio | Zona II | Zona III | Zona IV |
|---------------|---------|----------|---------|
| $S_1$         | 0.20    | 0.30     | 0.40    |
| $S_2$         | 0.24    | 0.33     | 0.40    |
| $S_3$         | 0.28    | 0.36     | 0.44    |
| $S_4$         | 0.34    | 0.36     | 0.36    |

Fuente: CCSCR, 2014.

La aceleración luego se modifica por el factor espectral dinámico (FED), el factor de importancia (I) de la obra y por la sobrerresistencia (SR) del tipo de edificación. El FED considera: el tipo de suelo, la zona sísmica, la ductilidad global asignada de la estructura y el período de la misma. El factor de importancia depende del tipo y ocupación que vaya a tener la estructura. Finalmente, el valor de sobrerresistencia (SR) depende también de la tipología constructiva, ya que usualmente los materiales tienen mayores resistencias que las que se consideran para el diseño (CCSCR, 2014).

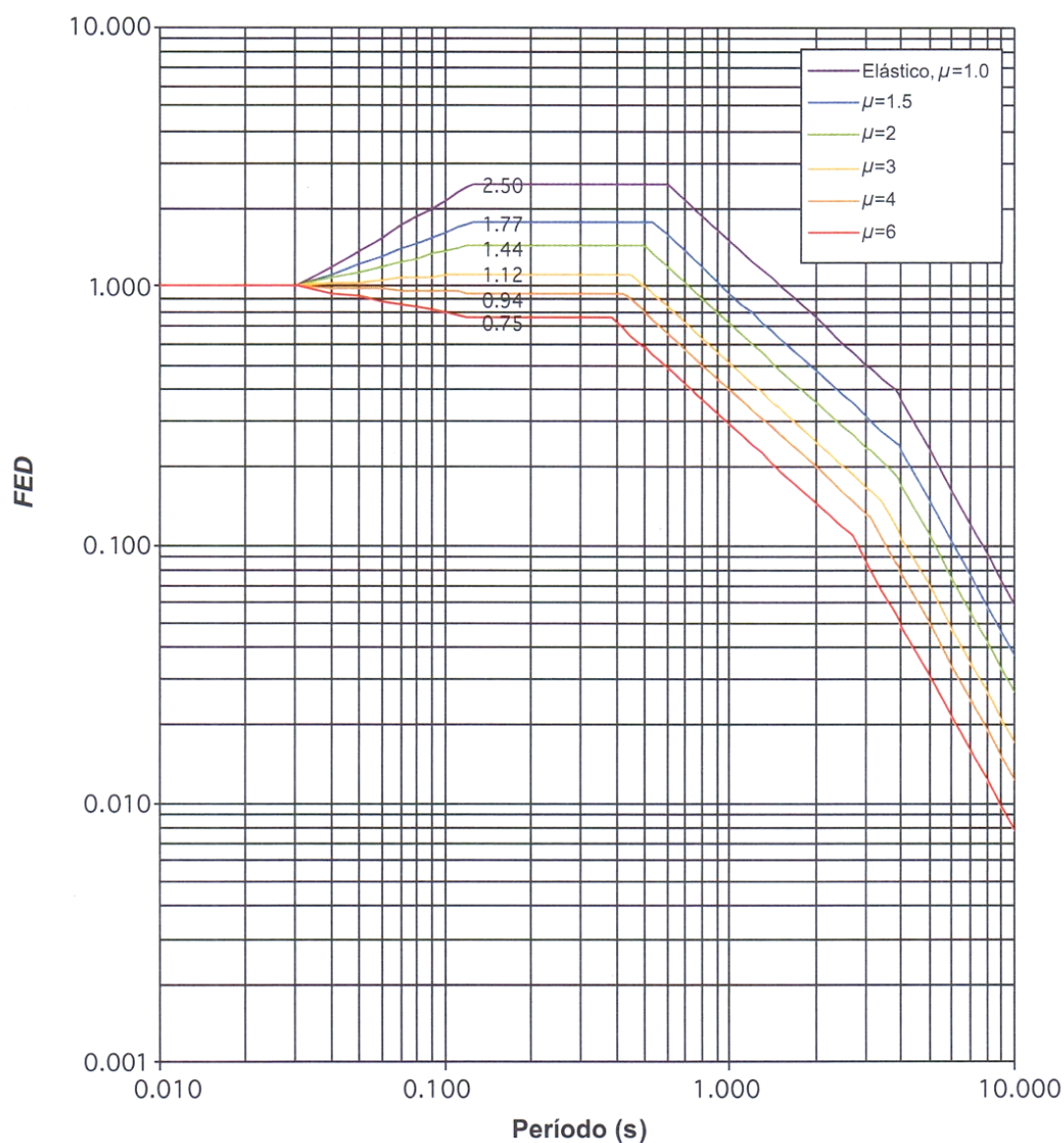
Si se está realizando un análisis estático, el coeficiente sísmico que multiplica la masa sísmica para obtener la fuerza sísmica equivalente se calcula de la siguiente manera:

$$c = \frac{a_{ef} * I * FED}{SR} \quad [g] \quad (2)$$

donde  $a_{ef}$  es porcentaje de la gravedad  $g$ .

Ya que el método de análisis estático propuesto por el CSCR se limita a edificios de baja altura, el método espectral de superposición modal es el más común en el diseño estructural para edificios altos en Costa Rica, que también utiliza el mismo coeficiente sísmico anterior. Este es un análisis elástico-lineal donde se combinan los modos de vibración de la estructura sometida a los espectros de respuesta de aceleración

horizontal de código correspondiente, donde al menos 90% de la masa participe, para luego obtener las derivas máximas y así estimar la respuesta máxima del edificio ante las fuerzas sísmica (CCSCR, 2014). Un ejemplo de un espectro de respuesta de aceleración horizontal de diseño del CSCR se muestra a continuación:



**Figura 12.** Espectro de respuesta de aceleración horizontal de diseño del CSCR-10/14 para ZIII, S3 y un amortiguamiento del 5%.

Fuente: CCSCR, 2014.



El espectro anterior es la manera en que el CSCR cuantifica la amplificación dinámica de un oscilador de un grado de libertad ante la excitación sísmica del terreno en ese sitio de cimentación y zona sísmica, para distintos períodos de vibración y ductilidades globales al considerar el comportamiento no-lineal. Al estar en términos del FED, que es adimensional, los valores del espectro se deben multiplicar por el coeficiente sísmico para obtener la aceleración de diseño en términos de la gravedad, para las condiciones dadas (CCSCR, 2014).

Por otro lado, el CSCR-10/14 propone otros métodos alternos para llevar a cabo el diseño y análisis estructural de una edificación. Tal es el caso del análisis no-lineal dinámico de respuesta en el tiempo. Este tipo de análisis se aproxima a la realidad ya que mide la respuesta real, paso a paso, de la edificación ante ondas sísmicas pues es sometida a acelerogramas de sismos reales y/o artificiales. Estos deben ser escalados al respectivo espectro de respuesta del código para tener la misma demanda sísmica, con ductilidad y sobrerresistencia unitaria ya que estos parámetros son estructurales y no propios del sismo (CCSCR, 2014).

## **2.5 Principios del aislamiento sísmico**

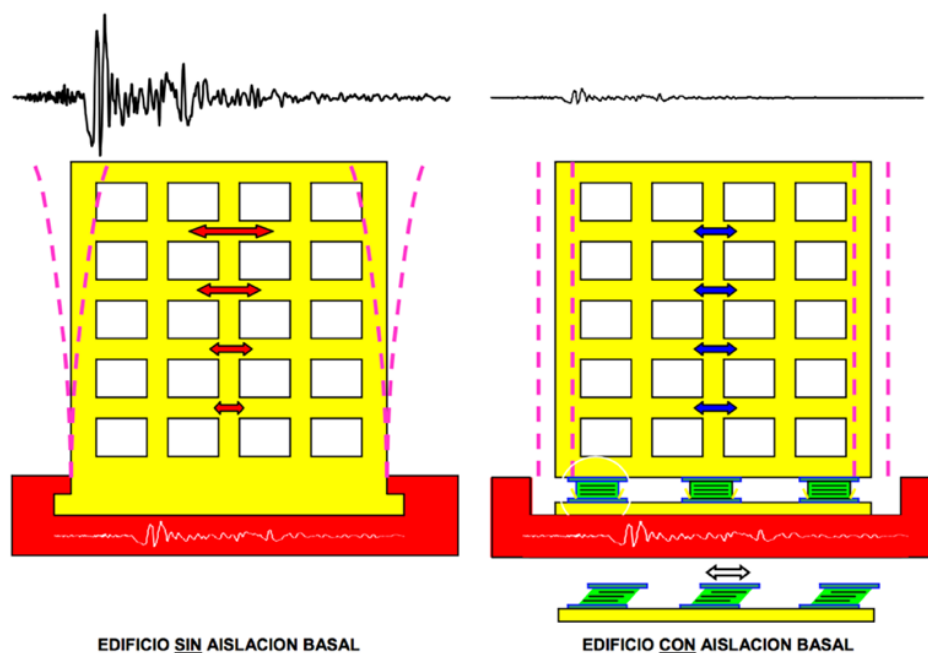
El aislamiento sísmico de base es la técnica ingenieril en la que el edificio es separado de sus cimientos por medio de dispositivos flexibles. Estos deben ser capaces de disipar la energía sísmica que llega a la base del edificio para sólo transmitir un porcentaje pequeño de las ondas sísmicas verticales y horizontales hacia la superestructura (PUCC, s.f.).

La tecnología del aislamiento sísmico basal comenzó a estudiarse en Nueva Zelanda a finales de 1970; una de las primeras obras en aislarse en el mundo fue una casa en Japón construida en 1982 y la primera de Estados Unidos fue un edificio de cuatro niveles en San Bernardino, California, construido en 1985. La tecnología aún no era conocida ni aceptada, sólo existían 85 edificios aislados en Japón antes de 1995. Durante el Terremoto de Kobe (1995), los edificios aislados mostraron un buen

desempeño estructural y la técnica se volvió popular. Actualmente, se construyen, a nivel mundial, más de 20 edificios aislados por mes.

La primera normativa de aislamiento sísmico fue Tentative Seismic Isolation Design Requirements elaborada por la Asociación de Ingenieros Estructurales en California en 1986, donde luego se agregó al apéndice 1L del Blue Book (1990) y al Uniform Building Code (1991). En 1997, se incluyeron requisitos para el diseño de obras con aislamiento sísmico en el National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP), con revisiones periódicas (PUC, s.f.).

El principio del funcionamiento del aislamiento sísmico basal se muestra a continuación:



**Figura 13.** Respuesta sísmica de un edificio con base fija y uno aislado de base.

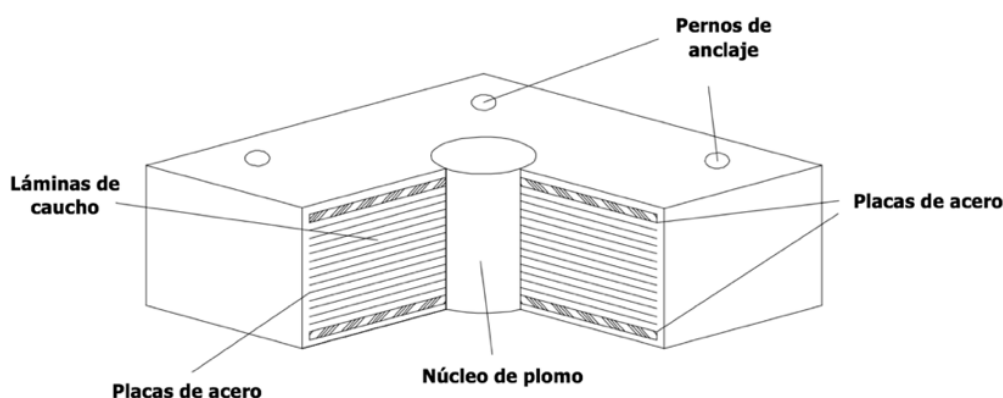
Fuente: PUC, s.f..

En la figura anterior se puede observar como un edificio aislado en su base se comporta como un cuerpo rígido ante cargas laterales, donde los aisladores toman la deformación principal. Como estos disipan gran parte de la energía, debido a un alargamiento en el período de vibración de la estructura, y como las derivas son uniformes en la superestructura, las aceleraciones se reducen al llegar a los niveles superiores debido

al amortiguamiento propio de la superestructura. Gracias a esto, se reduce la demanda de ductilidad en la misma (Torunbalci, 2004).

## 2.6 Aisladores de caucho con núcleo de plomo (LRB)

En este análisis se estudiaron los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB). Un LRB consiste de capas de caucho natural vulcanizadas con láminas de acero y con un cilindro de plomo en el centro (Tikate, 2015). Estos proveen no sólo aislamiento de base, ya que tienen baja rigidez horizontal, sino que también contienen gran potencial de disipación de energía debido al núcleo de plomo. En la siguiente figura se muestran las partes constitutivas de un LRB:



**Figura 14.** Partes constitutivas de un aislador elastomérico LRB.

Fuente: Torunbalci, 2004.

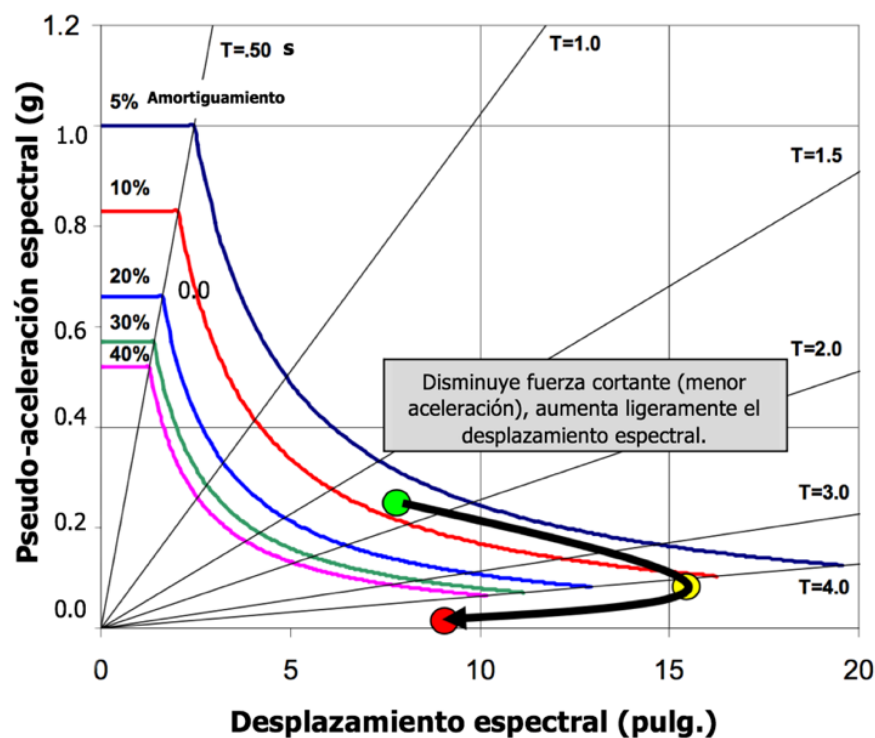
Modificado por Eskenazi, 2018.

Las funciones principales de las partes constitutivas de un LRB, según la figura anterior, son:

- **Láminas de caucho:** le dan flexibilidad lateral al sistema.
- **Placas de acero:** brindan gran rigidez vertical y fuerzan al núcleo de plomo a deformarse, aun en esfuerzos bajos, (Arya, 1994) y (Tikate, 2015).
- **Núcleo de plomo:** disipa energía aun en esfuerzos bajos, tiene gran rigidez inicial y es capaz de transferir cargas verticales hacia la superestructura (Starkey y Knorr, 1998). Además, tiene excelentes propiedades mecánicas ante cargas

cíclicas; su estructura cristalina rápidamente se reconstruye al parar la deformación (Elgamal y Fraser, 2004).

El siguiente espectro de respuesta de pseudo-aceleración espectral en función del desplazamiento espectral muestra los efectos de los LRB en una edificación:



**Figura 15.** Ejemplo del efecto de aisladores LRB en el espectro de respuesta de diseño.

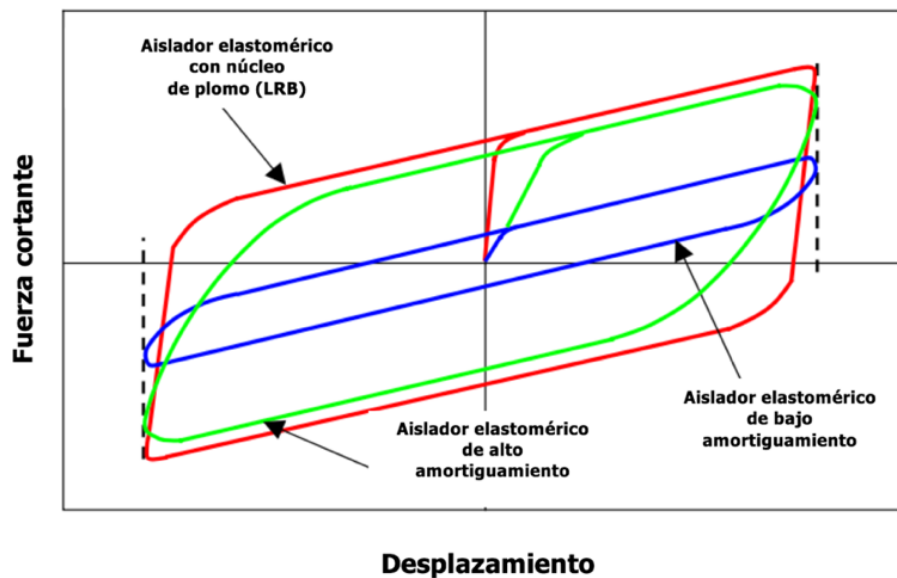
Fuente: Symans, 2004.

Modificado por Eskenazi, 2018.

De la figura anterior se observa que el aislamiento sísmico basal tiende a aumentar el período fundamental de la estructura, moviéndose del punto verde al amarillo, para un amortiguamiento dado. Luego, la posición en el espectro se desplaza del punto amarillo al rojo para el nuevo amortiguamiento proporcionado por los LRB. Este sistema reduce la aceleración sísmica pero aumenta el desplazamiento, que es tomado por los mismos LRB. Por esta razón se dice que los LRB mejoran la respuesta dinámica de una edificación aislada de su base con estos dispositivos.

Con base en la figura anterior, los impactos de un sistema de aislamiento sísmico con LRB son:

1. **Aumentar el período fundamental de la superestructura** debido a la flexibilidad lateral del LRB, disminuyendo su frecuencia de vibración y, por ende, la aceleración sísmica que se le transfiere. Además, el desplazamiento máximo provocado lo toman los aisladores sísmicos, reduciendo los daños en la superestructura. Sin embargo, el período de vibración de la estructura aislada se debe seleccionar cuidadosamente para que esta no entre en resonancia con el sismo (Arya, 1994).
2. **Disipar gran parte de la energía sísmica** por su amortiguamiento, disminuyendo las vibraciones. La disipación de energía ocurre liberando la energía de histéresis, de naturaleza cíclica debido a la vibración del edificio (Arya, 1994). Las curvas de histéresis de tres tipos de aisladores elastoméricos se muestran a continuación, donde se observa que el LRB disipa más energía (área dentro de la curva).



**Figura 16.** Ciclos de histéresis de distintos aisladores elastoméricos.

Fuente: Symans, 2004.

Modificado por Eskenazi, 2018.

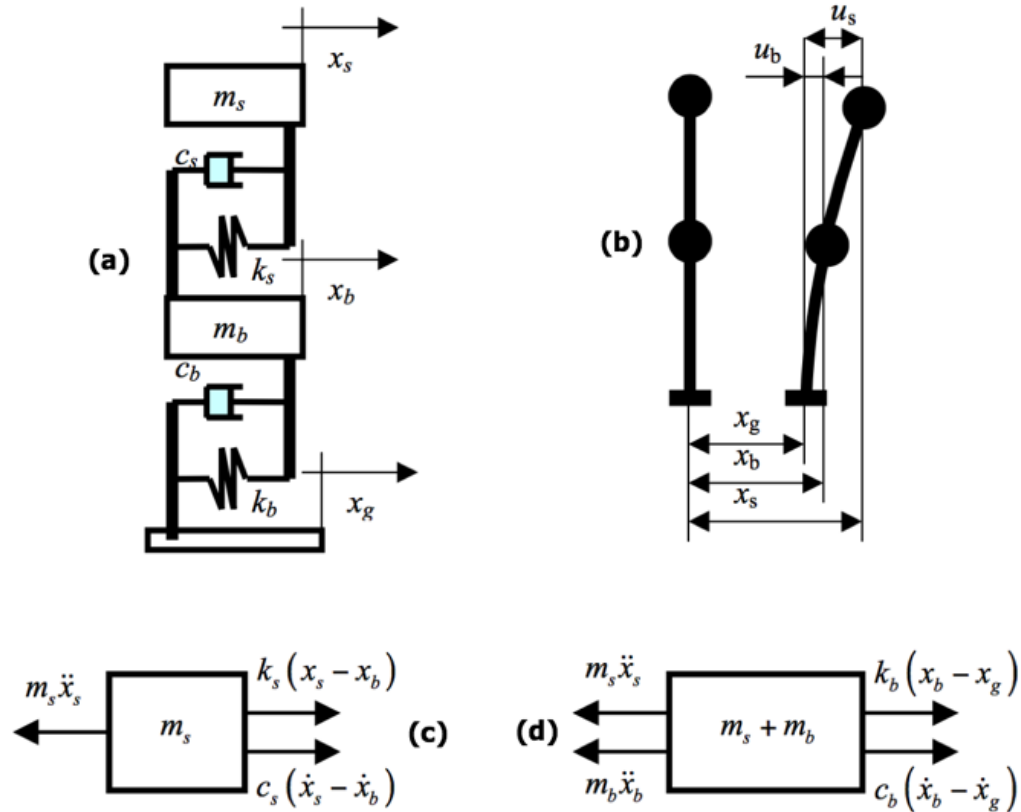
3. **Brindar rigidez suficiente ante cargas bajas**, como viento o sismos leves, para que la superestructura se comporte elásticamente como una convencional de base fija sin generar vibraciones innecesarias dentro de ella (Arya, 1994).

### **Respuesta estructural de edificaciones con LRB**

La respuesta estructural de un edificio aislado resulta compleja conforme más alto este sea ya que la superestructura deja de comportarse como un cuerpo rígido, en la mayoría de los casos, producto de su flexibilidad. Usualmente, el diseño de sistemas de aislamiento sísmico con LRB se diseña mediante un modelo de dos grados de libertad, uno en la superestructura y otro en el sistema de aislamiento. Sin embargo, este modelo representa de una mejor manera el comportamiento estructural de edificios de baja a mediana altura donde la superestructura se comporta como un cuerpo rígido

En el caso del edificio de esta investigación, el edificio es flexible producto de su altura y de su peso por lo que este modelo no puede representar de una manera precisa su comportamiento estructural. El sistema de aislamiento sísmico en estructuras de este tipo se diseña, generalmente, mediante un análisis espectral de superposición modal, iterando hasta encontrar la configuración de LRB que presente los mayores beneficios estructurales. El período fundamental de la estructura es una de las variables principales para medir los beneficios del sistema de aislamiento sísmico pues a períodos altos de vibración, menor será la demanda sísmica sobre los elementos estructurales.

A pesar de lo expuesto anteriormente, el modelo de dos grados de libertad se sigue utilizando como una ejemplificación de una estructura con aislamiento sísmico. Por esta razón, a continuación se describe brevemente este modelo y las ecuaciones que se derivan a partir de él:



**Figura 17.** Modelo de dos grados de libertad de un edificio aislado de base.

Fuente: Bratosin, 2004.

Modificado por Eskenazi, 2018.

Los parámetros  $x_i$  representan los desplazamientos,  $\dot{x}_i$  las velocidades,  $\ddot{x}_i$  las aceleraciones,  $m_i$  las masas,  $c_i$  los coeficientes de amortiguamiento,  $k_i$  las constantes de rigidez y  $u_i$  los desplazamientos relativos. Los subíndices  $s$  representan la superestructura,  $b$  la base y  $g$  el terreno. En la parte (a) de la figura anterior se muestra el modelo de dos grados de libertad, su respuesta dinámica se muestra en (b), las fuerzas a las que se somete la superestructura en (c) y las del sistema total en (d). Las ecuaciones de movimiento del sistema se obtienen al aplicar el equilibrio en las partes (c) y (d) de la figura anterior:

$$m_b \ddot{x}_b + m_s \ddot{x}_s + c_b(\dot{x}_b - \dot{x}_g) + k_b(x_b - x_g) = 0 \quad (3)$$

$$m_s \ddot{x}_s + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_b) + k_s(x_s - x_b) = 0 \quad (4)$$

Asumiendo que la superestructura y la base se comportan como un cuerpo rígido, pues así se diseña, la frecuencia angular del sistema sería:

$$\omega_b^2 = \frac{k_b}{m_s + m_b} \quad \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (5)$$

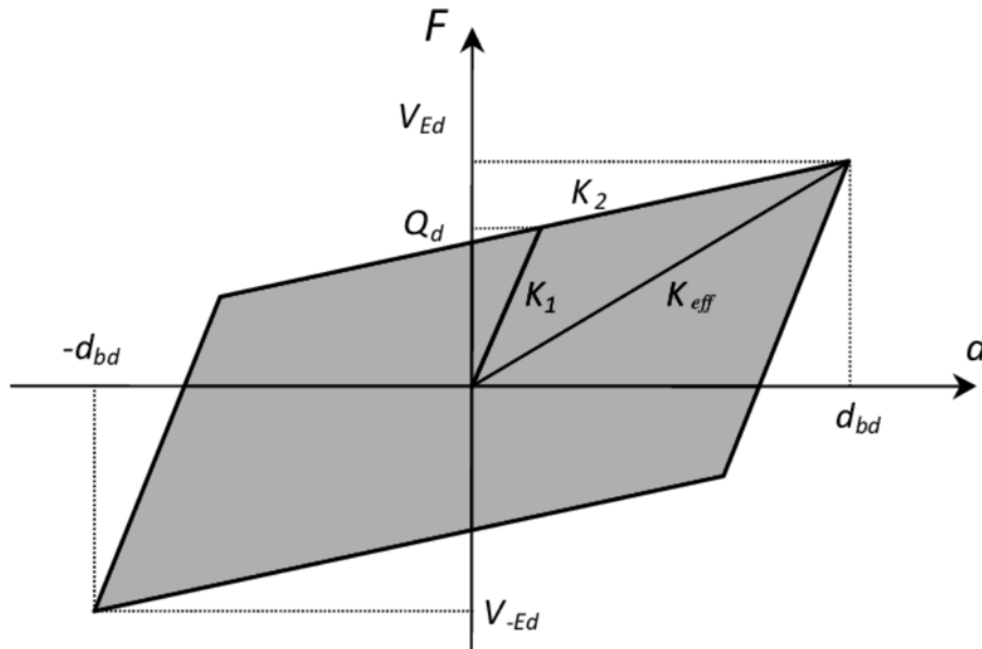
La frecuencia fundamental sería entonces:

$$f = \frac{\omega_b}{2\pi} \quad [Hz] \quad (6)$$

De la ecuación (5) se observa que el aislamiento sísmico disminuye la frecuencia de la superestructura porque los aisladores tienen una rigidez menor a una base fija y la masa es mayor debido a los LRB. Entonces, la superestructura aumenta su período fundamental. El primer modo de oscilación predomina en estructuras aisladas, al cual se le atribuyen menores niveles de aceleración (Bratosin, 2004).

Otra solución para el análisis de estructuras aisladas de su base es mediante un modelado estructural en programas de análisis y diseño estructural. Tal es el caso de ETABS, que fue diseñado principalmente para edificaciones. Para esto, se deben definir las propiedades de los LRB de manera que el programa logre implementar los beneficios del aislamiento sísmico en el modelo. Esto se obtiene representando los LRB mediante un modelo bilineal, método actual y preciso comúnmente utilizado por diseñadores a nivel mundial. Este modelo, mostrado en la siguiente figura, es una idealización de un ciclo de histéresis de los LRB, que guarda la relación fuerza-desplazamiento de los mismos (Méndez et al., 2012).





**Figura 18.** Modelo bilineal de un LRB.

Fuente: Méndez et al., 2012.

De la figura anterior se observa el comportamiento histerético de un LRB sometido a cargas laterales (sísmicas), donde se tiene fuerza en el eje vertical y desplazamiento en el horizontal. A continuación se definen las propiedades que caracterizan el modelo bilineal de los LRB:

- **$K_1$** : rigidez elástica que corresponde a una combinación de las rigideces del plomo y del caucho antes de que el plomo fluya.
- **$K_2$** : rigidez del caucho.
- **$K_{eff}$** : rigidez efectiva del LRB en el desplazamiento de análisis (diseño o máximo).
- **$d_{db}$** : capacidad de desplazamiento horizontal del LRB, dependiendo de la condición de desplazamiento de análisis (sismo de diseño o sismo máximo).
- **$Q_d$** : Fuerza de fluencia del plomo (Méndez et al., 2012).

Las propiedades anteriores se definen por medio de ensayos de laboratorio y son indicadas por el fabricante. Un ejemplo se muestra en el Anexo A.

Con base en la figura anterior y las relaciones geométricas de ella, se pueden definir las siguientes ecuaciones:

- Rigidez efectiva (o secante) de cada LRB para la condición del desplazamiento de análisis:

$$K_{ef} = \frac{Q_D + K_2 d_{bd}}{d_{bd}} \quad \left[ \frac{KN}{mm} \right] \quad (7)$$

donde  $Q_D$  está en KN,  $K_2$  en KN/mm y  $d_{bd}$  en mm.

- Desplazamiento de fluencia de cada LRB para la condición del desplazamiento de análisis:

$$D_y = \frac{Q_D}{K_1 - K_2} \quad [mm] \quad (8)$$

donde  $K_1$  se asume como  $10K_2$  (DIS, 2007).

- Área total del ciclo histéresis del sistema de aislamiento sísmico para la condición del desplazamiento de análisis:

$$A_T = m4Q_D(d_{bd} - D_y) \quad [KNmm] \quad (9)$$

donde  $m$  representa la cantidad de aisladores sísmicos en el nivel de aislamiento,  $Q_D$  está en KN y  $D_y$  en mm.

- Amortiguamiento efectivo total del sistema de aislamiento:

$$\xi = \frac{100}{2\pi} \left[ \frac{A_T}{mK_{ef}d_{bd}^2} \right] \quad [\%] \quad (10)$$

### **Amortiguadores viscosos**

Como se mencionó en secciones anteriores, en ciertos casos de edificios con LRB es necesario colocar amortiguadores viscosos para aumentar el amortiguamiento de la estructura y así reducir la demanda sísmica sobre los elementos estructurales. Por lo

tanto, a continuación se da una breve descripción de estos, ya que no es el centro de esta investigación.

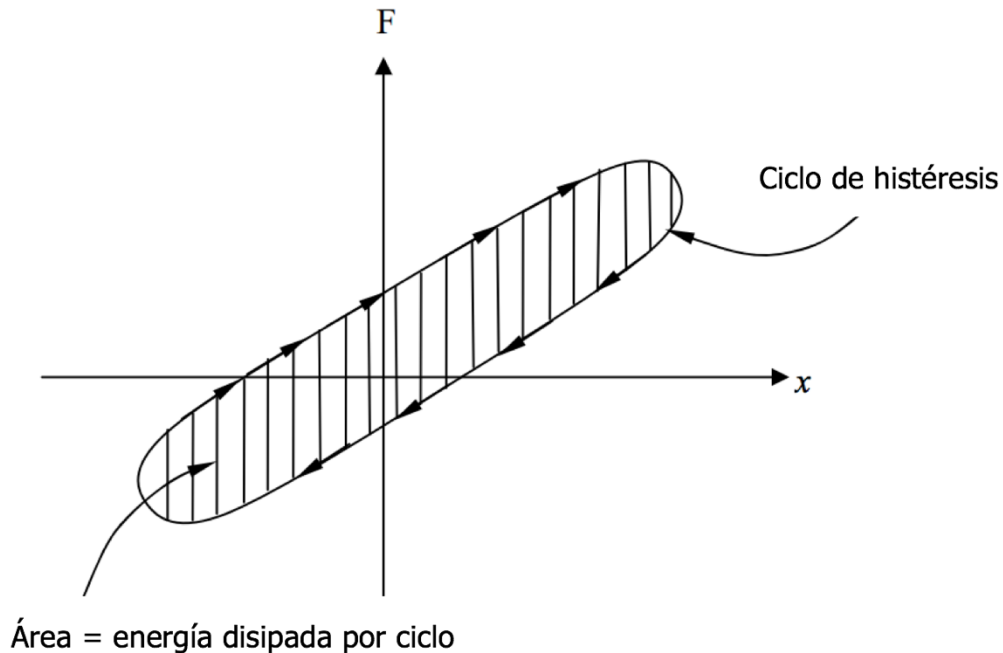
Los amortiguadores viscosos son instrumentos que permiten aumentar el nivel de disipación de energía que entra a una estructura producto de fuerzas laterales. La manera en que lo logran es por medio del fluido viscoso que tienen en su interior, el cual disipa energía al ser forzado a atravesar varios orificios en el interior del dispositivo, una vez que el mismo es excitado por las cargas laterales. Dependiendo de su diseño, pueden llegar a aportar un amortiguamiento total a la estructura del 30% de su amortiguamiento crítico, incluso más. Además, los amortiguadores viscosos no alteran el período natural de vibración de la estructura pero sí agregan un amortiguamiento mayor para reducir la demanda sísmica (Taylor Devices, 2016).

A diferencia de los LRB, los amortiguadores viscosos funcionan tanto en tensión como en compresión ya que trabajan de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$F = CV^n \text{ [KN]} \quad (11)$$

donde  $F$  es la fuerza de reacción (en KN),  $C$  el coeficiente de amortiguamiento (en KNs/mm),  $V$  la velocidad (en mm/s) y  $n$  el coeficiente de amortiguamiento que determina la forma que tiene la curva que representa la relación entre la fuerza en el amortiguador y la velocidad del mismo (varía entre 0,30-1,95). El coeficiente de amortiguamiento depende, generalmente, del diámetro del amortiguador y del área del orificio por el cual pasa el fluido viscoso al activarse el dispositivo (Taylor Devices, 2016).

Dependiendo de la relación fuerza-desplazamiento de cada amortiguador viscoso, se obtiene un ciclo de histéresis diferente. Sin embargo, este ciclo siempre es proporcional a la energía disipada durante cada ciclo (NPTEL, 2014). A continuación se muestra un ciclo de histéresis típico de un amortiguador viscoso:



**Figura 19.** Ciclo de histéresis de un amortiguador viscoso.

Fuente: NPTEL, 2014.

Modificado por: Eskenazi, 2018.

Los aisladores viscosos se colocan entre elementos verticales de la estructura (en forma diagonal), llegando a los nodos mediante brazos metálicos que le proveen la rigidez axial que necesita para un buen comportamiento estructural. Sin embargo, es común que estos brazos le permitan al aislador viscoso tener libertad de rotación en cualquier dirección.

El diseño de estos dispositivos se hace en programas computacionales de diseño y análisis estructural, como ETABS, del cual se obtenga la fuerza y el desplazamiento axial máximo que cada amortiguador experimenta, para un amortiguamiento dado, durante las sacudidas sísmicas tomadas como referencia (Taylor Devices, 2016).

En esta investigación se utilizaron los amortiguadores viscosos de ITT Infrastructure. En sus manuales de fabricante, se indica la carga axial máxima que resiste cada tipo de amortiguador, su desplazamiento axial máximo y los diferentes coeficientes de

amortiguamiento que cada uno podría tener. Los datos del tipo utilizado en este proyecto se muestran en el Anexo B.

## **2.7 Análisis de respuesta en el tiempo**

Una de las maneras más precisas de analizar una edificación es mediante un análisis de respuesta en el tiempo, en el cuál el edificio es sometido a la demanda sísmica de diferentes sismos (reales y/o artificiales) escalados al espectro de respuesta de aceleración del código de diseño, para representar la demanda sísmica esperada de manera adecuada. Con esto, se obtiene un registro en el tiempo de los desplazamientos, fuerzas internas y deformaciones en la estructura producto de las excitaciones sísmicas utilizadas en el análisis. Este método de análisis es considerado como uno de los más precisos en la actualidad ya que incluye el comportamiento de los elementos y de las uniones estructurales durante varias sacudidas sísmicas. De esta forma, se obtiene información detallada de la respuesta estructural de la edificación (CCSCR, 2014).

Sin embargo, este es un método delicado ya que una ligera variación en las características de los acelerogramas utilizados o en el modelado pueden provocar diferencias drásticas en los resultados (CCSCR, 2014). A pesar de lo anterior, la normativa ASCE 7-10 permite utilizar este método para el diseño de estructuras, aun con aislamiento sísmico.

En este estudio se sometió el edificio Sabana Real a tres acelerogramas reales, escalados a la demanda sísmica definida en el CSCR-10/14. Además, se estudió su respuesta para dos condiciones en la base: base convencional y base aislada mediante LRB. Para esto, la normativa ASCE 7-10 plantea los requisitos mínimos para llevar a cabo un análisis de respuesta en el tiempo, para ambas condiciones de base; sin embargo, lo hace únicamente para las componentes horizontales de los sismos ya que no es una práctica común incluir la componente vertical de los mismos en los análisis estructurales. Antes de comentar dichos requisitos, es necesario discutir sobre la componente vertical de los sismos.

Normativas como la NCh2745-13 indican que las componentes sísmicas verticales sí se deben incluir en el análisis de respuesta en el tiempo. Varios estudios han demostrado que la componente vertical de los sismos puede afectar el comportamiento estructural de las columnas y otros elementos que tomen carga ya que pueden: reducir la capacidad a cortante de los mismos, aumentar la demanda de carga axial así como la de momento y la de cortante, amplificar la formación de rótulas plásticas y su extensión y también reducir la ductilidad de los elementos estructurales (Patil y Rajakumara, 2016).

Los espectros de respuesta de aceleración que plantea el CSCR-10/14 son para componentes sísmicas horizontales y no da indicaciones de cómo deben ser los espectros de respuesta para componentes sísmicas verticales. Una práctica común es considerar la componente vertical del sismo como  $2/3$  de la horizontal, por lo que el espectro de respuesta de aceleración horizontal de diseño se multiplica por este factor para obtener el espectro de respuesta de aceleración vertical de diseño. No obstante, esta razón depende de la distancia que exista entre el sitio de cimentación y la falla local ya que cerca de la falla se pueden obtener razones que excedan la unidad; es decir, componentes sísmicas verticales mayores a las horizontales (Kehoe y Ratalla, 2000).

Además, como se menciona más adelante, la componente vertical tiene un contenido de frecuencias altas mayor que la componente horizontal y, si se utiliza un solo factor para crear el espectro de respuesta de aceleración vertical basado en el horizontal, se estaría diciendo que todas las componentes sísmicas tienen el mismo contenido de frecuencias y eso no es verdadero (Patil y Rajakumara, 2016). Como en este estudio no se consideró el efecto de falla cercana, ya que los acelerogramas son de sismos con epicentro lejanos a La Sabana, se utilizó el factor de  $2/3$  para determinar el espectro de respuesta de aceleración vertical en función del horizontal. Lo anterior es respaldado por la normativa NCh2745-13, utilizada para el análisis de estructuras aisladas sísmicamente.

### **2.7.1 Requisitos para edificios con base convencional**

La normativa ASCE 7-10 establece, en su capítulo 16, que para llevar a cabo un análisis de respuesta en el tiempo se debe contar con, por lo menos, tres registros sísmicos reales y apropiados. Para esto, se deben utilizar acelerogramas de sismos con magnitudes, distancias a la falla y mecanismos de falla consistentes con aquellos parámetros considerados en el sismo de diseño, establecido por la normativa nacional.

Además, esta normativa indica que se deben utilizar parejas de acelerogramas para representar cada evento sísmico. Con cada pareja, que consiste en dos acelerogramas horizontales y ortogonales entre sí, se debe construir un espectro de respuesta de aceleración determinado como la raíz cuadrada de la suma de cuadrados de ambas componentes espectrales escaladas, por un mismo factor, al espectro de respuesta de aceleración horizontal de diseño elástico correspondiente a la estructura en cuestión, para un amortiguamiento del 5% y dentro del rango de  $0,2T-1,5T$ , donde  $T$  representa el período fundamental de la estructura. El promedio del espectro de respuesta escalado no debe ser inferior a ningún punto del espectro de respuesta de diseño, dentro de los rangos anteriores (ASCE, 2010). Para el caso de la componente vertical, se siguen las recomendaciones dadas en la normativa NCh2745-13, en su sección 8.4.2.1.

La componente vertical de los sismos generalmente registra una mayor cantidad de ondas primarias (P), que tienen frecuencias mayores que las ondas secundarias (S), las cuales tienen más presencia en la componente horizontal del sismo. Por esta razón, las ondas sísmicas verticales se pueden magnificar dentro de una estructura ya que los períodos de vibración verticales de la esta tienden a tener altas frecuencias de vibración, también (Patil y Rajakumara, 2016). La normativa ASCE 7-10 no indica el rango de períodos en los que se debe escalar la componente vertical, por lo que se escalaron las componentes verticales de los sismos desde 0,02 s (mínimo permitido por el programa SeismoMatch, utilizado para escalar acelerogramas) hasta 3,00 s, ya que no se espera que el período de vibración vertical de un edificio exceda este valor. Con

este rango, se garantiza que la componente vertical escalada excite el modo de vibración vertical de la estructura.

Finalmente, en la sección 16.1.4, esta normativa establece cómo se deben modificar los resultados obtenidos después de someter la estructura a los diferentes acelerogramas escalados. Como en este caso se utilizan tres registros sísmicos, el sistema de aislamiento sísmico se debe escoger con base en los valores máximos obtenidos del análisis y no con los promedios.

### **2.7.2 Requisitos para edificios con aislamiento sísmico**

La normativa ASCE 7-10 establece, en su capítulo 17, los requisitos para el diseño y análisis de estructuras con aislamiento sísmico. En este, se deben utilizar los espectros de respuesta de aceleración del sismo de diseño y del sismo máximo esperado. El sismo de diseño se usa para calcular el desplazamiento total de diseño en el sistema de aislamiento sísmico, así como las fuerzas internas y las derivas en la superestructura. El sismo máximo únicamente se utiliza para calcular el desplazamiento total máximo del sistema de aislamiento sísmico y la demanda de carga axial sobre este.

Las normativas ASCE 7-10 y NCh2745-13 difieren en cuanto a cómo construir el espectro de respuesta de aceleración del sismo máximo. La ASCE 7-10 solicita construir un espectro de respuesta para el sismo máximo esperado, que sea como mínimo 1,5 veces mayor que el espectro de respuesta del sismo de diseño. Sin embargo, la NCh2745-13 indica que conservadoramente se puede utilizar un factor de 1,2 para escalar el espectro de respuesta del sismo de diseño a uno para el sismo máximo. Como los espectros de respuesta de aceleración dependen de la zona sísmica y de su condición geológica, en esta investigación se utilizó el resultado del estudio de amenaza sísmica propio de Costa Rica presentado por el CSCR-10/14 en su comentario C4.1, donde se indica que un sismo extremo tiene una aceleración pico efectiva 25% mayor que la de los sismos fuertes (sismo de diseño). Por lo tanto, el factor de importancia de 1,25 refleja la condición del sismo máximo (CCSCR, 2010). El factor de modificación es un valor intermedio de lo que piden las dos normativas internacionales de referencia.



En cuanto a los requisitos del análisis de respuesta en el tiempo propio de estructuras con aislamiento sísmico, se mantienen los requisitos para una obra con base convencional pero se consideró lo siguiente:

- Las componentes de los acelerogramas se deben escalar a los espectros de respuesta elásticos del sismo de diseño y del sismo máximo, ambos con un factor de amortiguamiento equivalente del 5% y dentro del rango de períodos de  $0,5T_D-1,25T_M$ , donde  $T_D$  representa el período fundamental de la estructura aislada en el desplazamiento de diseño y  $T_M$  el período de la misma con respecto al desplazamiento máximo esperado.
- Según se asumió para base convencional, las componentes verticales de los sismos también se deben escalar desde los rangos de períodos de 0,02 s hasta 3,00 s.

### **2.7.3 Escalamiento de acelerogramas**

El acelerograma registrado para un sismo en particular cuenta con una serie de características que son propias tanto del tipo de falla que lo originó así como de la zona en la que se registró el evento. Estos acelerogramas, por lo general, difieren en su forma espectral al ser comparados con los espectros de respuesta definidos en la normativa de diseño. Por lo tanto, en un análisis de respuesta en el tiempo, estos se deben escalar para llegar a cumplir con la demanda sísmica esperada para diseño, para una zona sísmica particular y un sitio de cimentación en específico.

Los espectros de respuesta de referencia no deben ser reducidos por la sobrerresistencia estructural ni por ductilidad ya que estas son propiedades inherentes de las estructuras y no de los sismos. De esta forma, el espectro de respuesta de referencia utilizado en esta investigación considera: ductilidad unitaria, sobrerresistencia unitaria, amortiguamiento del 5%, la aceleración pico efectiva de la zona sísmica y el tipo de suelo en cuestión, el factor espectral dinámico y el factor de importancia (para el caso del sismo máximo).

El método de la coincidencia espectral con base en períodos de vibración, inicialmente propuesto por Kaul en 1978 y modificado por Hancock<sup>1</sup> en el 2006, es uno de los métodos actuales de escalamiento que ha mostrado ser de los más precisos por preservar de mejor manera el carácter real de la sacudida sísmica.

De manera resumida, este método es un proceso iterativo en el cual se agregan onduletas (funciones de senos y cosenos con fases y amplitudes adecuadas) a ciertos períodos de vibración del espectro de respuesta de aceleración del registro sísmico original. El proceso se repite hasta que el espectro de respuesta de aceleración modificado llegue a converger con el espectro de respuesta de aceleración de diseño. Como resultado, del espectro de respuesta escalado se obtiene de nuevo un acelerograma acorde a la demanda sísmica de la normativa de diseño, preservando la mayoría de propiedades de la sacudida original pero con modificaciones en amplitudes y frecuencias de onda (Plevris et al., 2017).

Al igual que la mayoría de los métodos de escalamiento, este se basa en la respuesta de un sistema de un grado de libertad (Plevris et al., 2017) y actualmente es utilizado por el programa SeismoMatch para escalar acelerogramas de sismos reales al espectro de respuesta de un código en específico. Este programa se utilizó para tal fin en esta investigación.

Como se mencionó en la sección anterior, la normativa ASCE 7-10 requiere que los acelerogramas horizontales sean escalados con un mismo factor para luego crear el espectro de respuesta de aceleración de la dirección horizontal del sismo. Sin embargo, anteriormente también se comentó que estudios recientes han demostrado que uno de los mejores métodos para escalar acelerogramas de registros sísmicos es el método de la coincidencia espectral (Plevris et al., 2017). Por esta razón, se utilizó dicho método. Además, se permitió una tolerancia del 5% a la hora de escalar los espectros de

---

<sup>1</sup> Para mayor detalle, consultar: Hancock, J., Bommer, J. J. (2006). A State-of-Knowledge Review of The Influence of Strong-Motion Duration on Structural Damage. *Earthquake Spectra*, 22(3), 827-845.

respuesta de aceleración de cada sismo a la demanda sísmica esperada, según el CSCR-10/14.

#### **2.7.4 Incursión en el rango inelástico de los elementos propensos a la formación de rótulas plásticas**

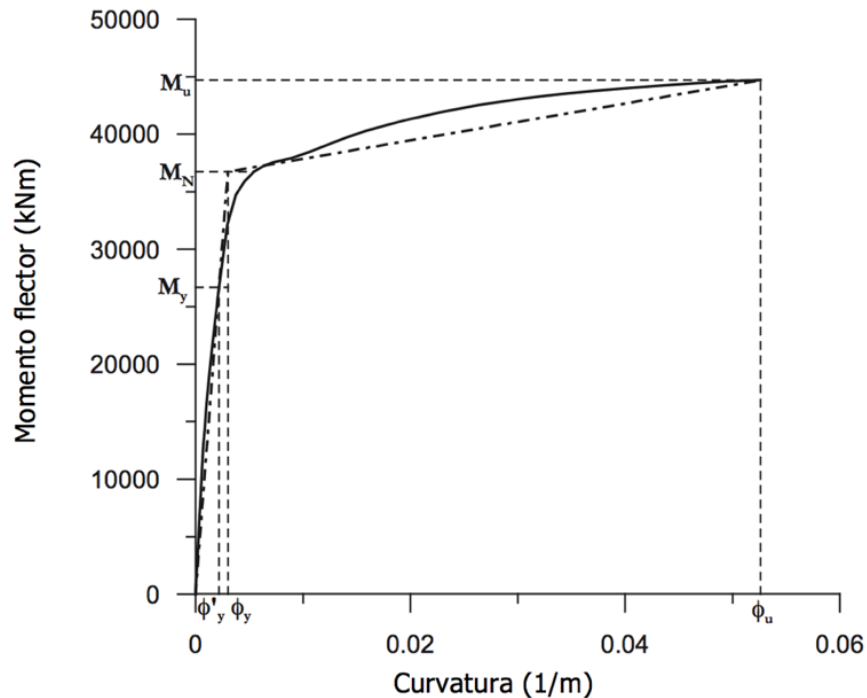
A pesar de que en este trabajo se esté llevando a cabo un análisis de respuesta en el tiempo, el comportamiento no-lineal se limita únicamente a los sistemas de protección sísmica porque se sale del alcance de esta investigación modelar el comportamiento inelástico de los elementos de concreto reforzado. Como se comentó en las limitaciones, no hacerlo limita el análisis a uno con parámetros cualitativos, en vez de cuantitativos. Aun así, para este tipo de análisis interesa saber el comportamiento a flexión de un elemento que forma parte del sistema sismorresistente durante un evento sísmico ya que, de formar una rótula plástica, esto implicaría mayores daños en la estructura. Por lo tanto, se definió como un parámetro cualitativo de interés el determinar cuántas veces un elemento que forma parte del sistema sismorresistente excede su capacidad a flexión elástica durante un evento sísmico dado. Esto para observar, en cierta forma, el grado de daño al cual el elemento estará sometido durante una sacudida sísmica.

La capacidad elástica a flexión de un elemento estructural se calcula mediante el diagrama de momento-curvatura de su sección transversal, con su respectivo patrón de refuerzo y resistencia a la compresión del concreto. Este tipo de diagrama representa la relación que existe entre el momento flector aplicado en un elemento estructural y la curvatura generada por dicha acción.

Estos diagramas se calculan a partir de las propiedades mecánicas de los materiales que componen la sección transversal del elemento, así como de la distribución geométrica de los refuerzos en la misma. Con estos, se puede calcular la ductilidad de un elemento estructural, ya que muestran la curvatura en el punto de fluencia y en el punto de falla (Chang, 2015). De esta forma, si el momento flector aplicado en una sección transversal producto del sismo no excede la capacidad a momento

correspondiente al límite del rango elástico equivalente de la sección transversal (establecido en el diagrama de momento-curvatura), esta no incursiona en el rango inelástico y no experimenta deformaciones permanentes.

Un ejemplo de un diagrama de momento-curvatura es el siguiente:



**Figura 20.** Diagrama típico de momento-curvatura para concreto reforzado.

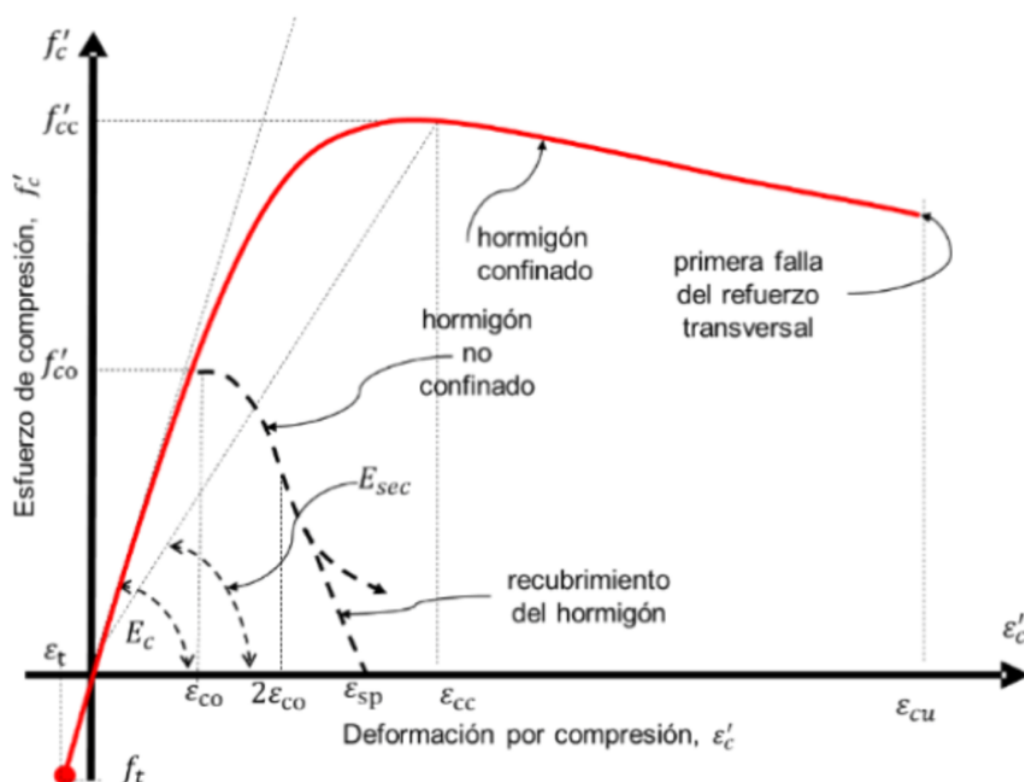
Fuente: Priestley, 2003.

Modificado por: Eskenazi, 2018.

La figura anterior muestra la simplificación bilineal para el diagrama de momento-curvatura de una sección de concreto reforzado. El punto donde se alcanza el momento nominal  $M_n$ , corresponde al límite elástico-equivalente y es fijado por el punto donde se sobrepasa el primer límite de fluencia, ya sea por parte del concreto o por parte del acero de refuerzo. De una manera similar, cuando se alcanza el valor del momento último  $M_u$  se dice que la sección falló (Priestley, 2003).

Para secciones de concreto reforzado que posean refuerzo de confinamiento, Mander et al. (1988b) desarrollaron un modelo para estimar el aumento de resistencia y ductilidad por parte del confinamiento en columnas y muros sometidos a carga axial. Este modelo es válido para secciones rectangulares y circulares, para carga estática y dinámica, con aplicación monótona o cíclica. Ellos también demostraron que los aros y ganchos de confinamiento aumentan la resistencia y ductilidad de una sección, específicamente en elementos estructurales verticales ya que les permiten resistir la formación de rótulas plásticas a grandes curvaturas (Mander et al., 1988a).

En la siguiente figura se muestra el efecto del confinamiento en una columna, calculado mediante el modelo de Mander et al (1988b):



**Figura 21.** Modelo de Mander et al. (1988b) para concreto confinado.

Fuente: Mieles y Hernández., s.f..

Como se puede observar, el concreto reforzado confinado tiene una mayor ductilidad comparado con el que no está confinado. Además, aumenta su capacidad a compresión

y a la deformación. Este modelo predice que la falla de la sección ocurrirá una vez que falle algún elemento de confinamiento ya que la sección dejará de estar confinada y su resistencia disminuirá (Miles et al., s.f.).

## **2.8 Revisión del sistema de aislamiento sísmico**

El sistema de aislamiento sísmico escogido para una estructura debe cumplir con las disposiciones planteadas en la normativa NCh2745-13, específicamente aquellas en la sección 10.2 y 10.3. De manera resumida, la selección del LRB escogido se hizo mediante un análisis espectral preliminar (con base en la carga axial máxima sobre estos apoyos producto de la combinación de carga CU3 del CSCR-10/14, la más probable durante un evento sísmico) y se revisó, una vez corrido el análisis de respuesta en el tiempo, para que cumpliera con las capacidades máximas del manual del fabricante, así como con los siguientes requisitos aplicables a esta investigación:

1. Permanecer estable bajo la carga vertical máxima y mínima<sup>2</sup> ante el desplazamiento máximo total.
2. Ser diseñado para los esfuerzos producidos por el sismo máximo.

Además, el sistema de aislamiento sísmico debe incluir un diafragma horizontal que proporcione continuidad y que tenga la suficiente resistencia y ductilidad para transferir fuerzas entre distintos puntos del edificio en ese nivel.

Las siguientes ecuaciones son necesarias para el cálculo del límite mínimo de desplazamiento total de diseño y desplazamiento total máximo que se deben considerar en el sistema de aislamiento sísmico. El término desplazamiento total indica que ese valor no sólo incluye los desplazamientos producto del sismo, sino que también incluye los desplazamientos producto de la torsión natural y accidental en la estructura (INN, 2013). La mayoría de las ecuaciones utilizadas coinciden en la normativa ASCE 7-10 y

---

<sup>2</sup> Revisar la sección 10.2.6 de la normativa NCh2745-13 para la definición de estas variables.

NCh2745-13, con excepción de las de desplazamiento de diseño y máximo sin considerar el aporte por torsión.

### Ecuaciones para el sismo de diseño

El desplazamiento para el sismo de diseño, calculado en el centro de rigidez (sin excentricidad) del sistema de aislamiento sísmico, se calculó de acuerdo con la normativa ASCE 7-10 en su sección 17.5.3, como:

$$D_D = \frac{gS_{D1}T_D}{4\pi^2B_D} \quad [mm] \quad (12)$$

donde  $g$  es la gravedad (unidades de  $mm/s^2$ ),  $S_{D1}$  la aceleración espectral del sismo de diseño para un período de 1 s y amortiguamiento del 5% (unidades de  $g*s$ ),  $T_D$  el período efectivo de la estructura aislada en el desplazamiento de diseño y en la dirección de análisis (unidades de s) y  $B_D$  el coeficiente relacionado con el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento (ASCE, 2010), según se muestra en el siguiente cuadro:

**Cuadro 4.** Coeficientes de amortiguamiento  $B_D$  o  $B_M$ .

| Amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento sísmico | Factor $B_D$ o $B_M$ |
|---|----------------------|
| $\leq 2$  | 0,8                  |
| 5   | 1,0                  |
| 10  | 1,2                  |
| 20  | 1,5                  |
| 30  | 1,7                  |
| 40  | 1,9                  |
| $\geq 50$   | 2,0                  |

Fuente: ASCE, 2010.

Modificado por: Eskenazi, 2018.

La rigidez efectiva (secante) mínima del sistema de aislamiento, correspondiente al desplazamiento de diseño en la dirección horizontal analizada, se calcula como:

$$k_{Dmin} = \frac{\sum |F_D^+|_{min} + \sum |F_D^-|_{min}}{2D_D} \quad \left[ \frac{KN}{mm} \right] \quad (13)$$

donde  $D_D$  es el desplazamiento de diseño calculado en el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico y en la dirección de análisis (unidades de mm),  $\sum |F_D^+|_{min}$  es la suma para todos los aisladores de los valores absolutos de la fuerza positiva mínima (unidades de KN) de un aislador en el desplazamiento positivo  $D_D$  y  $\sum |F_D^-|_{min}$  es la suma para todos los aisladores de los valores absolutos de la fuerza negativa mínima (unidades de KN) de un aislador en el desplazamiento negativo  $D_D$ . Los valores de las fuerzas se obtienen de los ensayos propios de los aisladores (INN, 2013).

El período efectivo de la estructura aislada en el desplazamiento de diseño y en la dirección analizada se calcula como:

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Dmin} g}} \quad [s] \quad (14)$$

donde  $W$  es la carga muerta sísmica total de la estructura (unidades de KN),  $k_{Dmin}$  la rigidez efectiva mínima (unidades de KN/mm) del sistema de aislamiento, correspondiente al desplazamiento de diseño en la dirección horizontal analizada, y  $g$  la gravedad (unidades de mm/s<sup>2</sup>), (INN, 2013).

Las normativas permiten utilizar el siguiente desplazamiento de diseño en vez de  $D_D$  si se está llevando a cabo un análisis de respuesta en el tiempo, para luego calcular el desplazamiento total de diseño  $D_{TD}$ :

$$D'_D = \frac{D_D}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_D}\right)^2}} \quad [mm] \quad (15)$$

donde  $D_D$  es el desplazamiento de diseño calculado en el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico y en la dirección de análisis (unidades de mm),  $T$  el período elástico de la estructura sin aislamiento sísmico (unidades de s) y  $T_D$  el período efectivo de la estructura aislada en el desplazamiento de diseño y en la dirección de análisis (unidades en s), (INN, 2013).



Por lo tanto, el desplazamiento total de diseño, que considera también los desplazamientos provocados por la torsión natural y accidental, se calcula como:

$$D_{TD} = D'_D \left[ 1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad [mm] \quad (16)$$

donde  $D'_D$  es el desplazamiento de diseño considerado para el análisis de respuesta en el tiempo calculado en el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico y en la dirección de análisis (unidades en mm),  $y$  es la distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico y el elemento en cuestión medida en dirección perpendicular a la dirección de análisis (unidades en mm),  $e$  es la excentricidad real en planta entre el centro de masa de la superestructura y el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico más un 5% de la dimensión más larga de la estructura en dirección perpendicular a la dirección de análisis (unidades en mm),  $d$  es la dimensión en planta más larga de la estructura (unidades en mm) y  $b$  es la dimensión en planta más corta de la estructura perpendicular a  $d$  (unidades en mm), (INN, 2013).

Se puede observar que el proceso debe ser iterativo hasta que los resultados converjan. Sin embargo, el manual del fabricante del LRB utilizado en esta investigación sólo reporta las capacidades del mismo para un desplazamiento máximo, por lo que no se hizo la verificación de capacidad para el sismo de diseño.

### **Ecuaciones para el sismo máximo**

El desplazamiento para el sismo máximo calculado en el centro de rigidez (sin excentricidad) del sistema de aislamiento sísmico también se calculó según lo indica la ASCE 7-10; esto de la siguiente forma:

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M} \quad [mm] \quad (17)$$

donde  $g$  es la gravedad (unidades de  $mm/s^2$ ),  $S_{M1}$  la aceleración espectral del sismo máximo para un período de 1 s y amortiguamiento del 5% (unidades de  $g*s$ ),  $T_M$  el período efectivo de la estructura aislada en el desplazamiento máximo y en la dirección de análisis (unidades de s) y  $B_M$  el coeficiente relacionado con el amortiguamiento efectivo que se calcula con el cuadro anterior (ASCE, 2010).

La rigidez efectiva (secante) mínima del sistema de aislamiento, correspondiente al desplazamiento máximo en la dirección horizontal analizada, se calcula como:

$$k_{Mmin} = \frac{\sum |F_M^+|_{min} + \sum |F_M^-|_{min}}{2D_M} \quad (18)$$

donde  $D_M$  es el desplazamiento para el sismo máximo calculado en el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico (unidades de mm),  $\sum |F_M^+|_{min}$  es la suma para todos los aisladores de los valores absolutos de la fuerza positiva mínima (unidades de KN) de un aislador en el desplazamiento positivo  $D_M$  y  $\sum |F_M^-|_{min}$  es la suma para todos los aisladores de los valores absolutos de la fuerza negativa mínima (unidades de KN) de un aislador en el desplazamiento negativo  $D_M$ . Los valores de las fuerzas se obtienen de los ensayos propios del tipo de aisladores utilizados (INN, 2013). En este caso, se calculó la rigidez secante con base en las propiedades del manual del fabricante del LRB y con la ecuación presentada cuando se comentó sobre el modelo bilineal del LRB.

El período efectivo de la estructura aislada en el desplazamiento máximo y en la dirección analizada se calcula como:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Mmin} g}} \quad [s] \quad (19)$$

donde  $W$  es la carga muerta sísmica total de la estructura (unidades de KN),  $k_{Mmin}$  la rigidez efectiva mínima (unidades de KN/mm) del sistema de aislamiento, correspondiente al desplazamiento máximo en la dirección horizontal analizada, y  $g$  la gravedad (unidades de mm/s<sup>2</sup>), (INN, 2013).

Las normativas permiten utilizar el siguiente desplazamiento máximo en vez de  $D_M$  si se está llevando a cabo un análisis de respuesta en el tiempo, para luego calcular el desplazamiento total de diseño  $D_{TM}$ :

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_M}\right)^2}} \quad [mm] \quad (20)$$

donde  $D_M$  es el desplazamiento máximo calculado en el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico y en la dirección de análisis (unidades de mm),  $T$  el período elástico de la estructura sin aislamiento sísmico (unidades de s) y  $T_M$  el período efectivo de la estructura aislada en el desplazamiento máximo y en la dirección de análisis (unidades en s), (INN, 2013).

Por lo tanto, el desplazamiento total máximo, que considera también los desplazamientos provocados por la torsión natural y accidental, se calcula como:

$$D_{TM} = D'_M \left[ 1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad [mm] \quad (21)$$

donde  $D'_M$  es el desplazamiento de diseño considerado para el análisis de respuesta en el tiempo calculado en el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico y en la dirección de análisis (unidades en mm),  $y$  es la distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico y el elemento en cuestión medida en dirección perpendicular a la dirección de análisis (unidades en mm),  $e$  es la excentricidad real en planta entre el centro de masa de la superestructura y el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico más un 5% de la dimensión más larga de la estructura en dirección perpendicular a la dirección de análisis (unidades en mm),  $d$  es la dimensión en planta más larga de la estructura (unidades en mm) y  $b$  es la dimensión en planta más corta de la estructura perpendicular a  $d$  (unidades en mm), (INN, 2013).

Utilizando las ecuaciones anteriores, el desplazamiento total máximo que se obtiene del modelo estructural no puede ser menor al 80% de  $D_{TM}$ . Con esos valores y las cargas verticales sobre cada aislador es que se revisa el tipo de aislador sísmico seleccionado para la obra estructural. Las capacidades de los aisladores sísmicos son indicadas por el fabricante.

Por otro lado, las siguientes ecuaciones se utilizan para calcular el límite del cortante mínimo de diseño para el sistema de aislamiento.

La rigidez efectiva (secante) máxima del sistema de aislamiento, correspondiente al desplazamiento de diseño en la dirección horizontal analizada, se calcula como:

$$k_{Dmax} = \frac{\sum |F_D^+|_{max} + \sum |F_D^-|_{max}}{2D_D} \quad \left[ \frac{KN}{mm} \right] \quad (22)$$

donde  $D_D$  es el desplazamiento para el sismo de diseño calculado en el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico (unidades de mm),  $\sum |F_D^+|_{max}$  es la suma para todos los aisladores de los valores absolutos de la fuerza positiva máxima (unidades de KN) de un aislador en el desplazamiento positivo  $D_D$  y  $\sum |F_D^-|_{max}$  es la suma para todos los aisladores de los valores absolutos de la fuerza negativa máxima (unidades de KN) de un aislador en el desplazamiento negativo  $D_D$ . Los valores de las fuerzas se obtienen de los ensayos propios del tipo de aisladores utilizados (INN, 2013).

La fuerza de cortante total de diseño se calcula como:

$$V_b = \frac{k_{Dmax} D_D}{R_s} \quad [KN] \quad (23)$$

donde  $k_{Dmax}$  la rigidez efectiva máxima (unidades de KN/mm) del sistema de aislamiento, correspondiente al desplazamiento de diseño en la dirección horizontal analizada,  $D_D$  el desplazamiento de diseño calculado en el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico y en la dirección de análisis (unidades de mm) y  $R_s$  el coeficiente de reducción de fuerzas laterales de la superestructura que equivale a 2 para estructuras tipo muro de concreto reforzado (INN, 2013).

De esta forma, la fuerza de corte de diseño en el sistema de aislamiento sísmico obtenida del análisis estructural no puede ser menor al 90% de  $V_b$ . En este caso, el manual del fabricante del LRB utilizado no indica la capacidad a cortante del mismo, ya que está implícita al indicar la carga axial máxima que soporta cada LRB ante el desplazamiento máximo en él. Por lo tanto, no se realizó esta verificación.

Además, se debe verificar que el LRB seleccionado resista la mayor carga de compresión impuesta y que el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento no exceda el desplazamiento máximo del dispositivo, ambos parámetros indicados en el manual del fabricante del LRB. De manera conservadora, y como lo indican las normativas anteriores, el desplazamiento de cada LRB extraído del modelo estructural debe ser la suma de los cuadrados de las componentes de desplazamiento en el LRB

en las dos direcciones ortogonales principales de la estructura. También, se debe verificar que ningún LRB tenga que resistir cargas de tensión pues estos dispositivos no están diseñados para esto. En caso de existir tensiones, se propondrá que en futuras investigaciones se diseñe un dispositivo que sea capaz de tomar las tensiones de cada LRB, pero no así sus compresiones, sin alterar la rigidez del sistema de aislamiento.

Finalmente, se debe verificar que la deriva máxima no exceda el 2% de la altura del nivel donde ocurre. Sin embargo, como en esta investigación no se definieron las propiedades inelásticas del concreto, las derivas obtenidas del análisis no son reales y, por lo tanto, no se puede revisar este requisito.

### **3 Metodología**

Como se explicó en el alcance, este proyecto busca determinar los beneficios de implementar un sistema de aislamiento sísmico con LRB en la base de un edificio de concreto reforzado de gran altura, situado en la ciudad de San José. Para esto, se hizo un análisis elástico de respuesta en el tiempo que considere la no-linealidad de los apoyos LRB, utilizando los acelerogramas escalados de tres terremotos con un gran impacto a nivel nacional (Damas 2004, Cinchona 2009 y Sámara 2012). Para cumplir con esto, se siguió la siguiente metodología, desglosada por fases de acuerdo con los capítulos de este proyecto.

- Fase teórica: Capítulos 1, 2 y 3.
- Fase descriptiva: Capítulo 4.
- Fase de análisis y resultados: Capítulos 5 y 6.
- Fase conclusiva: Capítulo 7.

A continuación se describe cada fase y luego se presenta una figura que las resume.

#### **Fase teórica**

Se revisaron fuentes bibliográficas de sismología, filosofías del diseño sismorresistente, teoría del aislamiento sísmico y propiedades de LRB, así como estudios internacionales del aislamiento sísmico en edificios de gran altura. Luego, se revisó el Código Sísmico de Costa Rica 2010-14 (CCSCR, 2014) y su comentario (CCSCR, 2010), la normativa chilena del Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica NCh275-13 (INN, 2013) y la normativa estadounidense de las Cargas Mínimas de Diseño Para Edificios y Otras Estructuras ASCE 7-10 (ASCE, 2010). Además, se consultó con el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica para obtener los acelerogramas de los terremotos que se usaron en el análisis elástico de respuesta en el tiempo, cuya fase se explica más adelante.

#### **Fase descriptiva**

Se describió el edificio Sabana Real, desde un punto de vista estructural. De esta forma, se determinó el tipo de estructura según el CSCR-02, así como su regularidad tanto en

planta como en altura, para poder predecir el comportamiento estructural del mismo ante cargas sísmicas. Además, se expusieron las consideraciones que los ingenieros de la empresa de diseño estructural IECA Internacional S.A tuvieron a la hora de diseñarlo, ya que estas se podrían convertir en variables sobre los beneficios del aislamiento sísmico en edificios de concreto reforzado de gran altura. También, se resumió el fenómeno de amplificación de ondas sísmicas en los suelos de La Sabana y cómo esto podría llegar a afectar la estructura. Finalmente, se comentó sobre el modelo estructural original del edificio.

### **Fase de análisis y resultados**

El capítulo 5 incluye el análisis estructural relacionado con el análisis espectral de superposición modal preliminar que se realizó en el modelo estructural original, tanto para calcular los diagramas de momento-curvatura de los muros (elemento sismorresistente principal) propensos a la formación de rótulas plásticas así como para diseñar los LRB. Lo anterior se hizo en el programa de diseño y análisis estructural ETABS, utilizando el espectro de respuesta de aceleración del CSCR-10/14 (CCSCR, 2014) para la zona sísmica III y un tipo de suelo S3, según la clasificación presente en el mismo código, con ductilidad y sobrerresistencia unitaria.

Los diagramas de momento-curvatura de los muros se calcularon con dos fines:

1. Obtener la capacidad a flexión elástica de los muros en sus dos ejes principales para determinar si esta se sobrepasa durante la sacudida sísmica de un sismo con la demanda del espectro de respuesta de aceleración correspondiente del CSCR-10/14.
2. Obtener los factores reales de agrietamiento de los muros con el fin de modelar la realidad del edificio de una mejor manera.

De acuerdo con Mander et al. (1998a), la carga axial también incide en la capacidad a compresión de una sección transversal y, por ende, en su capacidad a flexión y en su ductilidad. Por esta razón, a pesar de que en un mismo nivel del edificio se repita el

tipo de muro, se construyó un diagrama de momento-curvatura específico para cada muro dentro del nivel de análisis, pues su demanda de carga axial es diferente.

La carga axial que se utilizó para construir dichos diagramas es la obtenida mediante el análisis mencionado anteriormente y con la combinación de carga CU3 del CSCR-10/14, la cual se considera como la más probable durante un evento sísmico. Sin embargo, esta combinación de carga considera el sismo en ambas direcciones horizontales principales por lo que, para cada muro analizado, se tomó la menor carga axial ejercida en él considerando 100% del sismo en la dirección X y 30% del sismo en la dirección Y, o viceversa. Esto debido a que una menor carga axial reduce la capacidad a flexión pues se tienen menores esfuerzos de compresión por lo que una mayor parte de la sección transversal del elemento estará sometida a esfuerzos de tracción (eslabón débil del concreto).

Utilizando el modelo original del edificio Sabana Real (sin protección sísmica, o sin aislamiento basal), se obtuvieron, mediante el análisis anterior, las cargas axiales en los muros estructurales del primer nivel (entre 0+00 m y 3+20 m), así como los muros estructurales del cuarto nivel (entre 9+60 m y 12+80 m). En un edificio es común que la rotulación plástica comience en los elementos estructurales sismorresistentes del primer nivel ya que estos tienen la mayor demanda de cargas. Sin embargo, en este estudio también se revisaron los muros de corte del nivel 9+60 m (cuarto nivel) ya que en este nivel del edificio, varios muros estructurales tienen una reducción drástica en la resistencia a la compresión del concreto, por lo que su módulo de elasticidad se ve reducido y esto podría perjudicar la capacidad de momento de los mismos, aunque estén sujetos a una menor carga que los del primer nivel.

Tomando las cargas axiales mencionadas anteriormente y las características de las secciones transversales de los muros, se determinó la capacidad elástica a flexión de los muros seleccionados (en su eje fuerte y débil), mediante diagramas de momento-curvatura calculados a partir del modelo de Mander et al. (1988b) y por medio del programa XTRACT Cross Section Analysis. Como los sismos generan ondas en todas las direcciones, es conservador tomar la menor capacidad a flexión de cada muro, en



cada uno de sus ejes de acción, para determinar si exceden o no su capacidad a flexión elástica durante la excitación sísmica.

Dichas capacidades elásticas a flexión se compararon con la demanda a flexión sobre los muros estudiados, producto del mismo análisis espectral en el edificio con base convencional, ya que es el que tiene mayor probabilidad de incursionar en el rango inelástico por no contar con sistemas de protección sísmica. De esta manera, se hizo una revisión preliminar de si el edificio incursiona en el rango inelástico o no durante un sismo con la demanda sísmica de diseño, según el CSCR-10/14.

También, mediante estos diagramas de momento-curvatura se puede obtener el factor de agrietamiento real de los muros estudiados. El programa XTRACT Cross Section Analysis calcula el agrietamiento real de una sección transversal considerando el aporte del confinamiento del concreto en su resistencia. La razón entre el módulo de rigidez agrietado ( $EI_{\text{agrietado}}$ , o  $EI_{\text{efectivo}}$ ) y el módulo de rigidez elástico ( $EI_{\text{elástico}}$ ) se conoce como el factor de agrietamiento real del elemento. Al final, se promediaron los factores de agrietamiento de los muros estudiados para determinar el factor de agrietamiento que se va a aplicar a todos los muros del edificio en los modelos estructurales, tanto sin protección sísmica como con protección sísmica, para el análisis de respuesta en el tiempo, de forma que el comportamiento estructural del edificio durante este último tipo de análisis sea más preciso.

Finalmente, el capítulo 5 de esta investigación termina con el diseño preliminar de los LRB utilizados. Tomando como base el modelo estructural del edificio sin protección sísmica, se eliminó el nivel de sótano para colocar los LRB debajo de los muros estructurales del primer nivel. Mediante un análisis espectral de superposición modal, se determinó la rigidez efectiva que estos dispositivos deben de tener para no sólo garantizar la estabilidad del edificio, sino que también permita aumentar el período fundamental de la estructura en un factor de tres, pues es una práctica común que los edificios aislados tengan un período de vibración tres veces mayor que el mismo con base convencional. Luego, con esta rigidez efectiva y con las propiedades mecánicas

indicadas en el manual de Dynamic Isolation Systems (DIS)<sup>3</sup>, se procede a diseñar el LRB para construir su modelo bilineal, el cual se ingresa al programa de modelado estructural para llevar a cabo el análisis de respuesta en el tiempo del capítulo 6.

Este diseño es preliminar y se debe revisar si el dispositivo es capaz de resistir las demandas impuestas sobre él por un sismo máximo. Estas demandas son las resultantes del análisis del capítulo 6, donde el edificio es sometido a tres terremotos reales escalados a la demanda del CSCR-10/14. Sin embargo, la revisión del sistema de aislamiento se debe hacer con la demanda de un sismo máximo y no con la del sismo de diseño del código, ya que así lo solicita la ASCE 7-10.

De acuerdo con el diseño anterior, si el amortiguamiento que proporcionan los LRB colocados es menor a un factor del 20%, se agregan amortiguadores viscosos como medida para aumentar dicho valor. Las capacidades de estos también se revisaron en el capítulo 6, de haber sido utilizados.

Por otro lado, el capítulo 6 de esta investigación contiene los resultados del análisis de respuesta en el tiempo en el cual el edificio Sabana Real es sometido a la demanda sísmica de tres terremotos nacionales, escalados tanto a la demanda del sismo de diseño como a la del sismo máximo presentes en CSCR-10/14. Este análisis es un análisis elástico de respuesta en el tiempo, que considera la no-linealidad de los apoyos LRB para el caso del aislamiento sísmico, ya que este logra representar de manera precisa el comportamiento estructural del edificio con las dos condiciones de base.

Este capítulo inició seleccionando los acelerogramas de los terremotos que se utilizaron en el análisis de respuesta en el tiempo. Esto se logró consultando con el Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS) de la Universidad de Costa Rica, que poseen los registros de aceleración de los terremotos estudiados, medidos desde diferentes puntos del país. Estos acelerogramas luego se escalaron, con ayuda del programa SeismoMatch y de la

---

<sup>3</sup> Empresa estadounidense encargada de fabricar aisladores sísmicos y otros productos de protección sísmica.

normativa ASCE 7-10, para tener una demanda sísmica similar a la que establece el CSCR-10/14 en sus espectros de respuesta para un tipo de suelo, una zona sísmica, una ductilidad unitaria, una sobrerresistencia unitaria y un factor de amortiguamiento constante del 5%, tanto para un sismo de diseño como un sismo máximo.

Antes de realizar el análisis de respuesta en el tiempo, ambos modelos estructurales (sin protección sísmica y con protección sísmica) se modificaron para considerar los requisitos adicionales que plantea la ASCE 7-10, así como los factores de agrietamiento en los muros calculados en el capítulo 5 y las nuevas condiciones de apoyo y protección sísmica; esta última modificación aplica para el modelo con medidas de protección sísmica.

El edificio modelado con ambas condiciones de base se sometió a la sacudida sísmica de los tres terremotos nacionales seleccionados, cuyos acelerogramas escalados en las dos direcciones horizontales y en la dirección vertical fueron asignados en el modelo en su dirección real de carga.

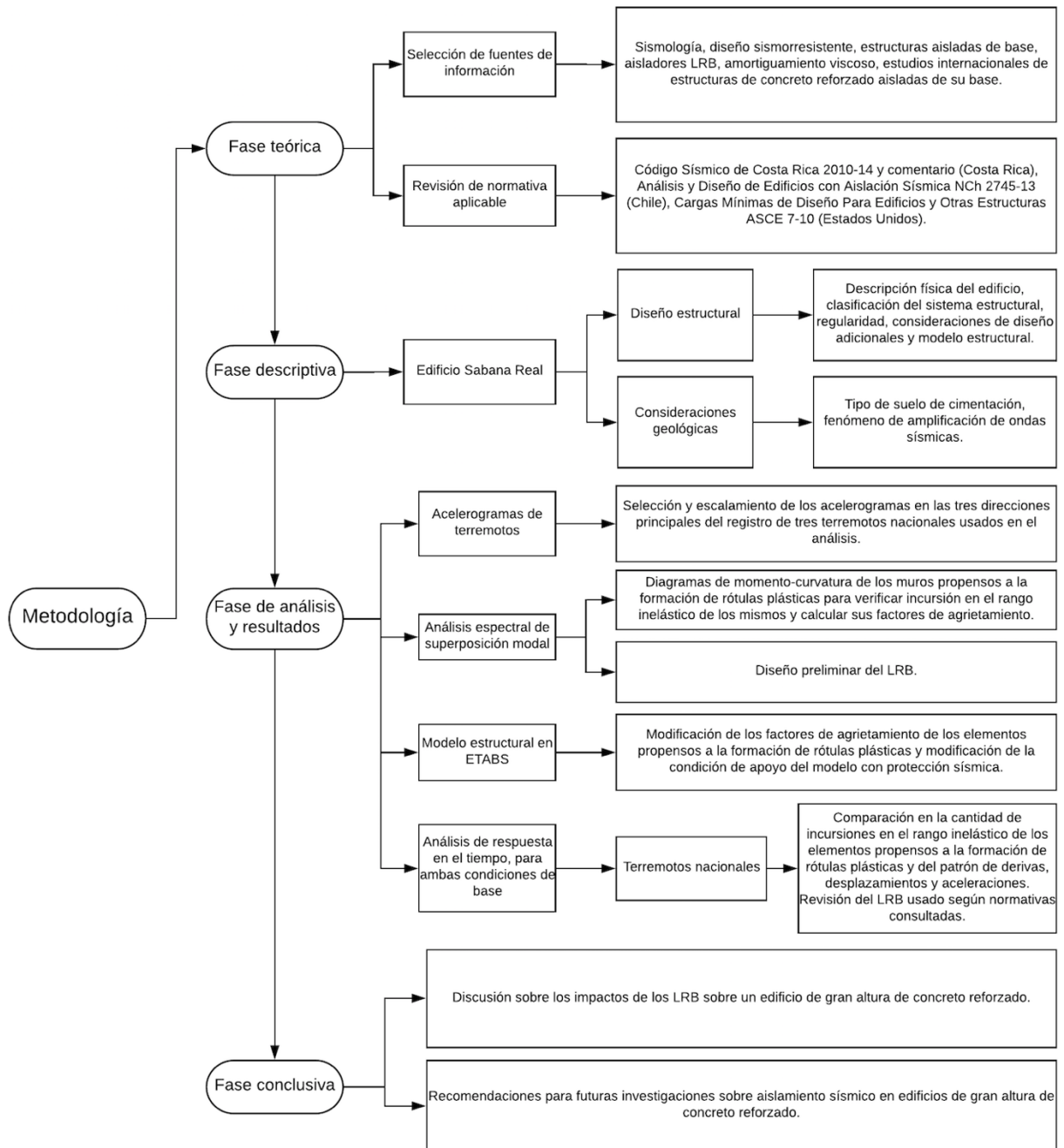
Con este análisis, se comparó la cantidad de veces que los muros incursionaron en el rango inelástico, así como los patrones de derivas máximas absolutas, desplazamientos máximos absolutos y aceleraciones a lo largo de la superestructura con ambas condiciones de base.

Finalmente, los sistemas de protección sísmica utilizados se revisaron para que cumplieran con sus capacidades indicadas en los manuales del fabricante y con los requisitos de la normativas consultadas.

### **Fase conclusiva**

Se discutieron los impactos que ejercieron los aisladores LRB en el edificio Sabana Real para determinar si son una opción que podría beneficiar el diseño sísmico actual de edificios altos de concreto reforzado, en Costa Rica. Se hicieron sugerencias sobre el uso de aisladores sísmicos de base en edificios altos de concreto reforzado y aspectos a considerar en su diseño estructural, así como recomendaciones para futuros estudios sobre el tema.

La metodología explicada anteriormente se resume en la siguiente figura:

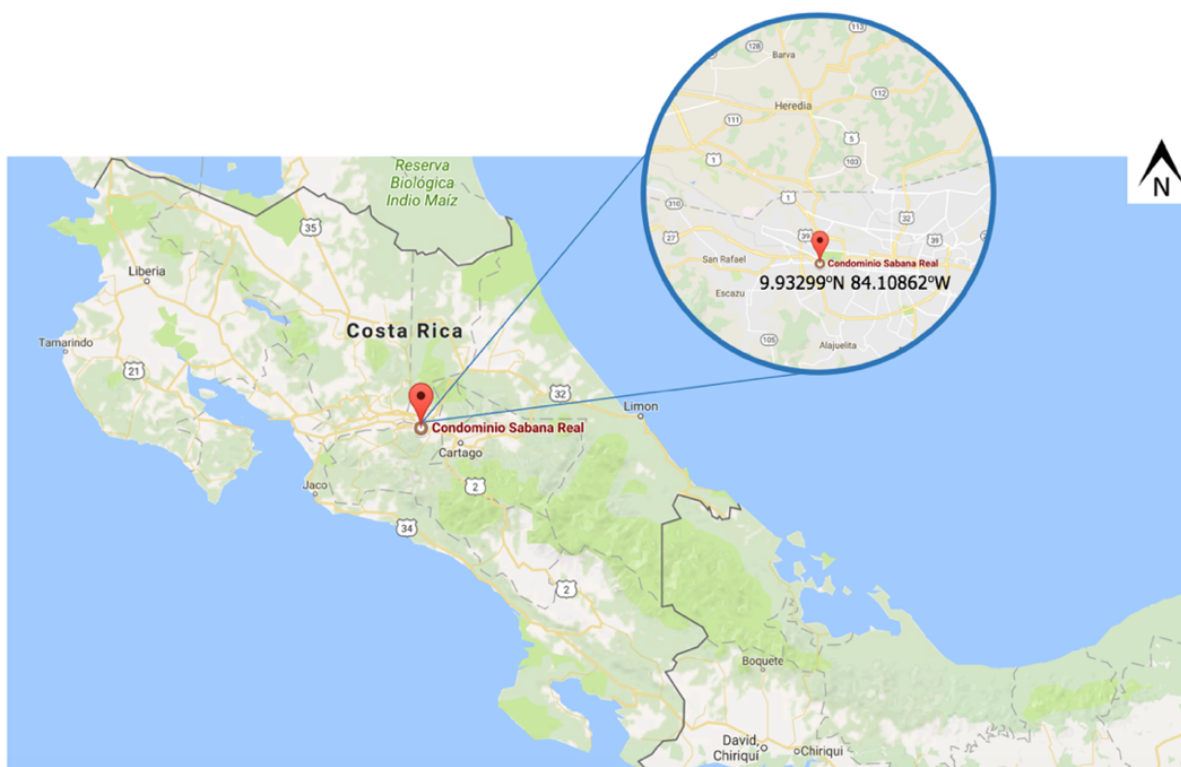


**Figura 22.** Metodología de la investigación.

## 4 Descripción del edificio e información básica

### 4.1 Descripción del edificio

Sabana Real, proyecto registrado como Condominio Vertical Comercial Residencial Sabana Real, es un edificio de concreto reforzado de 18 niveles (un sótano incluido), situado en el distrito de Mata Redonda, en el cantón de San José, Costa Rica, según se muestra:



**Figura 23.** Ubicación geográfica del edificio Sabana Real.

Fuente: Google Maps, 2017.

Modificado por Eskenazi, 2018.

A continuación se muestra una vista en elevación del edificio Sabana Real:



**Figura 24.** Vista aérea del edificio Sabana Real.

Fuente: Proycon, 2008.

Este edificio fue diseñado en el año 2006 por la empresa costarricense de diseño estructural IECA Internacional S.A, utilizando las normativas de diseño del Código Sísmico de Costa Rica CSCR-02 y los Requisitos de Reglamento de Concreto Estructural ACI 318S-05. Este capítulo se redactó con ayuda de los planos estructurales del edificio, suministrados por la empresa a cargo del diseño.

De manera general, este edificio es de tipo comercial-habitacional y de concreto reforzado, fue construido en el 2008 por la empresa constructora Proycon y se compone de 17 niveles y un sótano, con un área total de 11 746 m<sup>2</sup> (Proycon, 2008). Su estructura se clasifica como tipo muro y fue diseñada para una ductilidad de 1,5, de acuerdo con el diseño estructural de IECA Internacional S.A.

Como se puede observar en la figura anterior, la estructura es esbelta en uno de sus sentidos (sentido débil global) por lo que es posible que los elementos estructurales en la base fueron diseñados para resistir las fuerzas de tensión generadas sobre estos.

A continuación se presentan diferentes consideraciones del diseño estructural del edificio en cuestión:

#### **4.1.1 Clasificación según el CSCR-02**

##### **Zona sísmica y tipo de suelo**

Como el edificio está situado en el distrito de Mata Redonda del cantón de San José, se ubica en una zona sísmica III, de acuerdo con el CSCR-02 y con la versión actual del código, en su tabla 2.1. Además, el sitio de cimentación es de tipo S3 según el estudio #2349-06 de la firma Insuma S.A, con fecha del 21 de noviembre del 2006, el cual corresponde a suelos blandos. La aceleración pico efectiva del terreno en esa zona sísmica y en ese tipo de suelo es de 0,36g, según el CSCR-02, valor que se mantiene en la tabla 2.3 de la versión actual del código (CCSCR, 2014).

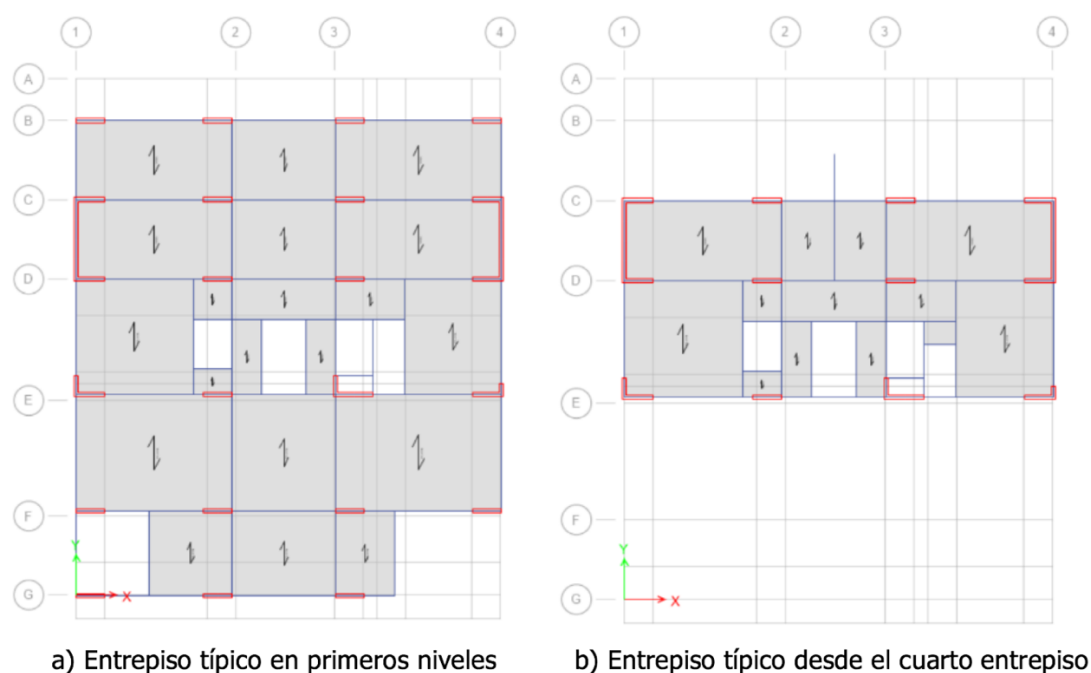
##### **Clasificación según su uso**

La estructura por ser un edificio de oficinas y de habitación se clasifica como una edificación de ocupación normal (grupo D), según el CSCR-02, por lo que se le asigna

un factor de importancia de  $I=1$ . De esta forma, el sismo de diseño posee un período de retorno de 475 años y una probabilidad de excedencia de 10% en una vida útil de 50 años (CCSCR, 2014).

### Clasificación según su forma estructural

El edificio Sabana Real es de tipo muro, según la sección 4.2.3 en la versión actual del CSCR, ya que las fuerzas sísmicas son resistidas mediante muros de corte de concreto reforzado, únicamente. El edificio es considerado como uno con irregular moderada de acuerdo con la sección 4.3 de la versión actual del CSCR. Esto se debe a que este presenta irregularidad en planta, pues se da un cambio en el área en planta en el mismo, pasando de los locales comerciales a los locales residenciales. Este caso se muestra a continuación:



**Figura 25.** Entrepisos típicos de Sabana Real.

Fuente: IECA Internacional S.A, 2006.

Modificado por: Eskenazi, 2018.



Como se observa en la parte a) de la figura anterior, los primeros niveles tienen un área mayor por lo que tienen una mayor presencia de muros estructurales. Sin embargo, en la parte b) de la misma figura, se observa la estructuración desde el cuarto entrepiso en adelante, donde se mantienen la mayoría de los muros en el sentido Y pero no así para los muros en el sentido X. Por lo tanto, en este entrepiso se presenta una excentricidad del 18%, aproximadamente. Debido a esto y a los otros requisitos estipulados en el capítulo 4 del CSCR-10/14, la estructura tiene irregularidad moderada.

Conociendo el tipo de estructura y su irregularidad, es posible calcular la ductilidad global asignada del edificio Sabana Real; esto mediante la tabla 4.3 de la versión actual del CSCR. En esta sección se estipula que, para un edificio tipo muro con irregularidad moderada, este debe ser diseñado con una ductilidad global asignada de 2,0 para cumplir con los requisitos de ductilidad local óptima, o de 1,5 para cumplir con los requisitos de ductilidad local moderada. En este caso, los diseñadores decidieron diseñar con ductilidad local moderada, por lo que se utilizó una ductilidad global asignada de 1,5.

#### **4.1.2 Descripción de los materiales**

El edificio Sabana Real incluye en su diseño los siguientes materiales constructivos:

- **Concreto reforzado:** La mayoría de los elementos estructurales (vigas, losas, columnas, fundaciones y escaleras) están contruidos con concreto de resistencia a la compresión simple de 28 MPa. Sin embargo, algunos de los muros estructurales en los primeros niveles de la estructura tienen resistencia de 70 MPa y de 40 MPa en niveles intermedios. Además, las viguetas de entrepiso pretensadas tienen una resistencia de 35 MPa.
- **Mampostería:** el tapichel y las paredes no-estructurales están construidas con bloques de mampostería de 12 y de 15 cm de espesor, ambos clase A según la clasificación del CSCR-10/14.

- **Acero de refuerzo:** consta en varillas de acero corrugadas que cumplen con la normativa ASTM A-615. Para varillas #4 o menores se utilizó acero G40 ( $f_y = 280$  MPa) y para varillas #5 o mayores G60 ( $f_y = 420$  MPa).
- **Acero estructural:** los elementos para los techos constan en perfiles de acero laminado en frío G33 ( $f_y = 232$  MPa), cumpliendo con la norma ASTM A570-33. Elementos como placas, angulares y otros elementos de acero utilizados son G36 ( $f_y = 254$  MPa), cumpliendo con la norma ASTM A-36.
- **Acero de pretensión:** los entrepisos pretensados tienen torones G250, cumpliendo con la normativa ASTM A-616, de 9,5 mm de diámetro y conformados por siete alambres trenzados.

#### 4.1.3 Descripción de las cargas de diseño

Las cargas consideradas en el diseño del edificio Sabana Real son la carga permanente, la carga temporal (o viva), la carga de sismo y la carga de empuje de suelo. No se consideró la carga de viento para efectos de diseño ya que para una estructura de esa dimensión y de concreto reforzado, rigen los efectos sísmicos sobre los del viento. Las cargas consideradas se describen a continuación:

Las cargas permanentes se resumen a continuación:

- Parqueo y comercio con losa de concreto reforzado de 250 mm:  $935 \text{ kg/m}^2$
- Parqueo y comercio con losa multitubular:  $875 \text{ kg/m}^2$
- Parqueo y comercio con viguetas pretensadas:  $760 \text{ kg/m}^2$
- Parqueo con losa de concreto reforzado de 250 mm:  $695 \text{ kg/m}^2$
- Parqueo con losa multitubular:  $515 \text{ kg/m}^2$
- Parqueo con viguetas pretensadas:  $455 \text{ kg/m}^2$
- Oficina con losa multitubular:  $735\text{-}830 \text{ kg/m}^2$
- Oficina con viguetas pretensadas:  $675\text{-}770 \text{ kg/m}^2$
- Vestíbulo con losa multitubular:  $1\ 110\text{-}1\ 670 \text{ kg/m}^2$
- Vestíbulo con viguetas pretensadas:  $555\text{-}650 \text{ kg/m}^2$
- Apartamentos con losa de concreto reforzado de 150 mm:  $675 \text{ kg/m}^2$

- Apartamentos con losa multitubular: 735-1 185 kg/m<sup>2</sup>
- Apartamentos con viguetas pretensadas: 675 kg/m<sup>2</sup>
- Techos: 50 kg/m<sup>2</sup>

Por otro lado, las cargas temporales se resumen a continuación:

- Parqueo y comercio: 500 kg/m<sup>2</sup>
- Parqueo: 300 kg/m<sup>2</sup>
- Oficina: 250 kg/m<sup>2</sup>
- Vestíbulo: 400 kg/m<sup>2</sup>
- Apartamento: 200 kg/m<sup>2</sup>
- Techo: 40 kg/m<sup>2</sup> (CCSCR, 2014).

En cuanto a la carga de sismo, esta depende de la masa sísmica en cada nivel. La masa sísmica se define como la suma de la carga permanente (incluyendo el porcentaje de peso propio de los elementos estructurales asociados a ese nivel) más un 15% de la carga temporal en ese nivel, según lo solicita el CSCR-02 para edificios (sección 6.1.3 en la versión actual del código).

Finalmente, también se consideró la carga de empuje lateral del suelo sobre los muros de retención en los sótanos. Para esto, se tomaron los parámetros geotécnicos establecidos en el estudio #2349-06 de la firma Insuma S.A, con fecha del 21 de noviembre del 2006 (Insuma S.A, 2006).

#### **4.1.4 Descripción del sistema de fundación**

El edificio posee un sistema de cimentación profunda conformado por pilotes preexcavados de concreto reforzado y unidos mediante vigas de fundación de gran peralte. Algunos elementos del sótano se cimientan sobre un sistema de cimentación superficial, específicamente los muros de retención del sótano que tienen su propia placa corrida.

Para el sistema de cimentación profunda, los pilotes empleados son de 0,8, 1,2 y 1,5 m de diámetro, confinados mediante aros en forma de diamante y espirales. Estos

tienen una profundidad de 20,0 m y se apoyan sobre piedra toba en matriz arenosa; con una capacidad admisible entre 252,0-616,0 T, según su diámetro (Insuma S.A, 2006). Además, estos pilotes tienen una cabeza de concreto reforzado de 1,5 m de profundidad.

Dado que existe cierta excentricidad entre el centroide de los pilotes y el centroide de los elementos verticales que los cargan, producto de las colindancias en algunos casos, se tuvieron que implementar vigas de fundación de gran peralte. Estas tienen la función de no sólo unir a los pilotes de manera que trabajen como un solo sistema de fundación, sino también de transmitir la carga excéntrica a los mismos. Por esta razón, existen vigas de fundación con secciones de hasta 2,2 m de peralte.

En cuanto a las cimentaciones superficiales, estas se conforman principalmente por las placas corridas de los muros de retención de los sótanos. Las placas corridas se caracterizan por tener anchos de hasta 1,2 m y una profundidad de 2,5 m, respecto al nivel de piso terminado de los sótanos. Así mismo, en los sótanos están localizados el tanque de captación y el tanque contra incendios, cuya losa inferior funciona como su propia placa de cimentación. Finalmente, en un tramo del sótano existen varias columnas de acero, las cuales se asientan sobre placas aisladas de 1,1x1,1 m.

#### **4.1.5 Descripción de las columnas**

En los primeros niveles del edificio Sabana Real, así como en el último, se tienen pocas columnas de concreto reforzado de variada geometría pero con una resistencia a la compresión simple de 28 MPa, que fueron colocadas con el fin de reducir claros. Sin embargo, no forman parte del sistema sismorresistente ya que es un edificio tipo muro y estos se llevan la mayoría de la carga sísmica sobre la estructura.

Además, también se colocaron columnas de concreto reforzado en los extremos de las paredes desligadas de mampostería ya que estas últimas se construyeron con la técnica de mampostería confinada. Al ser parte de un elemento no estructural, estas columnas tampoco forman parte del sistema sismorresistente del edificio.

#### **4.1.6 Descripción de los muros estructurales**

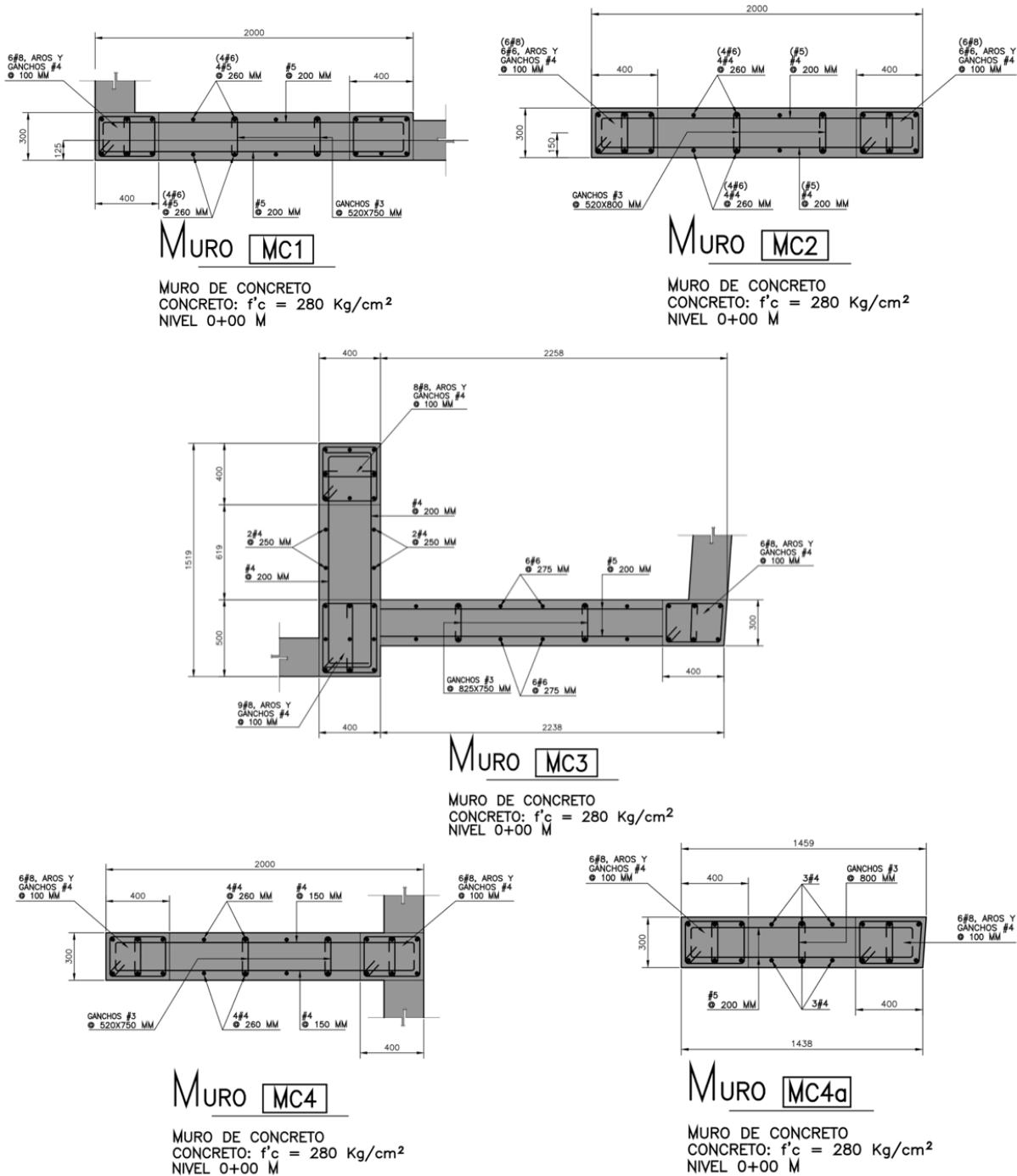
Los muros estructurales, o muros de corte, del edificio Sabana Real son de concreto reforzado, con espesores de 30 cm y con resistencias a la compresión simple variando entre 28-70 MPa. Estos muros tienen en su mayoría longitudes que rondan entre los 2,0-3,0 m, a diferencia de un tipo de muro que tiene una longitud de 5,25 m (muro MC12, cuya sección transversal se muestra en este capítulo). La mayoría de los muros tienen resistencias de 70 MPa en los primeros niveles, luego cambian a 40 MPa y finalmente llegan a tener resistencias de 28 MPa en los niveles superiores del edificio.

En cuanto a los refuerzos, el refuerzo longitudinal y transversal en los muros estructurales varía a lo largo de su altura, así como los amarres suplementarios. Sin embargo, siempre se mantiene una densidad de acero constante. Por otro lado, no todos los muros tienen elementos de borde.

En el caso de los muros de retención, estos están presentes a nivel de sótano y se componen tanto de los muros estructurales de los niveles superiores que deben tener continuidad hasta la cimentación como también de muros adicionales, también de concreto reforzado, necesarios para dar cerramiento al sótano y retener la masa de suelo alrededor del mismo. Estos muros adicionales tienen espesores de 25 cm, resistencias de 28 MPa y no contienen elementos de borde en sus extremos.

Para hacer la revisión de si el edificio Sabana Real se sale del rango elástico durante un sismo con la demanda sísmica de diseño que plantea el CSCR-10/14, se estudiaron los muros del primer nivel (entre 0+00 m y 3+20 m), así como los muros estructurales del cuarto nivel (entre 9+60 m y 12+80 m). Las secciones transversales de dichos elementos se muestran a continuación:

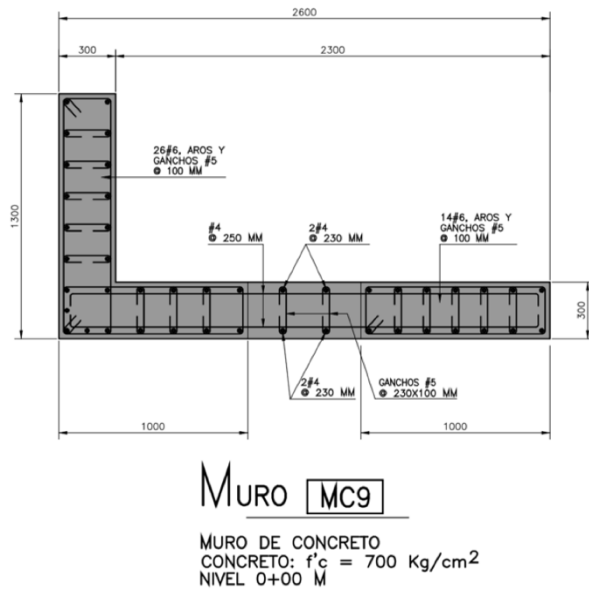
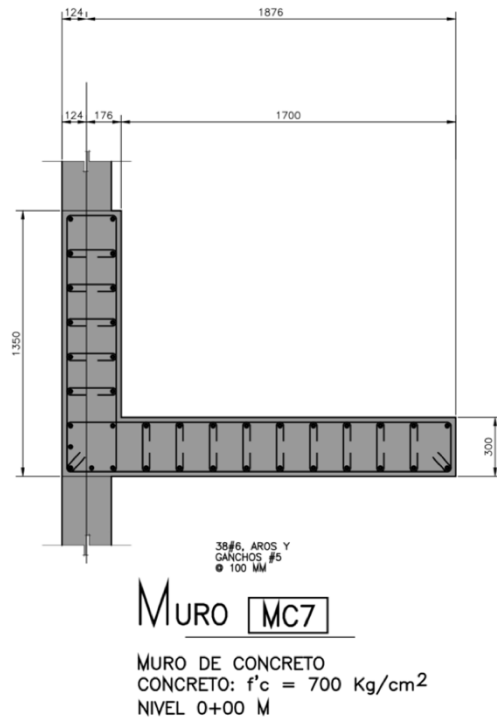
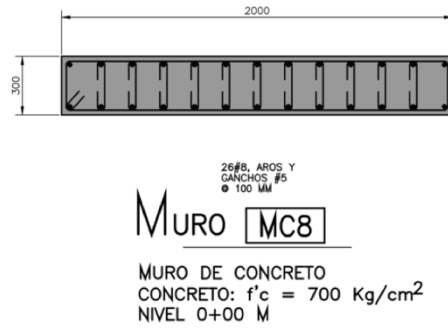
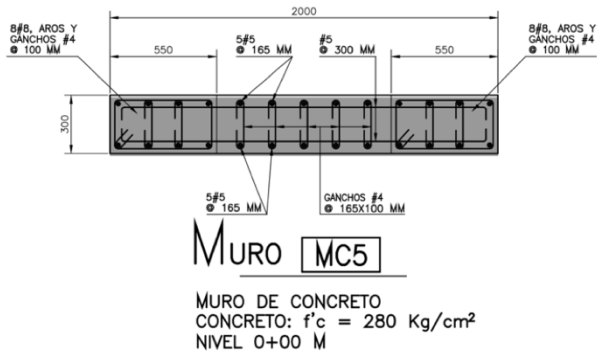
En primera instancia, los muros de primer nivel tienen las siguientes secciones transversales:



**Figura 26.** Secciones de los muros del nivel 0+0,00 - 0+3,20 (MC1-MC4a).

Fuente: IECA Internacional S.A, 2006.

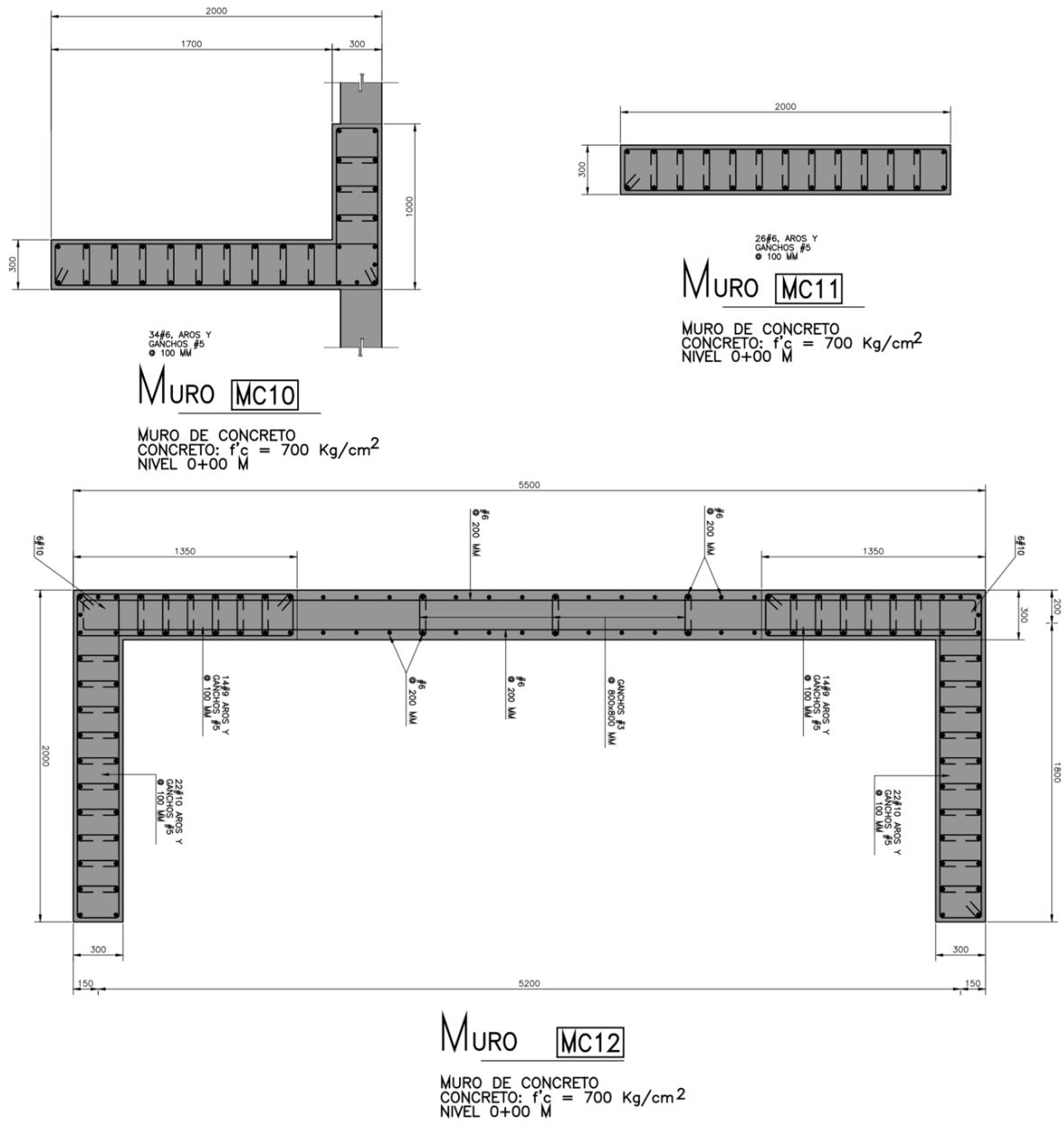
Modificado por Eskenazi, 2018.



**Figura 27.** Secciones de los muros del nivel 0+0,00 - 0+3,20 m (MC5-MC9).

Fuente: IECA Internacional S.A, 2006.

Modificado por Eskenazi, 2018.



**Figura 28.** Secciones de los muros del nivel 0+00 - 0+3,20 m (MC10-MC12).

Fuente: IECA Internacional S.A, 2006.

Modificado por Eskenazi, 2018.



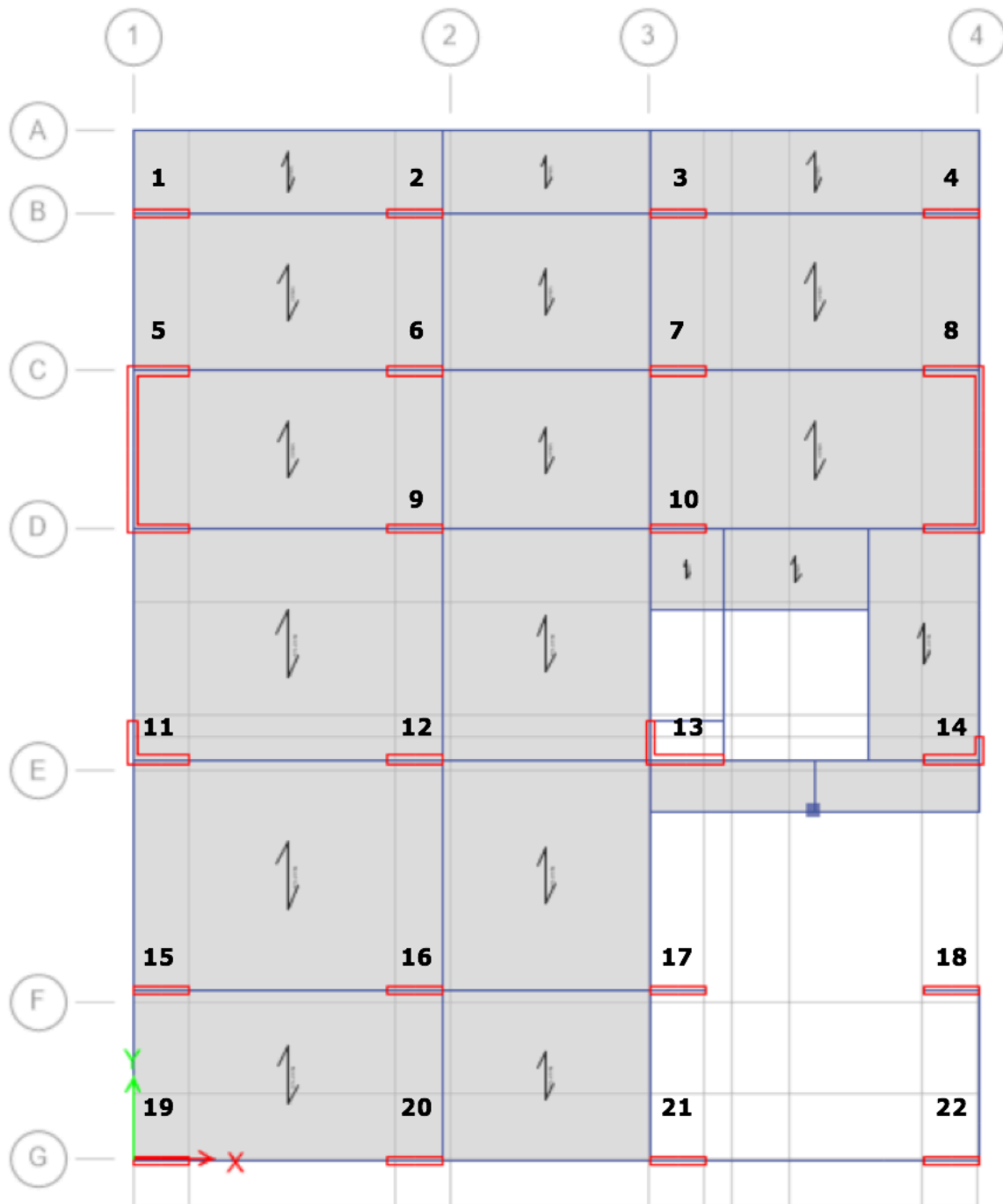
Como se puede observar en las figuras anteriores, la mayoría de los muros tienen elementos de borde (zonas con amarres complementarios) puesto que se trata de los muros del primer nivel y estos están expuestos a una alta demanda de carga, tanto axial como flexionante y de cortante.

Con base en las figuras anteriores, en el siguiente cuadro se presenta la clasificación de los muros del primer nivel para luego proceder a ubicarlos en planta.

**Cuadro 5.** Clasificación de los muros del primer nivel según su sección transversal.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Sección |
|-------------------------------------|-------------|-------|---------|
| X                                   | 1           | 1     | MC05    |
| X                                   | 2           | 1     | MC05    |
| X                                   | 3           | 1     | MC05    |
| X                                   | 4           | 1     | MC05    |
| X                                   | 6           | 1     | MC11    |
| X                                   | 7           | 1     | MC11    |
| X                                   | 9           | 1     | MC08    |
| X                                   | 10          | 1     | MC08    |
| X                                   | 11          | 1     | MC07    |
| X                                   | 12          | 1     | MC08    |
| X                                   | 13          | 1     | MC09    |
| X                                   | 14          | 1     | MC10    |
| X                                   | 15          | 1     | MC4     |
| X                                   | 16          | 1     | MC05    |
| X                                   | 17          | 1     | MC05    |
| X                                   | 18          | 1     | MC4a    |
| X                                   | 19          | 1     | MC1     |
| X                                   | 20          | 1     | MC1     |
| X                                   | 21          | 1     | MC2     |
| X                                   | 22          | 1     | MC3     |
| Y                                   | 5           | 1     | MC12    |
| Y                                   | 8           | 1     | MC12    |

Como se muestra en el cuadro anterior, a los muros también se les asignó el eje global de resistencia principal. Esto para mostrar, por ejemplo, que los muros 5 y 8 son los que resisten la carga sísmica en el eje Y, principalmente. El resto de muros tiene una mayor participación resistiendo la carga sísmica en el sentido X. Estos se pueden localizar en la planta del primer nivel (0+00 m a 3+20 m) que se muestra en la siguiente figura:

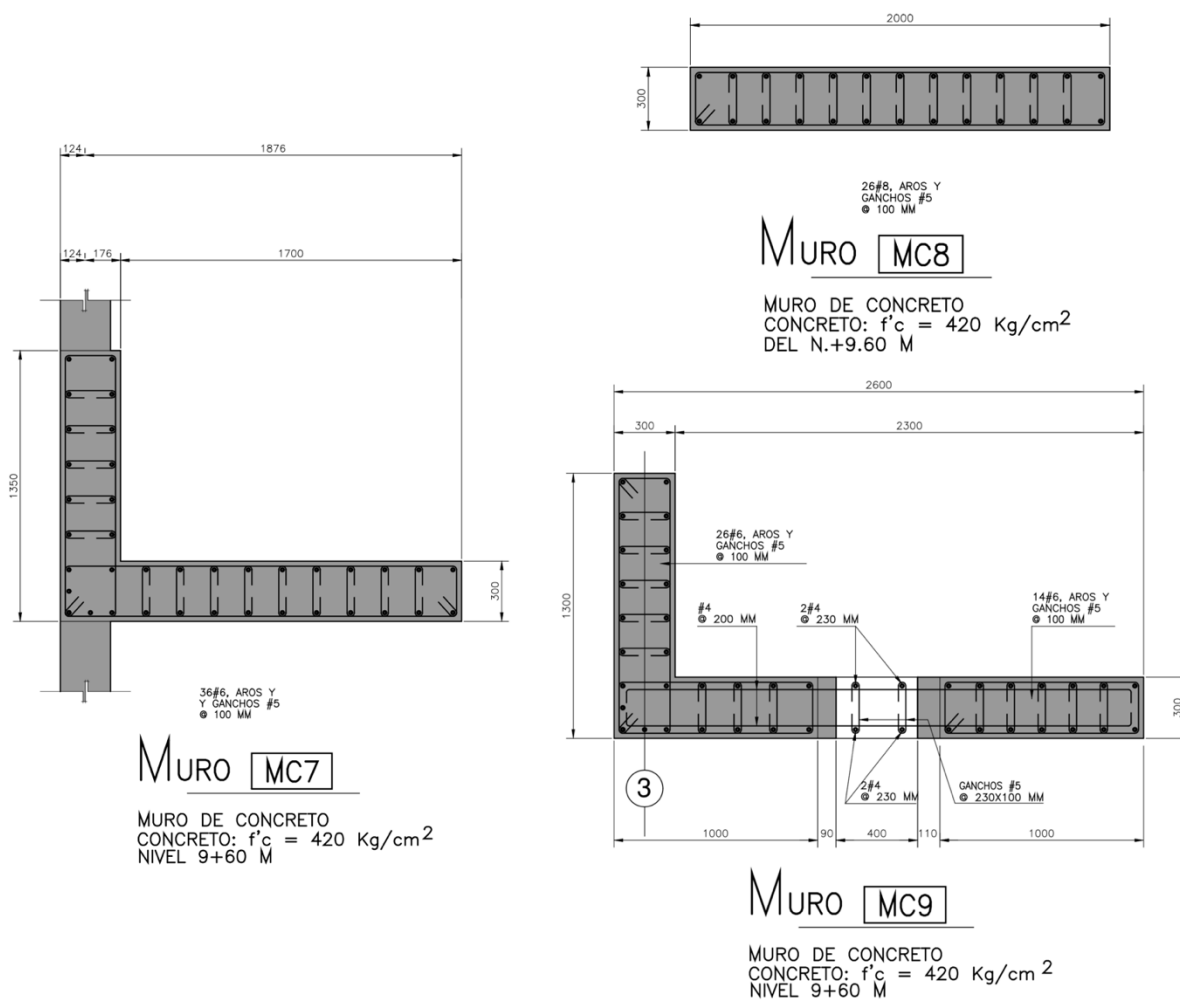


**Figura 29.** Planta de muros del primer nivel.

Fuente: IECA Internacional S.A, 2006.

Modificado por Eskenazi, 2018.

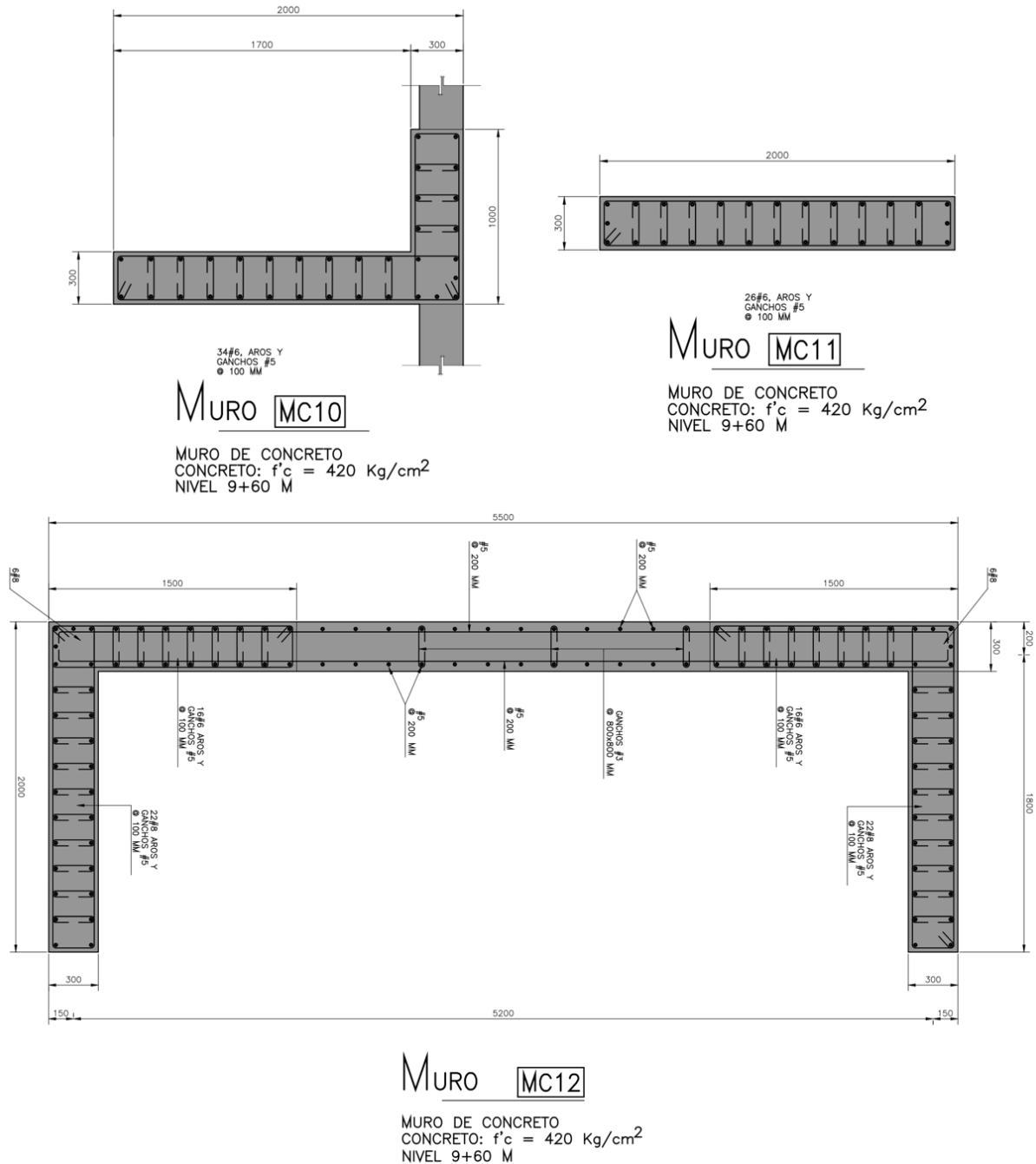
Finalmente, en las siguientes figuras se aprecian las secciones transversales de los muros estructurales del cuarto nivel:



**Figura 30.** Secciones de los muros del nivel 9+60 – 12+80 m (MC7-MC9).

Fuente: IECA Internacional S.A, 2006.

Modificado por Eskenazi, 2018.



**Figura 31.** Secciones de los muros del nivel 9+60 – 12+80 m (MC10-MC12).

Fuente: IECA Internacional S.A, 2006.

Modificado por Eskenazi, 2018.

Como se puede observar en las figuras anteriores, la dimensión de los muros en el cuarto nivel es similar a su correspondiente muro en el primer nivel. La diferencia entre

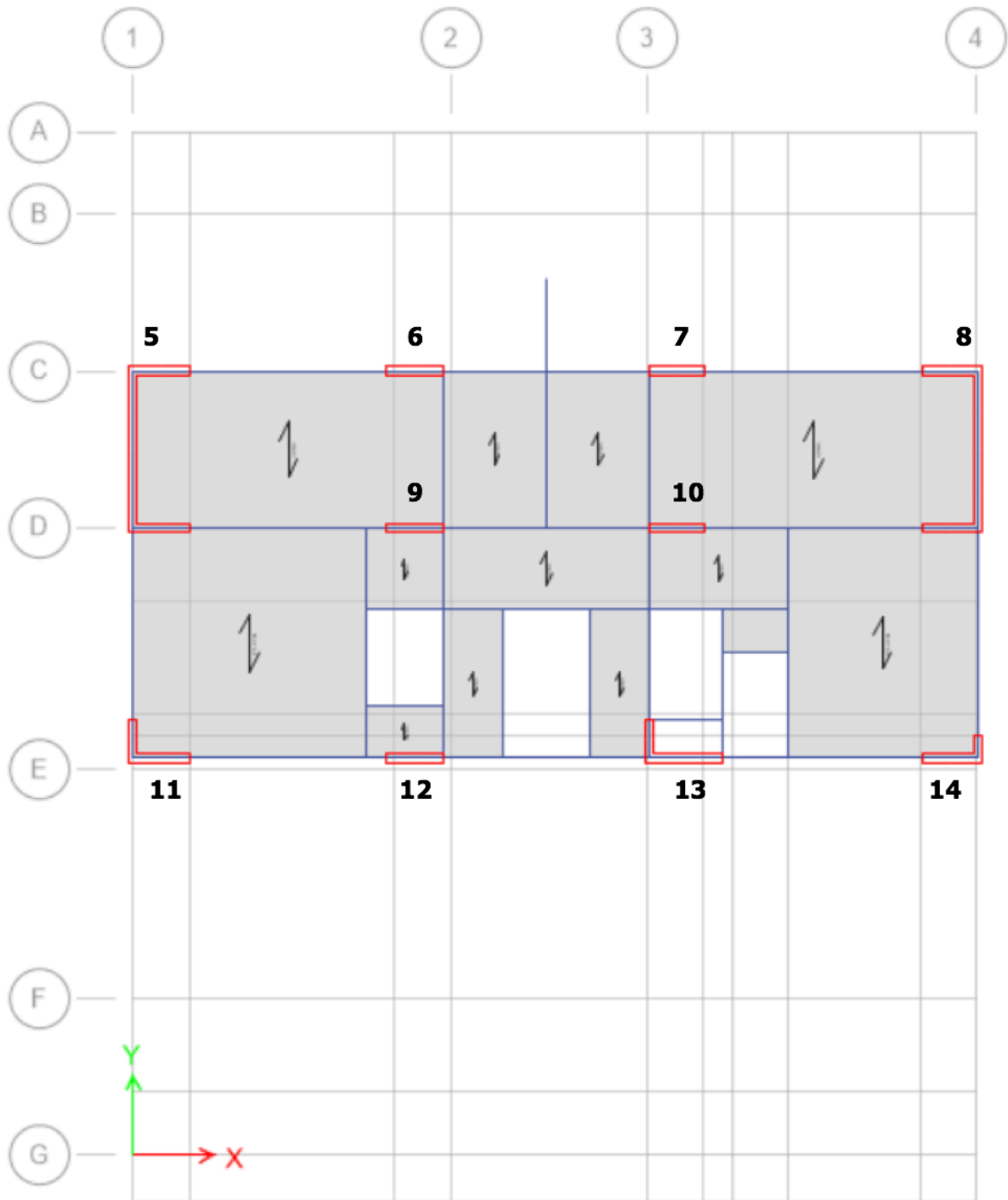
ambos niveles radica en una disminución en la resistencia a la compresión simple del concreto, en el número de las varillas longitudinales y de los amarres. Esto se debe a que el nivel de cargas es menor en el cuarto nivel por lo que se puede reducir la capacidad de los muros en este punto.

Con base en las figuras anteriores, en el siguiente cuadro se presenta la clasificación de los muros del cuarto nivel para luego proceder a ubicarlos en planta.

**Cuadro 6.** Clasificación de los muros del cuarto nivel según su sección transversal.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Sección |
|-------------------------------------|-------------|-------|---------|
| X                                   | 6           | 4     | MC11    |
| X                                   | 7           | 4     | MC11    |
| X                                   | 9           | 4     | MC08    |
| X                                   | 10          | 4     | MC08    |
| X                                   | 11          | 4     | MC07    |
| X                                   | 12          | 4     | MC08    |
| X                                   | 13          | 4     | MC09    |
| X                                   | 14          | 4     | MC10    |
| Y                                   | 5           | 4     | MC12    |
| Y                                   | 8           | 4     | MC12    |

Como se observa en el cuadro anterior, al igual que en los muros del primer nivel, se le asignó la dirección global de resistencia a cada muro para entender que en el cuarto nivel, los muros que resisten principalmente la carga sísmica con sentido Y son los muros 5 y 8. Estos se pueden localizar en la planta del cuarto nivel (9+60 m a 12+80 m) que se muestra en la siguiente figura:



**Figura 32.** Planta de muros del cuarto nivel.

Fuente: IECA Internacional S.A, 2006.

Modificado por Eskenazi, 2018.

#### 4.1.7 Descripción de los entrepisos

Los entrepisos de edificio Sabana Real son de variado tipo. Entre estos, se encuentran los siguientes:

- **Losas de concreto reforzado:** tienen espesores entre 15,0-25,0 cm, con excepción de algunas entre 6,0-8,5 cm de espesor, que están presentes en el último entrepiso del edificio. Todas tienen una resistencia a la compresión simple de 28 MPa.
- **Entrepisos con viguetas pretensadas de concreto reforzado:** las viguetas tienen una resistencia a la compresión simple de 35 MPa, tienen entre 15,0-20,0 cm de peralte y contienen torones de 9,5 mm de diámetro. Además, este tipo de entrepiso tiene una sobrelosa de concreto reforzado entre 6,0-10,0 cm de espesor, con resistencia de 28 MPa, para un espesor total entre 21,0-30,0 cm.
- **Entrepisos con losas multitubulares:** las losas multitubulares utilizadas tienen peraltes entre 20,0-25,0 cm, con sobrelosas de concreto reforzado con espesores entre 6,0-10,0 cm y de 28 MPa, para un espesor total entre 26,0-35,0 cm.

Además, los entrepisos se apoyan sobre vigas de concreto reforzado. Estas tienen peraltes entre 30,0-128,0 cm, anchos entre 20,0-30,0 cm y están construidas con una resistencia a la compresión de 28 MPa.

#### 4.1.8 Descripción de los techos

El techo superior del edificio Sabana Real está compuesto tanto por losas de concreto reforzado entre 15,0-20,0 cm de espesor, que funcionan como azoteas, así como por tubos estructurales de acero laminado en frío; por lo tanto, clasifica como un diafragma flexible. Las losas de concreto reforzado descansan sobre vigas y muros que también son de concreto reforzado. Además, las zonas con azotea tienen un tapichel de altura variable, construido con bloques de mampostería de 15 cm de espesor.

Por otro lado, en la transición entre niveles comerciales y niveles residenciales, se tienen techos conformados por cerchas de perfiles de acero laminado en frío. Estas están construidas con canales de acero simples y dobles.

## 4.2 Condición geológica de la zona

De acuerdo con el estudio de suelos #2349-06 de la firma Insuma S.A, con fecha del 21 de noviembre del 2006 (Insuma S.A, 2006), el terreno donde se construyó el edificio Sabana Real tiene espesores considerables de suelos blandos ya que se encuentra dentro del Relleno Volcánico del Valle Central, conformado principalmente por lahares y cenizas. En este estudio, se definió el siguiente perfil geotécnico del sitio de emplazamiento del edificio:

- **0,0 a 8,5 m de profundidad:** limo arenoso de color café con baja plasticidad y blando en cuanto a su consistencia. En promedio, este tramo tiene un número de penetración estándar  $N_{SPT}$  de 8.
- **8,5 a 20,0 m de profundidad:** limo arcilloso de color café con plasticidad y consistencia media. En promedio, este tramo tiene un número de penetración estándar  $N_{SPT}$  de 25.
- **20,0 a 21,6 m de profundidad:** toba en matriz arenosa de color amarillento y con presencia de lava endurecida. Dada la alta consistencia de este tramo, no se le pudo asignar un número promedio de penetración estándar  $N_{SPT}$ .

Por lo tanto, el edificio Sabana Real se encuentra cimentado en un terreno con más de 20,0 m de estratos blandos. Como se explicó anteriormente, este tipo de suelo tiende a amplificar las ondas sísmicas de un sismo, para un rango de frecuencias específicas, debido a que les toma más tiempo atravesarlo pero también se requiere de menos energía para lograrlo. En consecuencia, las ondas sísmicas transportan un mayor nivel de energía y su impacto sobre las estructuras tiende a ser mayor. Por ejemplo, durante el Terremoto de Cinchona del 2009, se presentaron aceleraciones pico similares tanto en Alajuela (cerca del epicentro) como en La Sabana (más alejado del epicentro). Profesionales atribuyen esto al fenómeno de amplificación de ondas ya que en vez de



disminuir amplitud producto de la distancia recorrida, las ondas sísmicas en La Sabana mantuvieron sus aceleraciones (LIS, 2009b).

Además, de acuerdo con la tesis de licenciatura de la Universidad de Costa Rica de Salas (1999), los suelos en La Sabana tienen capas de suelo blando mayores a 10,0 m, como se corroboró en el estudio de suelos realizado para el edificio, y presentan un comportamiento bastante flexible (períodos de vibración altos); el primer modo de vibración tiene períodos entre 0,65-1,00 s y el segundo entre 0,28-0,30 s. A partir de una prueba de refracción sísmica de esta tesis, se demostró una reducción considerable en la velocidad de las ondas sísmicas dentro de este estrato en comparación con la velocidad de las mismas atravesando roca: esto evidencia una capa de suelo bastante blanda que tiene potencial de amplificar las ondas sísmicas que lo atraviesen. Además, a través de varios análisis de respuesta dinámica, se encontró que, a diferencia de otros puntos dentro del Gran Área Metropolitana, La Sabana tiene suelos blandos que tienen un factor de amplificación sísmica similar tanto en su primer modo de vibración como en su segundo, afectando a un mayor número de estructuras con diferentes períodos fundamentales.

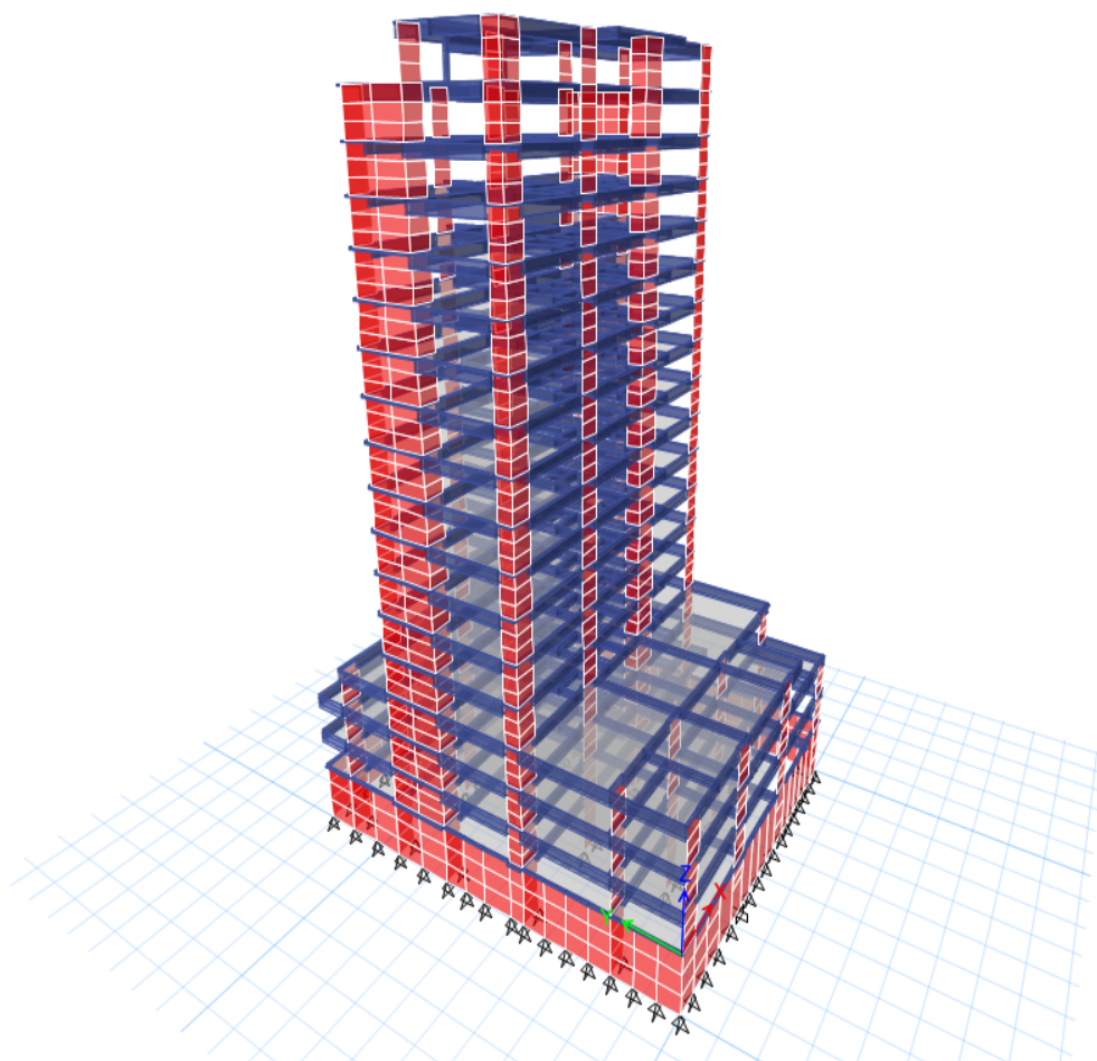
Lo anterior es respaldado por un estudio de microzonificación sísmica de San José, Costa Rica, realizado por Schmidt et al. (2005), donde se obtienen períodos de vibración similares para los suelos de La Sabana y se comprueba que los factores de amplificación de ondas sísmicas en los primeros dos períodos de vibración son similares. Para sismos fuertes, se obtuvo que el primer modo de vibración amplifica la señal sísmica con un factor de 2,2 y que el segundo lo hace con un factor de 1,6. Sin embargo, como el tipo de suelo en La Sabana era diferente al encontrado en otras zonas de la capital, los autores indican que estos parámetros no se pueden generalizar ya que pueden variar, aun dentro de La Sabana.

## 5 Análisis estructural y diseño de los LRB

### 5.1 Modelo estructural original

#### 5.1.1 Modelo estructural sin sistemas de protección sísmica

El modelo estructural del edificio Sabana Real, con base convencional, fue elaborado por la empresa de diseño estructural IECA Internacional S.A. A continuación se muestra una imagen del modelo, para luego indicar ciertas consideraciones sobre el mismo.



**Figura 33.** Modelo estructural original del edificio Sabana Real.

Fuente: IECA Internacional S.A, 2006.

Como se observa en la figura anterior, el modelo del edificio en estudio considera tanto los 17 niveles sobre el nivel del terreno, así como su único sótano. Además, el modelo tiene las siguientes consideraciones:

- Es un modelo tridimensional ya que se diseñó mediante el método espectral y, para un edificio con irregularidad en planta, así lo requiere el CSCR.
- Los apoyos en la base del sótano se asumieron como articulaciones, restringiendo desplazamientos pero no rotaciones.
- Los sótanos incluyen la carga de empuje del suelo actuando sobre sus muros.
- No considera el sistema de cimentación de la estructura.
- Los diafragmas de los entrepisos se definieron como rígidos, por lo que la carga sísmica se distribuye proporcionalmente a los elementos sismorresistentes según su rigidez relativa.
- No se modelaron las cerchas de techo ni las paredes no-estructurales de mampostería, sólo se agregó su carga respectiva sobre el elemento estructural en el que se apoyan.
- No consideran las escaleras ya que son de acero y su masa no influye de manera significativa en los períodos de vibración de la estructura.
- Se asignaron factores de agrietamiento en las vigas según los códigos de diseño ACI 318S-05 y CSCR-02.
- Los muros se definieron como elemento tipo *plate*, las vigas se definieron como elementos tipo barra y los entrepisos pre-tensados como losas en una dirección.
- El modelo considera un 15% de la carga temporal como aporte a la masa sísmica, según lo que plantea el CSCR para edificios en su sección 6.1.3 (CCSCR, 2014).
- No se definieron las propiedades inelásticas de los materiales ya que se diseñó con el método espectral de superposición modal del CSCR-02, que considera la disipación de energía de la estructura en función de su ductilidad asignada.

Finalmente, el modelo también cumple con los requisitos de grados de libertad que solicita el CSCR-02 en su sección 7.5.2, así como la normativa ASCE 7-10 en su sección 16.2.2.

Las siguientes modificaciones fueron hechas al modelo del edificio con base convencional para poder llevar a cabo el análisis de respuesta en el tiempo:

- Se actualizó el espectro de respuesta elástico de diseño definido en el CSCR-10/14, con ductilidad y sobrerresistencia unitaria.
- Se modificaron los factores de agrietamiento en las secciones transversales de los elementos de concreto reforzado propensos a la formación de rótulas plásticas (muros), mediante los diagramas de momento-curvatura calculados.
- Los registros de aceleración escalados se aplicaron al modelo en la dirección real de medición y de manera simultánea ya que así sucede en la realidad.
- Se modificó la fuente de masa sísmica para considerar el aporte de la masa a la fuerza inercial vertical, producto de la componente vertical de los sismos.
- La normativa ASCE 7-10 solicita, en su sección 16.2.3, considerar un 25% de la carga temporal al calcular la carga sísmica (ASCE, 2010).
- Sólo se consideró la combinación de carga CU3 del CSCR-10/14 ya que es la más probable durante un evento sísmico.

Se consideraron los modos de oscilación necesarios para alcanzar, como mínimo, un 90% de masa participando en cada una de las tres direcciones principales (X, Y y Z).

### 5.1.2 Análisis modal

El análisis modal de una estructura es importante ya que caracteriza el comportamiento dinámico de la misma, cuyo resultado abarca el período de vibración de cada modo, las formas modales y el porcentaje de participación de masa en cada dirección.

A continuación se presenta un resumen de los modos de vibración más importantes (con un porcentaje de masa participativa mayor al 5% en alguna dirección principal) del edificio Sabana Real sin aislamiento sísmico, incluyendo los primeros dos modos de torsión dada la irregularidad del edificio. Se presentan los porcentajes de masa participativa tanto en traslación como en rotación.

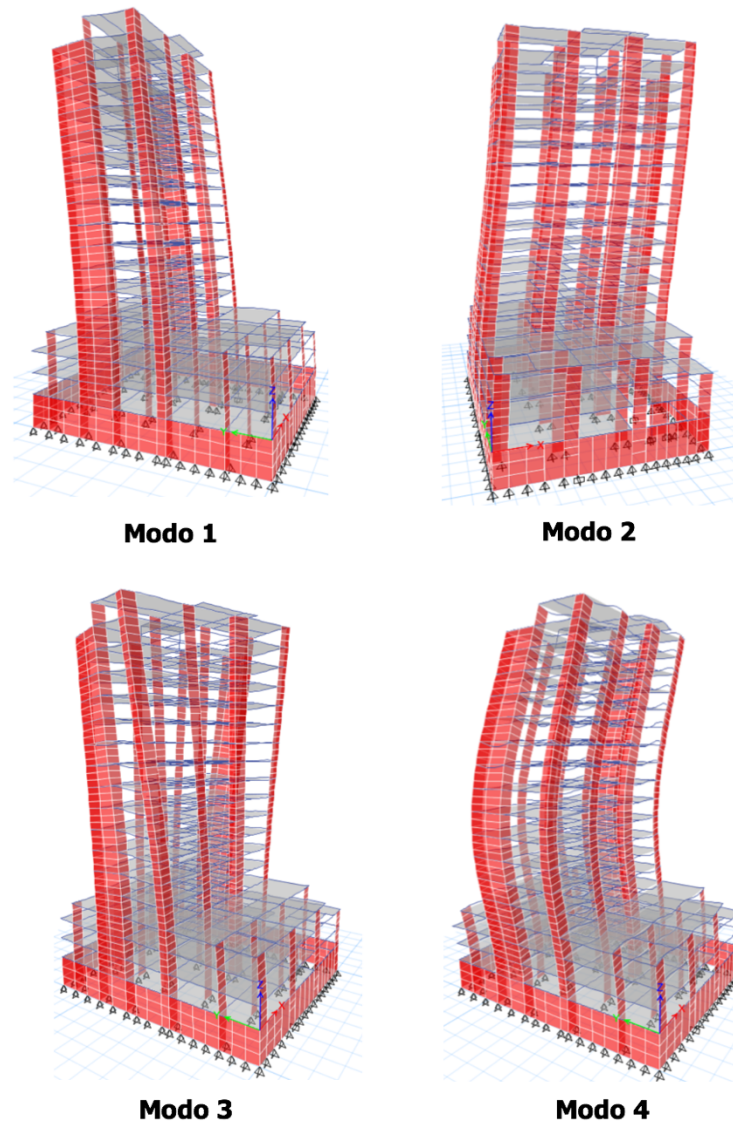
**Cuadro 7.** Modos de vibración importantes en el edificio sin sistemas de protección sísmica.

| Modo  | No. de modo | Período (s) | Traslacional                 |                              |                              | Rotacional                   |
|---|-------------|-------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|   |             |             | % de masa participativa en X | % de masa participativa en Y | % de masa participativa en Z | % de masa participativa en Z |
| Primer modo traslacional fundamental en planta  | 1           | 2,32        | 0,00                         | 53,00                        | 0,00                         | 0,11                         |
| Segundo modo traslacional fundamental en planta   | 2           | 2,17        | 57,00                        | 0,00                         | 0,00                         | 0,42                         |
| Primer modo de torsión fundamental en planta  | 3           | 1,42        | 57,36                        | 0,06                         | 0,00                         | 41,79                        |
| Segundo modo de flexión en el eje fuerte  | 4           | 0,64        | 13,96                        | 0,01                         | 0,00                         | 0,00                         |
| Segundo modo de flexión en el eje débil   | 5           | 0,50        | 0,01                         | 19,50                        | 0,02                         | 0,05                         |
| Segundo modo de torsión acoplado con el segundo modo de flexión                           | 8           | 0,34        | 2,60                         | 0,03                         | 0,51                         | 11,11                        |
| Tercer modo de flexión en el eje fuerte acoplado con el segundo modo de torsión en planta | 9           | 0,33        | 5,83                         | 0,01                         | 0,08                         | 9,35                         |
| Modo vertical fundamental   | 11          | 0,33        | 0,22                         | 0,01                         | 19,02                        | 0,16                         |

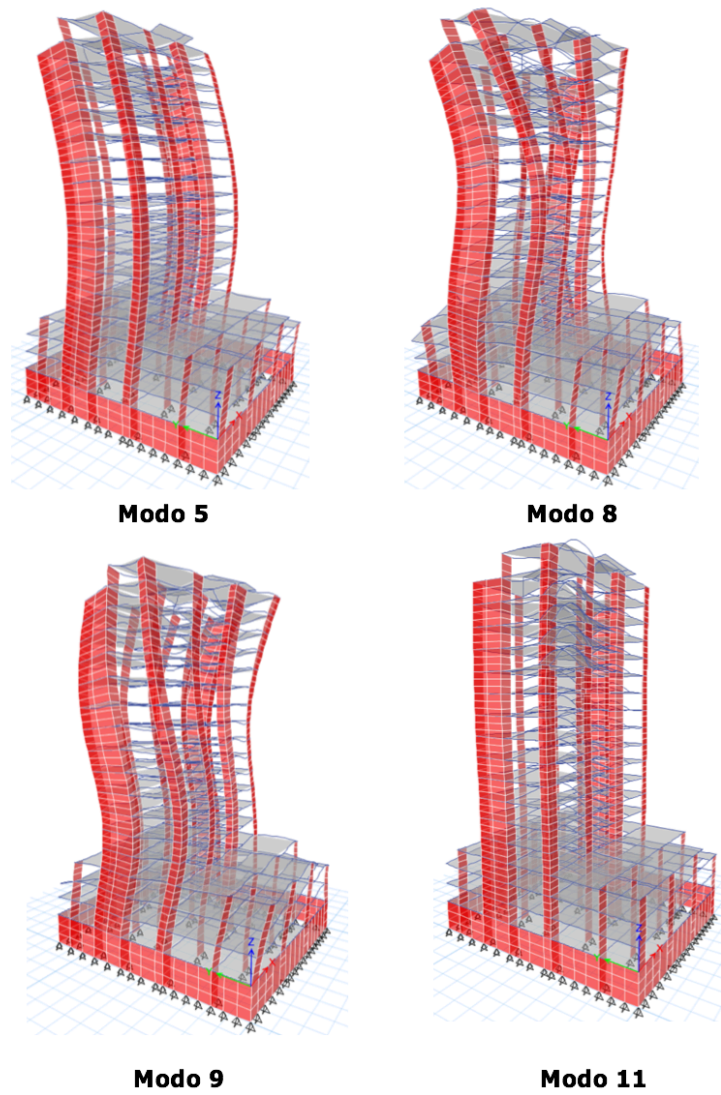
Como se observa en el cuadro anterior, los mayores modos de vibración tienen predominancia pues tienen un alto porcentaje de masa participando. Esto no es conveniente pues a estos modos de vibración se les relaciona con una mayor aceleración sísmica. El modo fundamental de la estructura es traslacional y tiene un período fundamental de 2,32 s, con más de la mitad de la masa participando.

Además, se observa que gran parte de la masa tiene rotación respecto al eje vertical en el segundo modo traslacional, aún más que en los modos propios de torsión en planta. Finalmente, el período fundamental vertical de la estructura es de 0,33 s.

Estos modos de vibración se muestran en las siguientes figuras:



**Figura 34.** Modos de vibración del edificio sin aislamiento sísmico (1-4)



**Figura 35.** Modos de vibración del edificio sin aislamiento sísmico (5, 8-9, 11).

## **5.2 Revisión preliminar de la incursión del edificio con base convencional en el rango inelástico**

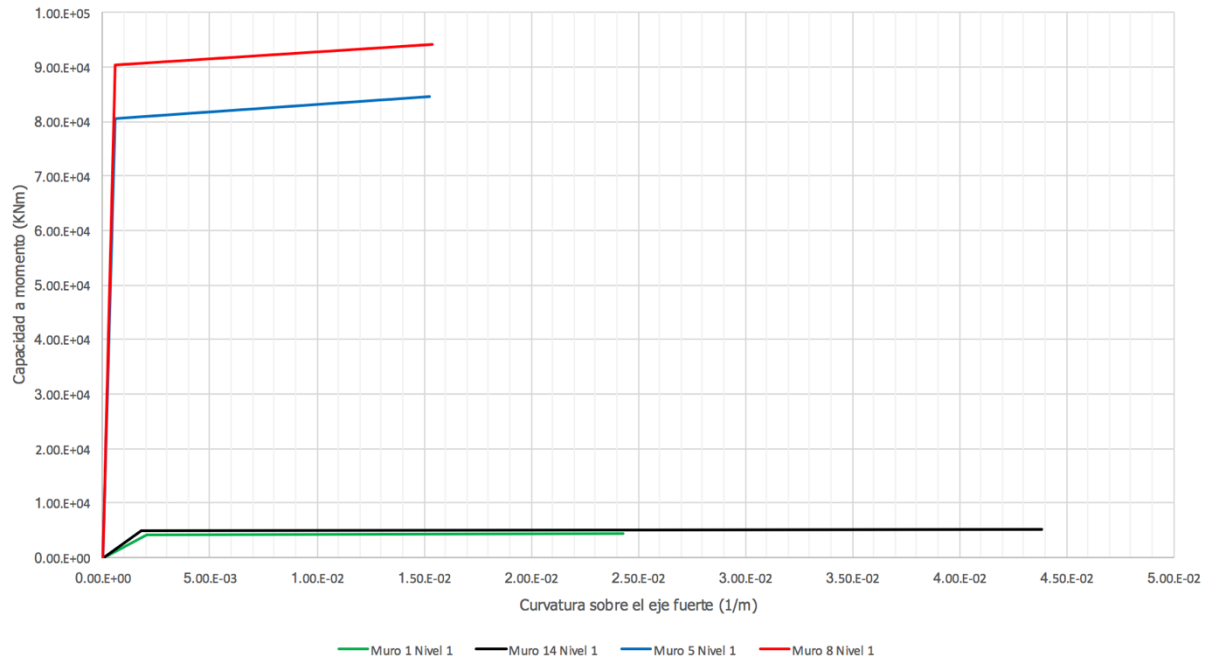
Los resultados detallados del cálculo de los diagramas de momento-curvatura de los muros estudiados en esta investigación, producto de su susceptibilidad a incursionar en el rango inelástico debido a la demanda a flexión sobre estos, se muestran en el Apéndice A.1. Entre estos resultados se encuentran: los parámetros necesarios para construir los diagramas de momento-curvatura en el programa XTRACT Cross Section Analysis, así como un ejemplo de un resultado dado por dicho programa.

Para efectos de la revisión preliminar de la incursión del edificio con base convencional en el rango inelástico, el parámetro de interés principal es la capacidad a flexión elástica de los muros estructurales estudiados, en sus dos sentidos ortogonales de resistencia. Sin embargo, para efectos gráficos, también se obtuvo de dicho programa la curvatura a fluencia de los muros, así como la capacidad a flexión última y la curvatura última; esto con el fin de poder construir el diagrama de momento-curvatura de los elementos estudiados.

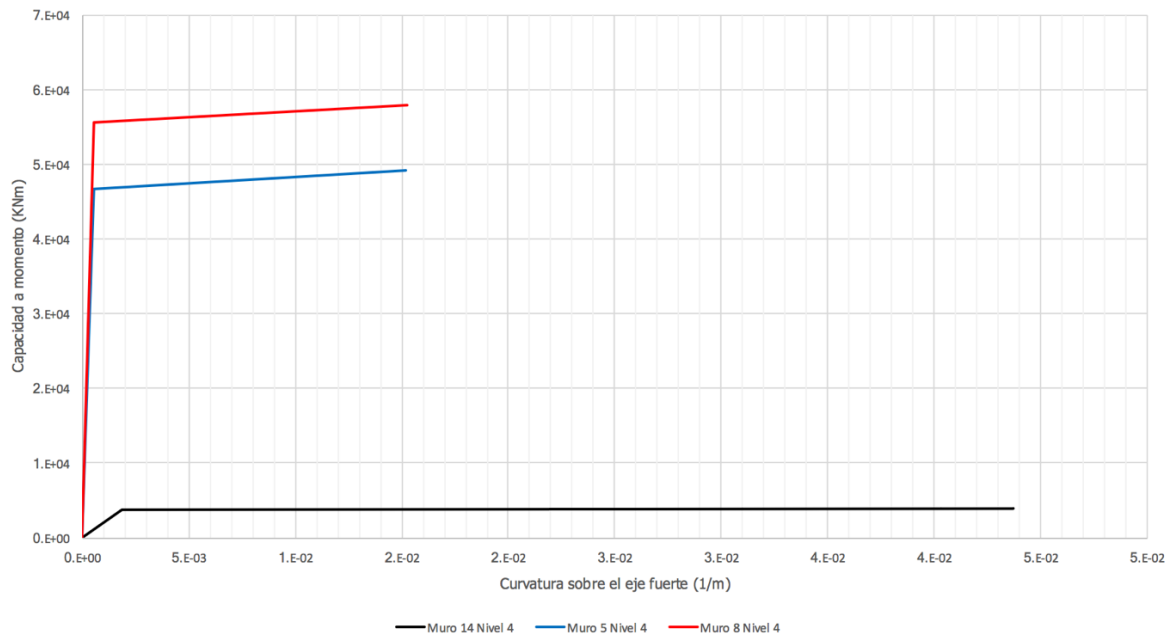
En las siguientes figuras se presentan algunos diagramas de momento-curvatura de los muros estudiados. Se seleccionaron los muros 1 y 14 (sentido X), así como los 5 y 8 (sentido Y), para describir la resistencia de los muros típicos en ambos sentidos ortogonales del edificio, tanto para el primer nivel como para el cuarto nivel. Sin embargo, el muro 1 no tiene continuidad vertical hasta el cuarto nivel.

Las siguientes dos figuras muestran el comportamiento de los muros estructurales seleccionados, en ambos niveles, actuando en su sentido fuerte:





**Figura 36.** Diagramas de momento-curvatura de algunos de los muros del primer nivel en su eje fuerte.



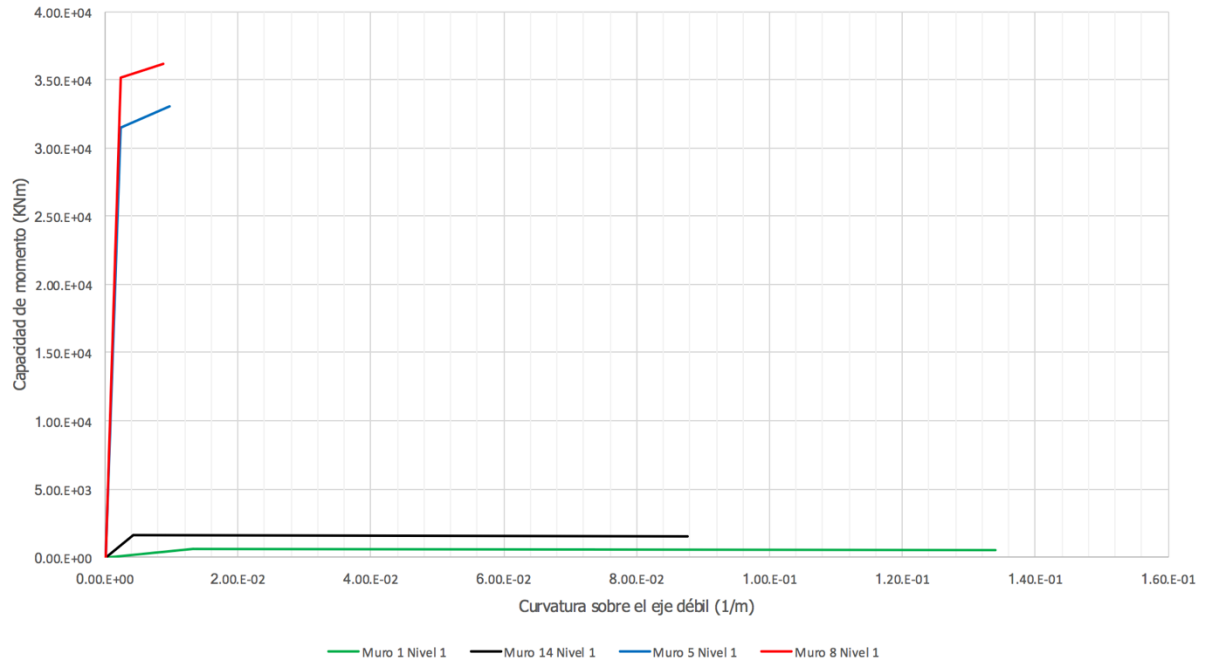
**Figura 37.** Diagramas de momento-curvatura de algunos de los muros del cuarto nivel en su eje fuerte.

Como se puede observar de la figuras anteriores, los muros 5 y 8 son los que tienen mayor capacidad a flexión elástica en su eje fuerte ya que son los muros que resisten, principalmente, las fuerzas sísmicas en la dirección Y del edificio (ver planta de distribución de muros en el capítulo 4).

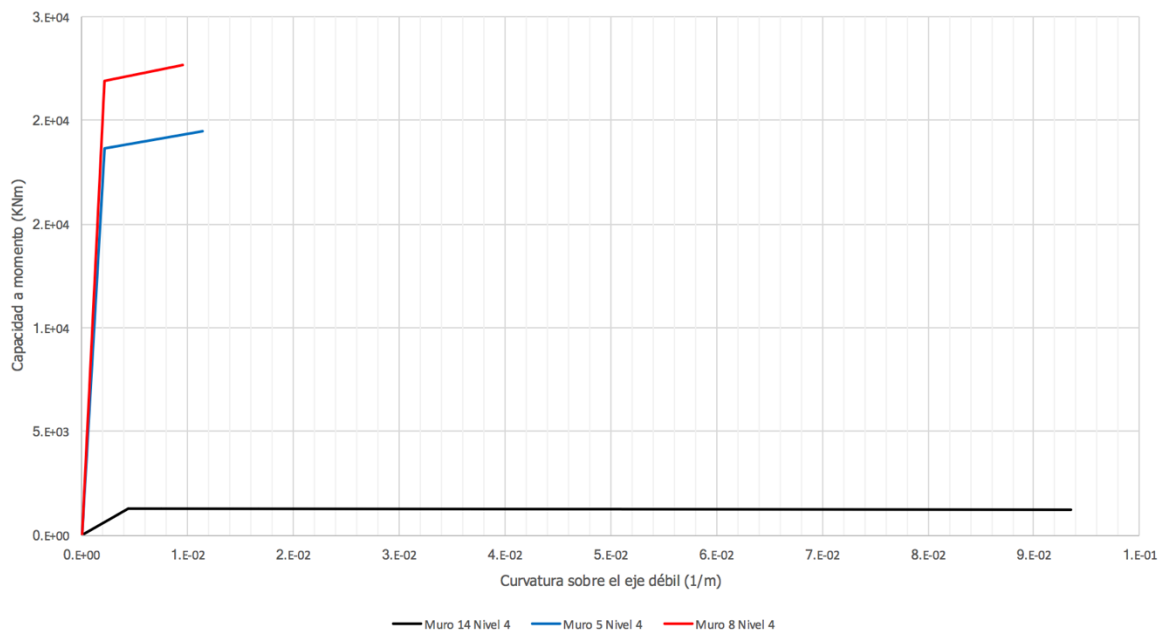
En el caso de los muros 1 y 14, estos resisten cargas sísmicas principalmente en el sentido X del edificio y tienen una capacidad a flexión en el eje fuerte menor que la de los muros anteriores ya que estos últimos tienen una rigidez relativa menor, también, dado que la densidad de muros resistiendo fuerzas laterales en ese sentido es mayor. Sin embargo, estos últimos muros tienen una alta capacidad de deformación comparado con la de los muros en el sentido ortogonal.

Lo que diferencia a los muros del primer nivel con los del cuarto nivel es su capacidad a flexión. Esta se ve reducida en este último nivel porque, como se muestra en el Apéndice A.1, la mayoría de los muros que se mantienen en ambos niveles reducen su resistencia a la compresión del concreto en el cuarto nivel, pero mantienen la densidad de acero.

Algo similar ocurre con los muros seleccionados actuando en su sentido débil, según se muestra en las dos figuras siguientes, con la diferencia de que las capacidades a flexión, tanto en el primer nivel como en el cuarto nivel, se ven reducidas porque, como el edificio es tipo muro, los muros estructurales son elementos diseñados para resistir cargas laterales en su eje fuerte, principalmente.



**Figura 38.** Diagramas de momento curvatura de algunos de los muros del primer nivel en su eje débil.



**Figura 39.** Diagramas de momento curvatura de algunos de los muros del cuarto nivel en su eje débil.

Con base en los diagramas de momento-curvatura y con el análisis espectral de superposición modal corrido en el modelo estructural original del edificio, se obtienen los siguientes cuadros para indicar cuáles muros incurrieron en el rango inelástico. Los resultados detallados se encuentran en el Apéndice A.2.

**Cuadro 8.** Revisión preliminar de la incursión en el rango inelástico de los muros del primer nivel.

| No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                                |                              |                        | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |
|-------------|-------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|
|             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda |
| 1           | 1     | 5,80E+02                                      | 1,16,E+02                      | No                           | NA                     | 4,14E+03                                      | 7,91,E+03                      | Sí                           | 1,9                    |
| 2           | 1     | 7,12E+02                                      | 1,14,E+02                      | No                           | NA                     | 5,06E+03                                      | 5,70,E+03                      | Sí                           | 1,1                    |
| 3           | 1     | 7,15E+02                                      | 1,17,E+02                      | No                           | NA                     | 5,09E+03                                      | 5,68,E+03                      | Sí                           | 1,1                    |
| 4           | 1     | 6,03E+02                                      | 1,32,E+02                      | No                           | NA                     | 4,29E+03                                      | 8,62,E+03                      | Sí                           | 2,0                    |
| 6           | 1     | 9,50E+02                                      | 1,12,E+02                      | No                           | NA                     | 6,40E+03                                      | 6,76,E+03                      | Sí                           | 1,1                    |
| 7           | 1     | 1,03E+03                                      | 1,12,E+02                      | No                           | NA                     | 6,95E+03                                      | 6,73,E+03                      | No                           | NA                     |
| 9           | 1     | 1,57E+03                                      | 9,92,E+01                      | No                           | NA                     | 1,04E+04                                      | 6,47,E+03                      | No                           | NA                     |
| 10          | 1     | 1,55E+03                                      | 1,15,E+02                      | No                           | NA                     | 1,03E+04                                      | 6,47,E+03                      | No                           | NA                     |
| 11          | 1     | 7,59E+03                                      | 8,03,E+03                      | Sí                           | 1,1                    | 1,58E+04                                      | 1,37,E+04                      | No                           | NA                     |
| 12          | 1     | 1,56E+03                                      | 1,05,E+02                      | No                           | NA                     | 1,03E+04                                      | 6,12,E+03                      | No                           | NA                     |
| 13          | 1     | 4,88E+03                                      | 5,10,E+03                      | Sí                           | 1,0                    | 1,56E+04                                      | 2,12,E+04                      | Sí                           | 1,4                    |
| 14          | 1     | 1,66E+03                                      | 3,31,E+03                      | Sí                           | 2,0                    | 4,97E+03                                      | 1,40,E+04                      | Sí                           | 2,8                    |
| 15          | 1     | 4,47E+02                                      | 9,43,E+01                      | No                           | NA                     | 3,04E+03                                      | 6,58,E+03                      | Sí                           | 2,2                    |
| 16          | 1     | 7,28E+02                                      | 1,01,E+02                      | No                           | NA                     | 5,18E+03                                      | 4,60,E+03                      | No                           | NA                     |
| 17          | 1     | 7,11E+02                                      | 1,00,E+02                      | No                           | NA                     | 5,05E+03                                      | 5,27,E+03                      | Sí                           | 1,0                    |
| 18          | 1     | 4,23E+02                                      | 7,66,E+01                      | No                           | NA                     | 2,09E+03                                      | 6,55,E+03                      | Sí                           | 3,1                    |
| 19          | 1     | 3,90E+02                                      | 9,70,E+01                      | No                           | NA                     | 2,64E+03                                      | 9,16,E+03                      | Sí                           | 3,5                    |
| 20          | 1     | 5,35E+02                                      | 5,40,E+01                      | No                           | NA                     | 3,59E+03                                      | 1,21,E+04                      | Sí                           | 3,4                    |
| 21          | 1     | 3,01E+02                                      | 4,44,E+01                      | No                           | NA                     | 1,92E+03                                      | 9,27,E+03                      | Sí                           | 4,8                    |
| 22          | 1     | 2,74E+03                                      | 9,96,E+01                      | No                           | NA                     | 4,91E+03                                      | 7,84,E+03                      | Sí                           | 1,6                    |
| 5           | 1     | 3,15E+04                                      | 3,00,E+04                      | No                           | NA                     | 8,06E+04                                      | 2,43,E+05                      | Sí                           | 3,0                    |
| 8           | 1     | 3,52E+04                                      | 3,19,E+04                      | No                           | NA                     | 9,03E+04                                      | 2,64,E+05                      | Sí                           | 2,9                    |

**Cuadro 9.** Revisión preliminar de la incursión en el rango inelástico de los muros del cuarto nivel.

| No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                                |                              |                        | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |
|-------------|-------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|
|             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda |
| 6           | 4     | 8,37E+02                                      | 9,20,E+01                      | No                           | NA                     | 5,35E+03                                      | 5,61,E+03                      | Sí                           | 1,1                    |
| 7           | 4     | 9,15E+02                                      | 9,22,E+01                      | No                           | NA                     | 5,69E+03                                      | 5,61,E+03                      | No                           | NA                     |
| 9           | 4     | 9,93E+02                                      | 1,88,E+02                      | No                           | NA                     | 6,66E+03                                      | 5,67,E+03                      | No                           | NA                     |
| 10          | 4     | 1,40E+03                                      | 1,85,E+02                      | No                           | NA                     | 8,97E+03                                      | 5,64,E+03                      | No                           | NA                     |
| 11          | 4     | 1,74E+03                                      | 3,42,E+03                      | Sí                           | 2,0                    | 3,32E+03                                      | 9,86,E+03                      | Sí                           | 3,0                    |
| 12          | 4     | 1,39E+03                                      | 1,15,E+02                      | No                           | NA                     | 8,92E+03                                      | 5,85,E+03                      | No                           | NA                     |
| 13          | 4     | 4,11E+03                                      | 4,37,E+03                      | Sí                           | 1,1                    | 1,29E+04                                      | 1,83,E+04                      | Sí                           | 1,4                    |
| 14          | 4     | 1,31E+03                                      | 1,51,E+03                      | Sí                           | 1,2                    | 3,84E+03                                      | 8,90,E+03                      | Sí                           | 2,3                    |
| 5           | 4     | 1,87E+04                                      | 2,21,E+04                      | Sí                           | 1,2                    | 4,66E+04                                      | 1,55,E+05                      | Sí                           | 3,3                    |
| 8           | 4     | 2,19E+04                                      | 2,25,E+04                      | Sí                           | 1,0                    | 5,56E+04                                      | 1,74,E+05                      | Sí                           | 3,1                    |

Como se puede observar de los cuadros anteriores, la mayoría de los muros entran en el rango inelástico producto de fuerzas sísmicas. Se tienen factores de sobredemanda (factor demanda/capacidad) de más de 4 veces la capacidad a flexión elástica. Este parámetro da una noción del grado de incursión en el rango inelástico de los muros.

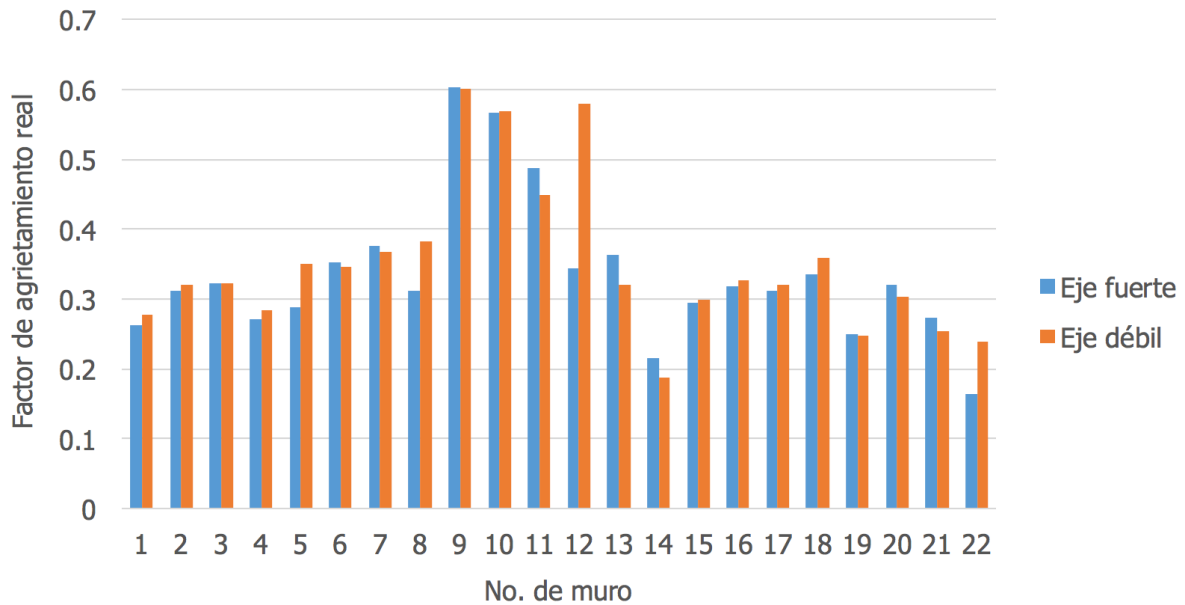
Los muros con factores de sobredemanda mayores son los muros entre los ejes F y G (ver planta de distribución de muros), donde ocurren grandes efectos de la torsión global del edificio, dado que es la zona más alejada y con menor rigidez en planta.

Por otro lado, la cantidad de muros que exceden su capacidad elástica a flexión en el eje débil es menor porque poseen una rigidez relativa menor. De esta forma, no se espera que contribuyan a la capacidad global de la estructura en ese sentido. Esto también se comprueba porque los ejes débiles de los muros tienen factores de sobredemanda menores que en el sentido fuerte, por lo que el grado de incursión en el rango inelástico es menor en el sentido débil de los mismos.

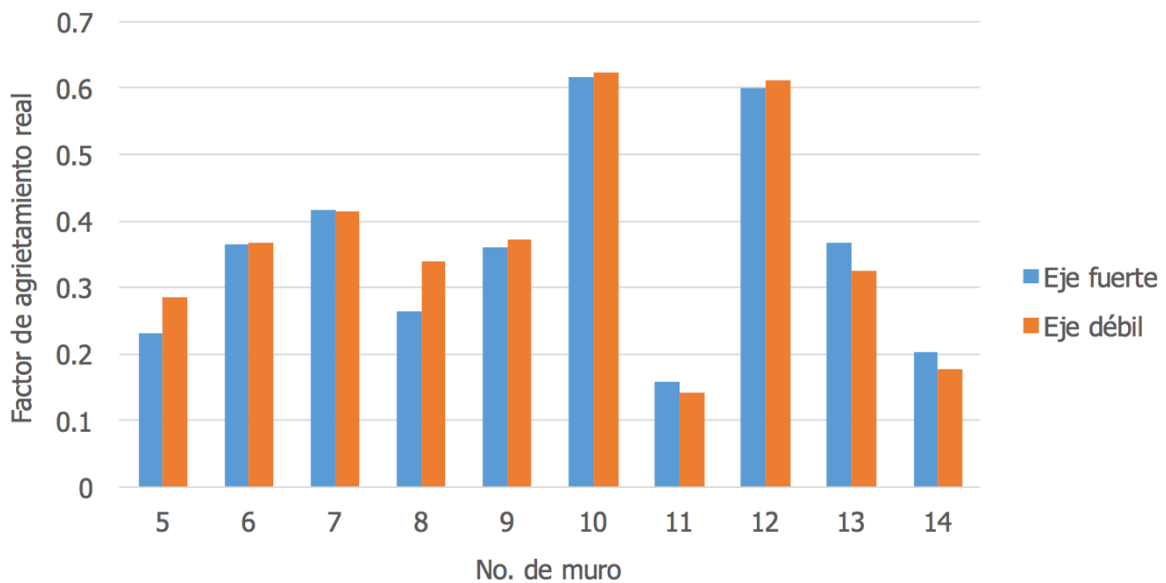
Además, con la información de los cuadros anteriores, se valida la hipótesis de que en el cuarto nivel pueden formarse rótulas plásticas al igual que en el primer nivel, ya que tienen factores de sobredemanda similares. En el cuarto nivel los muros también poseen una mayor sobredemanda producto de cargas en su eje débil (en una mayor proporción que en el primer nivel). La razón de lo anterior es que, en dicho nivel, el área en planta del edificio se reduce, así como la cantidad de muros, por lo que la rigidez relativa de los mismos aumenta y estos reciben una mayor demanda de carga sísmica.

Otro producto de los diagramas de momento-curvatura es la definición de los factores de agrietamiento reales de los muros, con el fin de hacer más real el modelo del edificio Sabana Real. Un factor menor a la unidad indica pérdida en la rigidez del sistema, por lo que el período de vibración de la estructura aumenta. Además, producto de la pérdida de rigidez, podría ocurrir una redistribución de cargas dentro del sistema estructural. Este factor de agrietamiento, como se dijo anteriormente, refleja de una mejor manera la condición agrietada de los muros y, por lo tanto, permitirá obtener resultados más precisos.

En los siguientes gráficos se muestran los factores de agrietamiento de cada muro en cada uno de los niveles estudiados. Las tablas detalladas del cálculo se muestran en el Apéndice A.3.



**Figura 40.** Factores de agrietamiento reales de los muros del primer nivel.



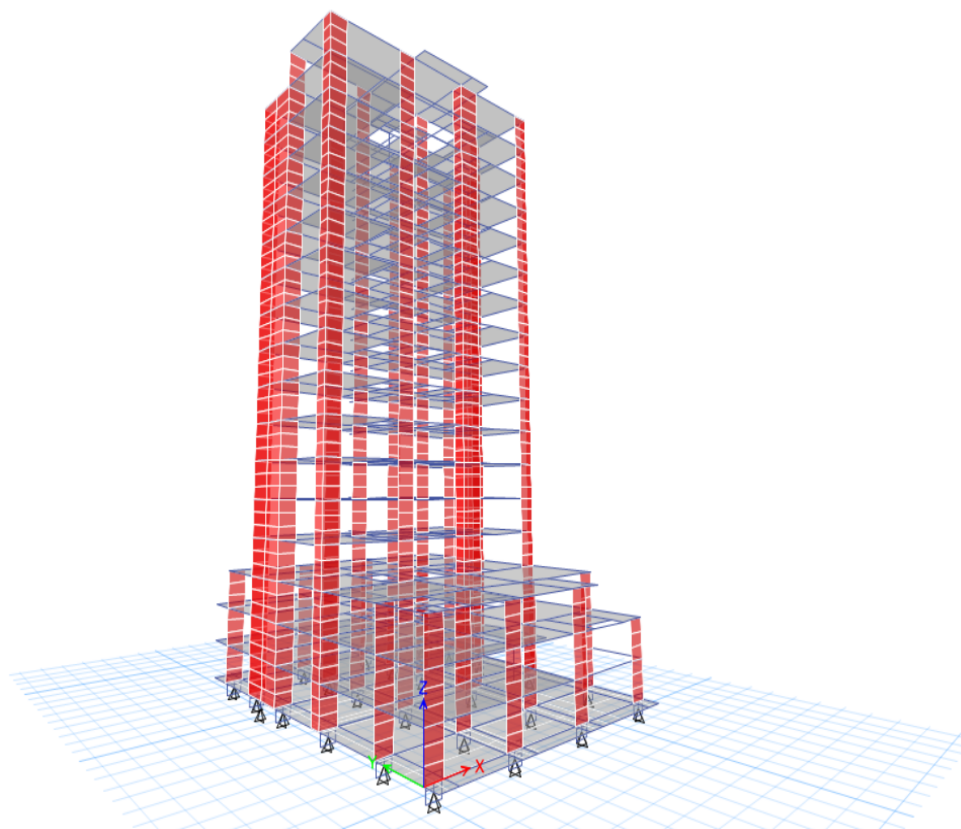
**Figura 41.** Factores de agrietamiento reales de los muros del cuarto nivel.

Como se puede observar de los gráficos anteriores, la mayoría de los muros tienen factores de agrietamiento similares en ambos sentidos de acción. Además, en promedio, se puede tomar que los muros tienen un factor de agrietamiento de 0,3 en

ambas direcciones resistentes a la flexión (eje fuerte y eje débil). Este valor es igual al recomendado por el ACI318-14 (ACI, 2014), por lo que valida la decisión de asignarle este factor de reducción de rigidez a la flexión a todos los muros del modelo, en ambas direcciones de resistencia a la flexión.

### 5.3 Modelo estructural con sistemas de protección sísmica

Para el caso del modelo estructural con aislamiento sísmico basal, se mantuvieron las modificaciones que se hicieron en el modelo de base convencional con la diferencia de que en este modelo se eliminó el nivel de sótano y se cambiaron las condiciones de apoyo para considerar los 26 LRB que se colocaron debajo de los muros de corte del primer nivel.

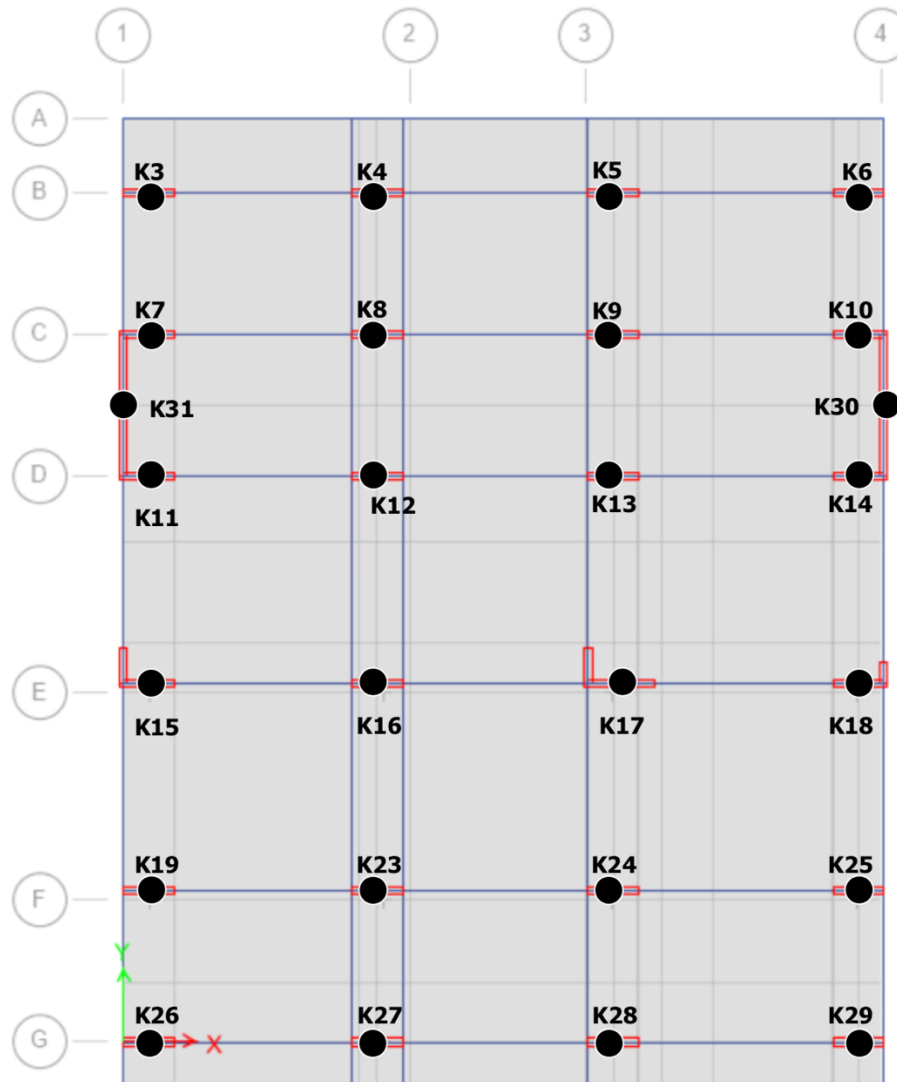


**Figura 42.** Vista en elevación del modelo con base aislada del edificio Sabana Real.

Además, al modelo se le agregaron vigas de amarre de 0,8x1,5 m entre los muros del primer nivel y una losa rígida de 1,0 m de espesor en ese mismo nivel, ambos elementos

con el fin de permitir un buen flujo de cargas entre la superestructura y los LRB. El diseño de las vigas de amarre y la losa rígida quedan fuera del alcance de esta investigación.

La ubicación de los 26 LRB colocados en el primer nivel se muestra a continuación:



**Figura 43.** Ubicación de los LRB en el primer nivel del modelo aislado del edificio Sabana Real.



Los muros que se mostraron en la planta de LRB, mostrada en la figura anterior, son aquellos que están por encima de los LRB del primer nivel. Esto para mostrar la distribución de muros que van encima de los dispositivos de protección sísmica.

Los LRB se colocaron en el centroide de los muros de corte del primer nivel, con excepción de los muros 5 y 8, donde las alas y las almas se vieron como muros independientes y se colocó un LRB en el centroide de cada uno de estos elementos. Los LRB se colocaron en el centroide de los muros ya que por este punto geométrico es posible que ocurra la bajada de cargas (la losa rígida puede alterar esto).

#### **5.4 Diseño de los LRB**

Por cuestiones de la estabilidad global de la estructura, cada uno de los 26 LRB colocados en el primer nivel del edificio debe de tener una rigidez efectiva<sup>4</sup> de 5 KN/mm. Por lo tanto, con base en el Anexo A, se escogió un tipo de LRB que tuviera una capacidad axial de acuerdo con los resultados del análisis estructural preliminar y que, a su vez, proporcionen la rigidez efectiva necesaria para aumentar el período de la estructura. El LRB utilizado en el modelaje (ver Apéndice B) tiene las siguientes propiedades mecánicas:

- $K_{ef}$  (rigidez efectiva): 5,00 KN/mm
- $K_2$  (rigidez post-fluencia): 3,96 KN/mm
- $K_1$  (rigidez elástica): 39,65 KN/mm
- $Q_D$  (fuerza de fluencia del plomo): 890,00 KN
- $P_{max}$  (compresión máxima): 27 600,00 KN
- $T_{max}$  (tensión máxima): 0,00 KN
- $\Delta_{max}$  (desplazamiento máximo): 860,00 mm
- $K_v^5$  (rigidez vertical): 30 000,00 KN/mm

---

<sup>4</sup> Ver Apéndice B.

<sup>5</sup> Valor necesario para no permitir asentamientos en los LRB de más de 1,0 mm.

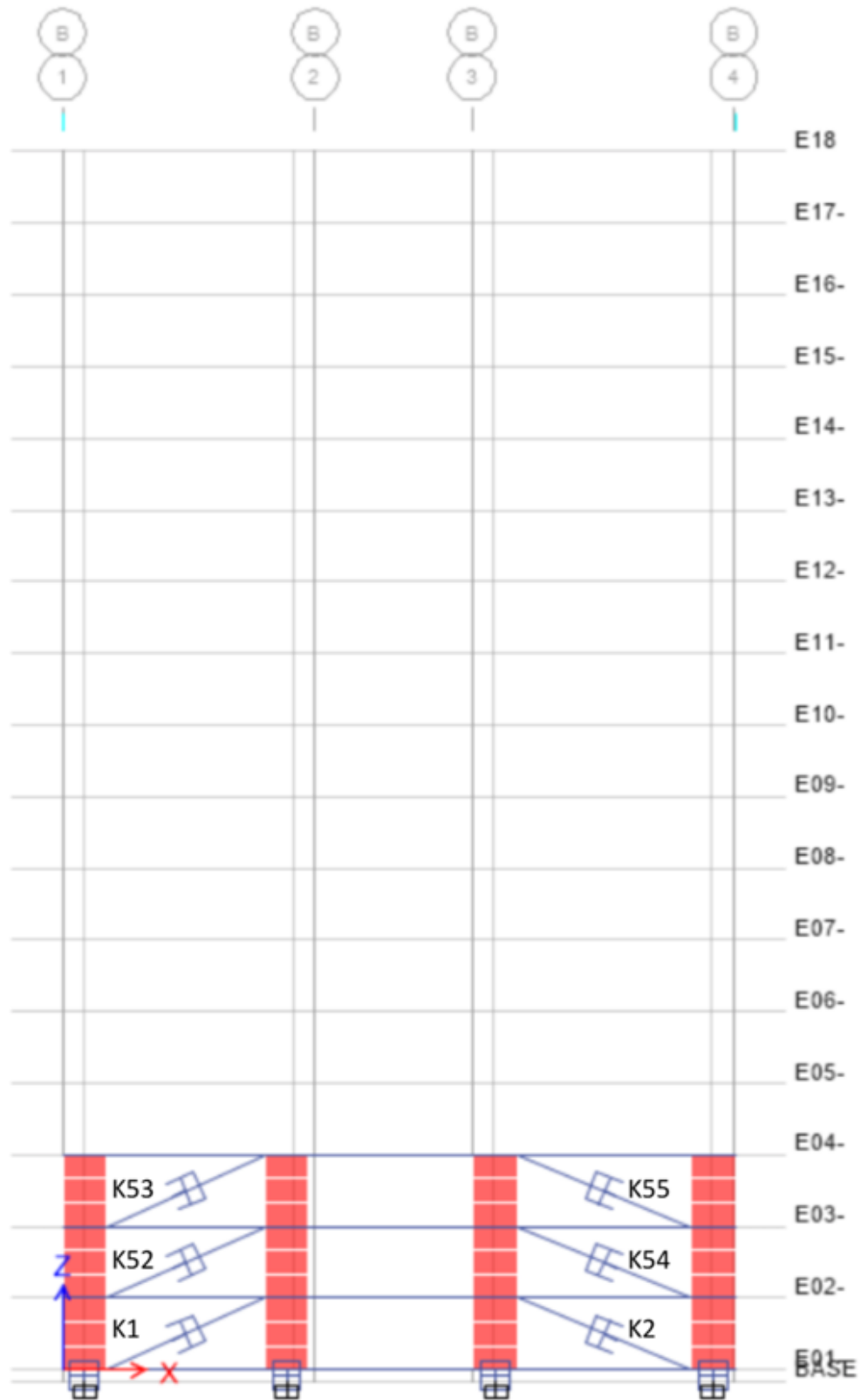
Como resultado de este arreglo de LRB, el sistema de aislamiento sísmico proporciona un 13% de amortiguamiento, según un análisis geométrico de la curva histerética de los LRB, adicional al considerado para el modelo estructural convencional. Este amortiguamiento no se considera suficiente para mostrar los beneficios del aislamiento sísmico, por lo que se decide agregar amortiguadores viscosos.

Los amortiguadores viscosos no modifican el período de vibración de la estructura significativamente, pues su función principal es aumentar el nivel de amortiguamiento en la estructura.

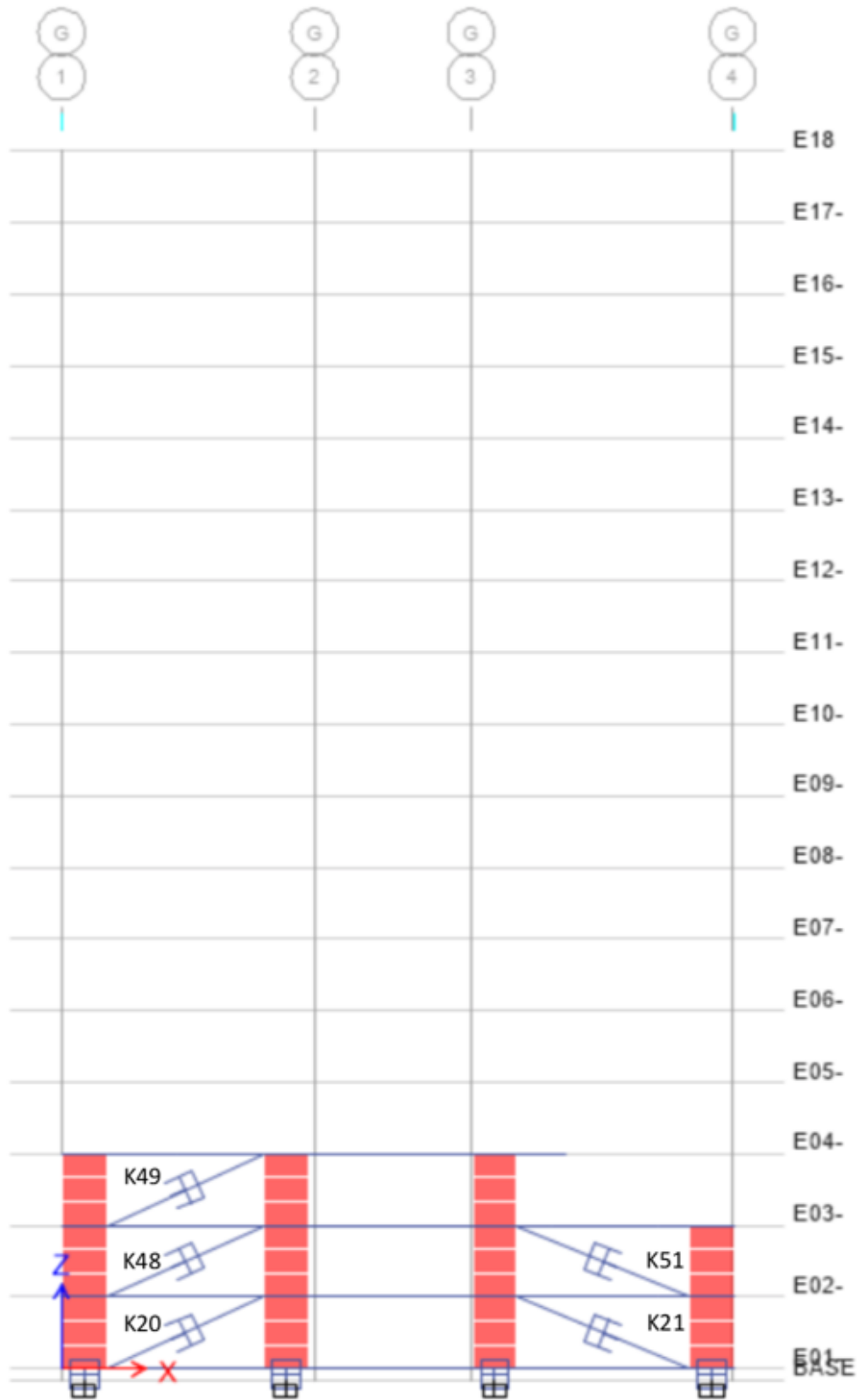
En total, se decidió colocar 28 amortiguadores viscosos con un coeficiente de amortiguamiento de 8 000 KNs/m, una capacidad axial máxima de 200 KN y un desplazamiento axial máximo de 75 mm. El valor del coeficiente de amortiguamiento es el máximo ofrecido en el catálogo de la empresa ITT Infrastructure (mostrado en el Anexo B), ya que se desea amortiguar la mayor cantidad de energía posible y el resto de parámetros de diseño están asociados con el tipo de amortiguador capaz de proporcionar ese amortiguamiento.

Los 28 amortiguadores viscosos se distribuyeron entre las cuatro fachadas del edificio y en los primeros tres niveles del mismo, ya que después de ese nivel ocurre el cambio de área en planta del edificio por lo que se decidió reforzar los niveles inferiores. Además, colocándolos de manera simétrica, estos mejoran el comportamiento estructural del edificio ante los efectos de la torsión global en planta.

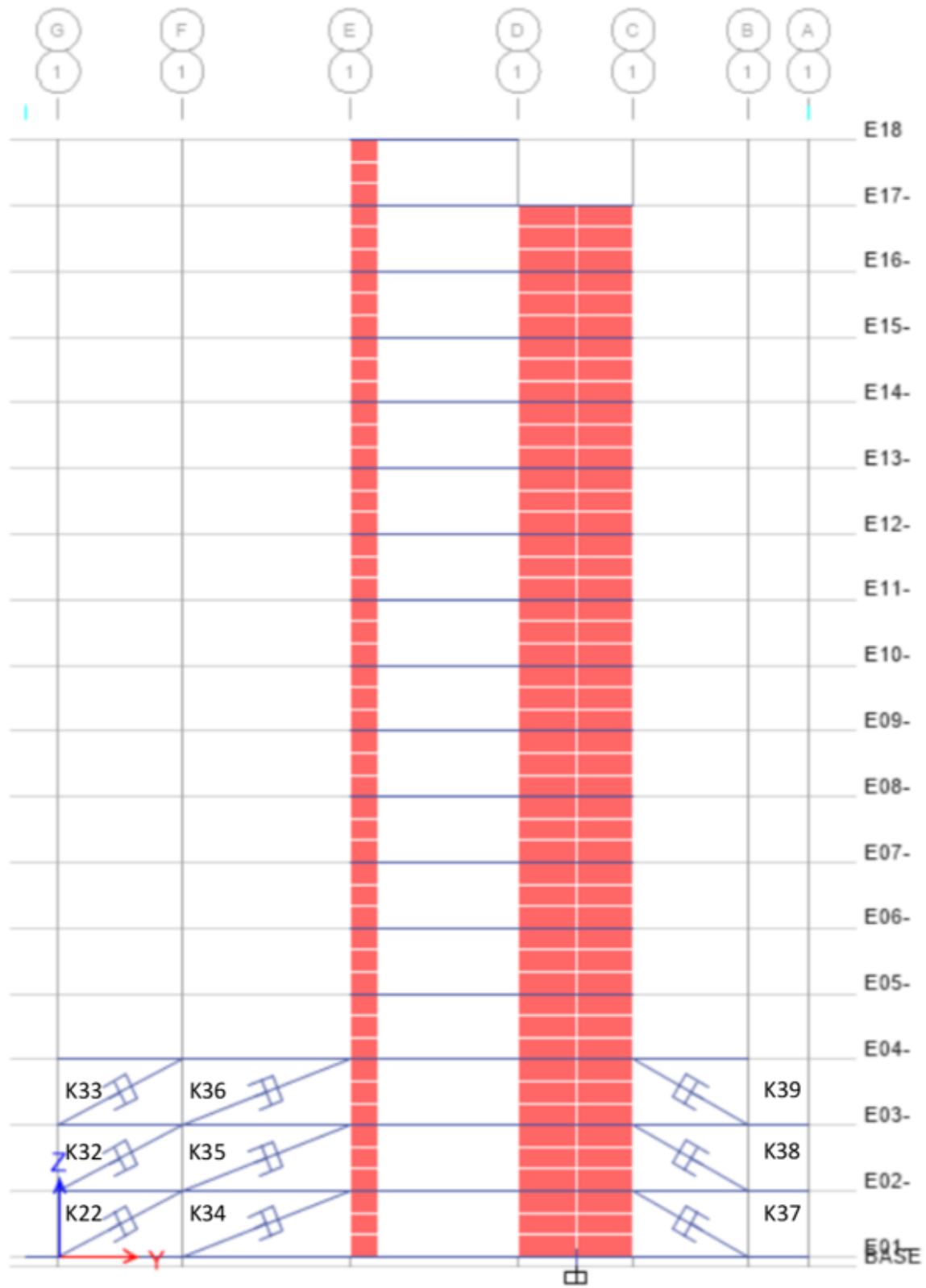
A continuación se muestra la ubicación de los 28 amortiguadores agregados al modelo estructural del edificio con protección sísmica:



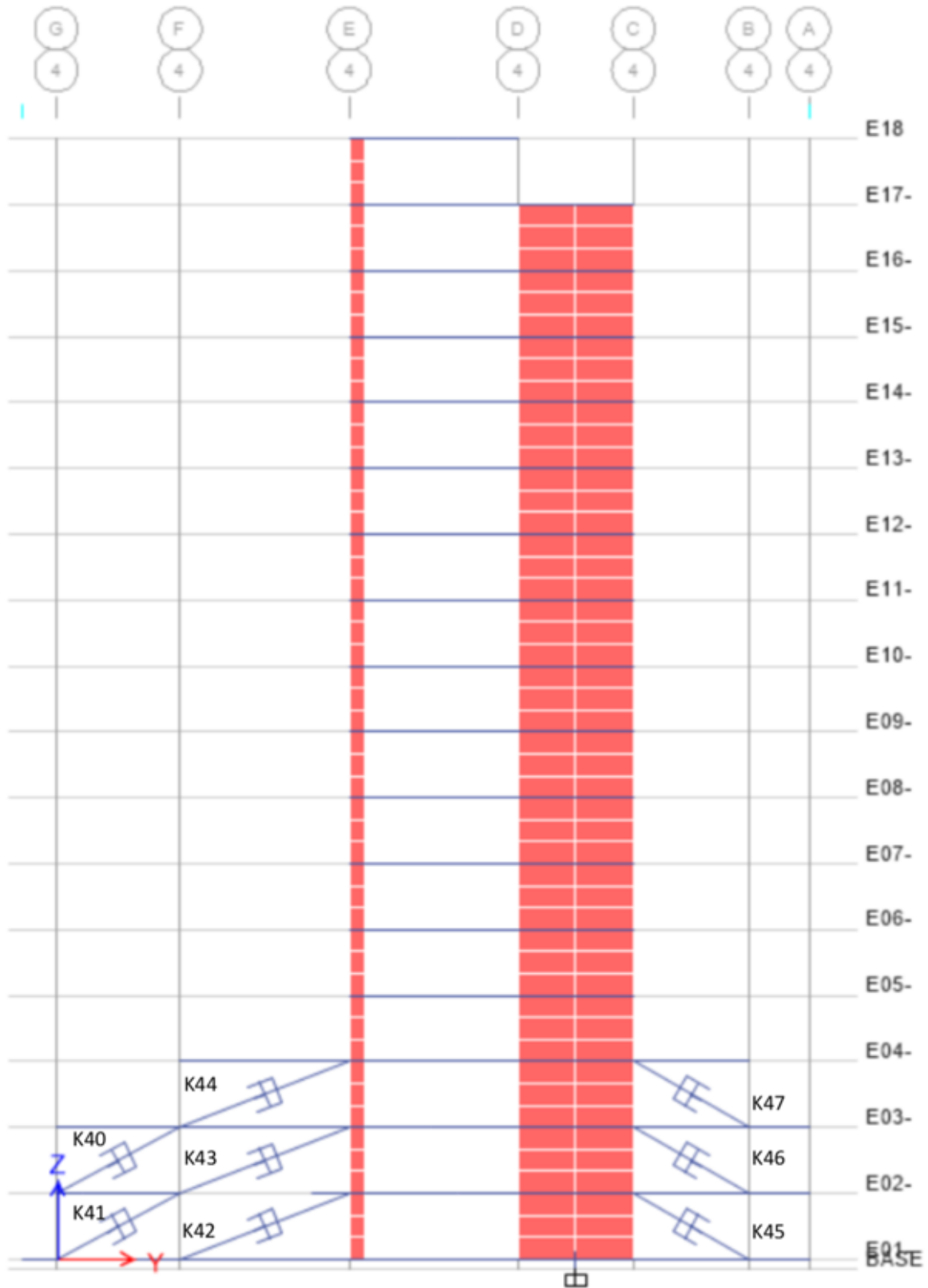
**Figura 44.** Ubicación de los amortiguadores viscosos en el eje B.



**Figura 45.** Ubicación de los amortiguadores viscosos en el eje G.



**Figura 46.** Ubicación de los amortiguadores viscosos en el eje 1.



**Figura 47.** Ubicación de los amortiguadores viscosos en el eje 4.

De esta forma, el modelo de Sabana Real que incorpora la tecnología de protección sísmica contiene 26 LRB en la base del edificio (a nivel de terreno) y 28 amortiguadores viscosos en los primeros tres niveles, zona de los locales comerciales y, por lo tanto, con la mayor área en planta.

## 5.5 Análisis modal

A continuación se presenta un resumen de los modos de vibración más importantes (con un porcentaje de masa participativa mayor al 5% en alguna dirección principal) del edificio Sabana Real con sistemas de protección sísmica (LRB y amortiguadores viscosos), incluyendo los primeros dos modos de torsión dada la irregularidad del edificio.

**Cuadro 10.** Modos de vibración importantes en el edificio con sistemas de protección sísmica.

| Modo  | No. de modo | Período (s) | Traslacional                 |                              |                              | Rotacional                   |
|---|-------------|-------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|   |             |             | % de masa participativa en X | % de masa participativa en Y | % de masa participativa en Z | % de masa participativa en Z |
| Modo de torsión fundamental en planta           | 1           | 6,52        | 0,82                         | 0,19                         | 0,00                         | 98,94                        |
| Primer modo traslacional fundamental en planta  | 2           | 4,04        | 71,75                        | 25,88                        | 0,00                         | 0,31                         |
| Segundo modo traslacional fundamental en planta | 3           | 4,02        | 25,43                        | 71,84                        | 0,00                         | 0,72                         |
| Segundo modo de torsión en planta               | 6           | 1,04        | 0,01                         | 0,00                         | 0,00                         | 0,04                         |
| Modo vertical fundamental                       | 12          | 0,32        | 0,00                         | 0,00                         | 13,45                        | 0,00                         |

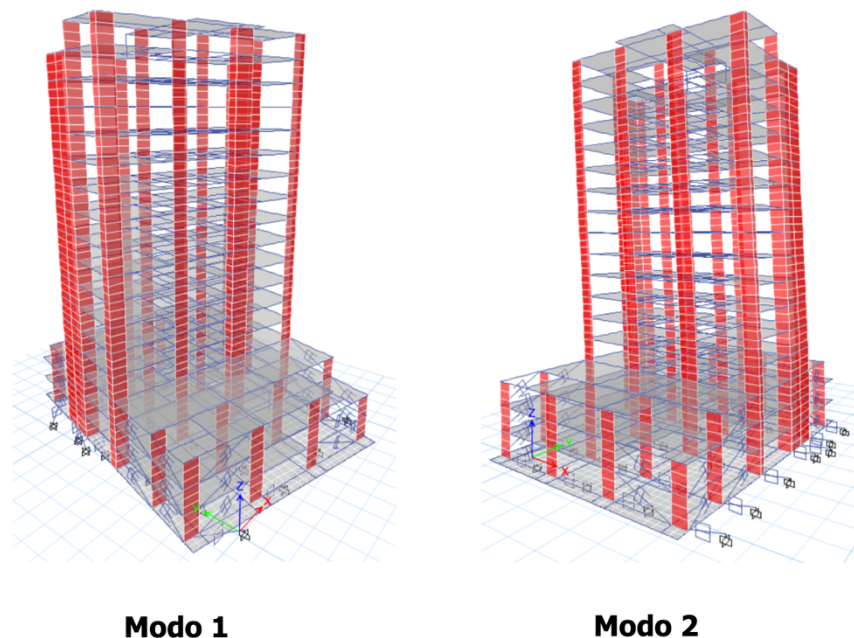
Como se puede observar del cuadro anterior, los mayores modos tienen menos predominancia que en el edificio sin los sistemas de protección sísmica. Esto indica que los altos modos de vibración, que conllevan altos niveles de aceleración, no están presentes en el edificio con protección sísmica, como lo están en el edificio sin ella. A pesar de que el modo fundamental de la estructura es el torsional, pues es el que tiene el mayor período de vibración, los modos traslacionales son los que tienen mayor porcentaje de masa participando, por lo que el período fundamental de la estructura aislada, para cuestiones de este análisis, es de 4,04 s. Los modos traslacionales predominan en esta estructura puesto que las estructuras aisladas tratan de

comportarse como un cuerpo rígido aunque, como se mostrará más adelante, en esta investigación no se logró eso en su totalidad. Además, dadas las propiedades de los LRB, estos modos acoplan los desplazamientos en ambos sentidos del edificio; por eso se tiene masa participando en ambos sentidos ortogonales en cada modo traslacional.

El modo de torsión fundamental en planta del edificio con protección sísmica tiene mayor masa participando en rotación que en el caso sin protección sísmica, por lo que los LRB aumentaron los efectos de la torsión en el edificio. Esto, como se observará, aumenta la demanda de carga en los elementos estructurales. Por lo tanto, el arreglo de LRB perjudicó los efectos de torsión sobre los muros estudiados, a pesar de lograr reducir la demanda de flexión sobre estos.

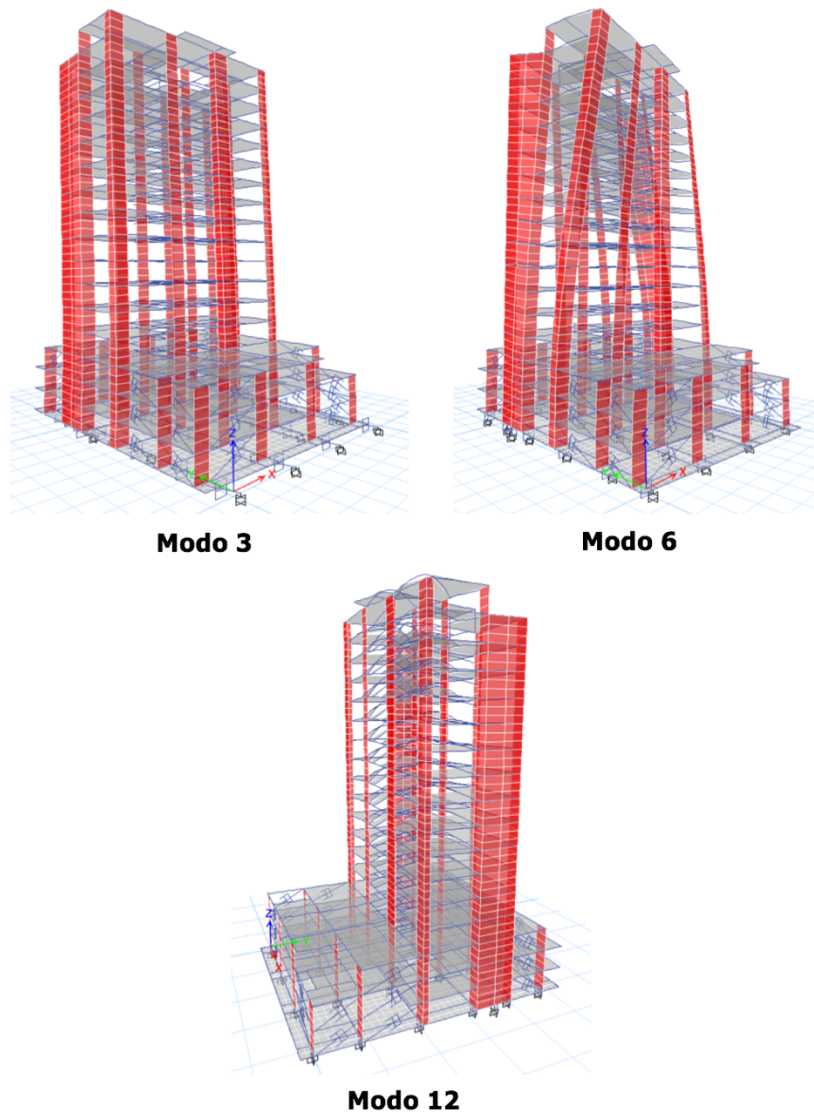
Finalmente, el modo fundamental vertical de la estructura con aislamiento sísmico tiene un período de 0,32 s. A pesar del aislamiento sísmico, menos masa participa en el modo vertical en este último caso, posiblemente por la rigidez axial que proporcionan los LRB.

Estos modos de vibración se muestran en las siguientes figuras:



**Figura 48.** Modos de vibración del edificio con protección sísmica (1-2).





**Figura 49.** Modos de vibración del edificio con protección sísmica (3,6,12).

## 6 Resultados de los análisis de respuesta en el tiempo

### 6.1 Demanda sísmica

#### 6.1.1 Selección

De acuerdo con la normativa ASCE 7-10 y la NCh2745-13, se seleccionaron los registros sísmicos de tres terremotos nacionales, cada uno compuesto por acelerogramas en las dos direcciones horizontales y en la dirección vertical. Los registros fueron seleccionados con las siguientes consideraciones:

1. Medidos por estaciones acelerográficas situadas en el mismo tipo de suelo que el edificio Sabana Real (S3), de manera que contemplen el efecto de la amplificación de las ondas sísmicas, así como la modificación en sus frecuencias al atravesar ese tipo de suelo.
2. Estaciones acelerográficas cercanas al edificio para considerar el efecto que tienen los terremotos seleccionados sobre la zona de análisis donde se encuentra el edificio. Algunas estaciones cercanas al edificio Sabana Real tuvieron que ser descartadas porque tenían una filtración de frecuencias que excluía la frecuencia natural del edificio, por lo que no activarían su vibración.

Para el análisis de respuesta en el tiempo que se llevó a cabo para el edificio Sabana Real, se seleccionaron los terremotos de Damas del 2004 (LIS, 2004), Cinchona del 2009 (LIS, 2009a) y Sámara del 2012 (LIS, 2012a). Estos, como se mencionó en secciones anteriores, han causado efectos devastadores dentro de su área epicentral. Por lo tanto, resulta relevante utilizarlos en este análisis. Para cumplir con las consideraciones anteriores, se seleccionaron las siguientes estaciones acelerográficas del Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS):

- **Terremoto de Damas (2004):** estación SECA, ubicada en el actual colegio St. Jude en Lindora, Santa Ana. Su distancia al epicentro del Terremoto de Damas del 2004 fue de 48,0 km (LIS, 2004) y está ubicada a 10,5 km en línea recta del edificio Sabana Real (distancia obtenida de Google Maps).

- **Terremoto de Cinchona (2009):** estación AALX, ubicada en el centro de la provincia de Alajuela. Su distancia al epicentro del Terremoto de Cinchona del 2009 fue de 22,8 km (LIS, 2009a) y está ubicada a 15,0 km en línea recta del edificio Sabana Real (distancia obtenida de Google Maps).
- **Terremoto de Sámara (2012):** estación SSBN, ubicada en el Instituto Costarricense del Deporte y la Recreación (ICODER) en La Sabana, San José. Su distancia al epicentro del Terremoto de Sámara fue de 160,8 km (LIS, 2012a) y está ubicada a 1,2 km en línea recta del edificio Sabana Real (distancia obtenida de Google Maps).

Los registros sísmicos del LIS son medidos en tres direcciones: Norte-Sur (N00E), Este-Oeste (N90E) y en la dirección vertical (UPDO).

### 6.1.2 Acelerogramas escalados

El escalamiento se hizo mediante el programa SeismoMatch, que incorpora el método de coincidencia espectral, comentado en el marco teórico. A pesar de que la ASCE 7-10 solicita que se utilice otro método, en las secciones anteriores de esta investigación se justificó que el método de coincidencia espectral es el más aceptado por profesionales alrededor del mundo dado que es el método de escalamiento que más logra preservar la esencia del evento sísmico en el acelerograma escalado. Además, se aceptó una tolerancia del 5% para reducir el número de iteraciones necesarias por el programa.

De acuerdo con las disposiciones de la ASCE-10, los acelerogramas horizontales deberían de escalarse dentro de los siguientes rangos:

- **Edificio convencional:**  $0,2T - 1,5T = 0,2(2,37) - 1,5(2,37) = 0,48s - 3,56s$

- **Edificio aislado sísmicamente:**  $0,5T_D^6 - 1,25T_M = 0,5(2,37) - 1,25(4,04) = 0,19s - 5,05s$

Para el caso de esta investigación, se utilizó un rango para escalar los acelerogramas para ambas condiciones de base. Conservadoramente, se toma el límite inferior del edificio convencional y el límite superior del edificio aislado, donde el rango de períodos en los que se debe realizar el escalamiento debería de ser entre 0,48 s y 4,04 s. Sin embargo, se decidió que el límite fuera superior fuera de 7,00 s, que es superior al período de vibración de torsión del edificio con sistemas de protección sísmica.

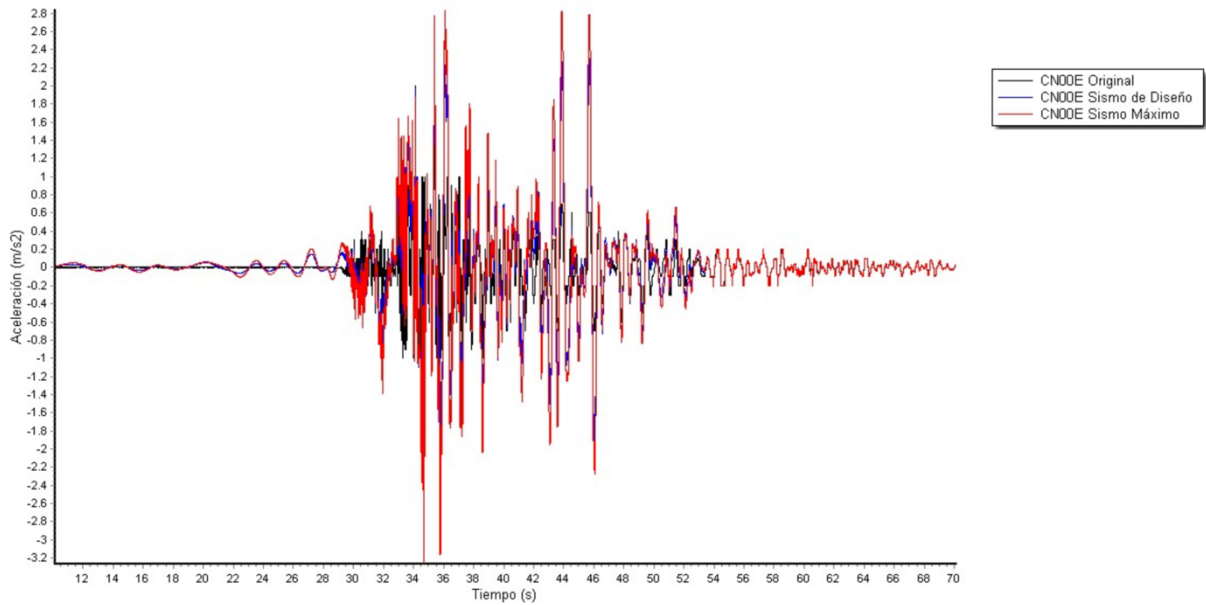
Para el caso de los acelerogramas verticales, como se comentó en secciones anteriores, las normativas utilizadas en esta investigación no indican cómo se deben escalar ni dentro de cuál rango de períodos. Por lo tanto, se escalaron los registros verticales entre 0,02 s (mínimo permitido por el programa) y 3,00 s, sabiendo que los períodos de vibración verticales son menores a los horizontales. Además, de acuerdo con los análisis modales anteriores, para ambas condiciones de base, ningún período de vibración vertical superó los 3,00 s.

A continuación se presentan los resultados del proceso de escalamiento de los acelerogramas utilizados para el análisis de respuesta en el tiempo de esta investigación, así como sus respectivos espectros de respuesta. Cabe resaltar que, por efectos visuales, se reportan las aceleraciones sísmicas dentro de la ventana de tiempo donde estas son apreciables.

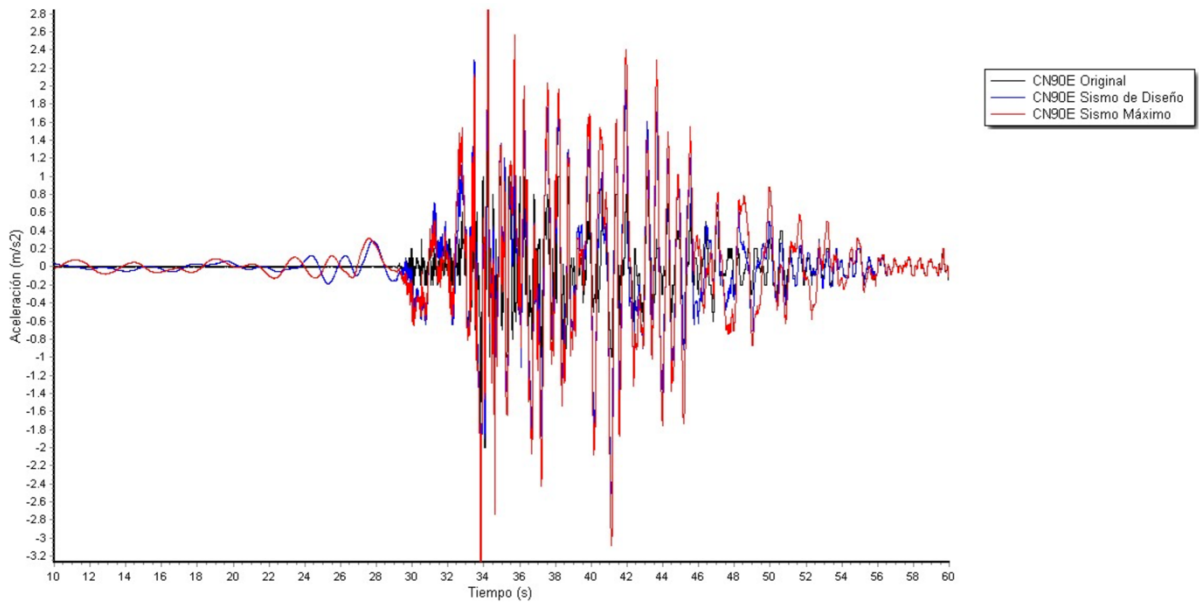
Primero se presentarán los del Terremoto de Cinchona, que será el terremoto de referencia de esta investigación, y luego los del Terremoto de Damas y los del Terremoto de Sámara.

---

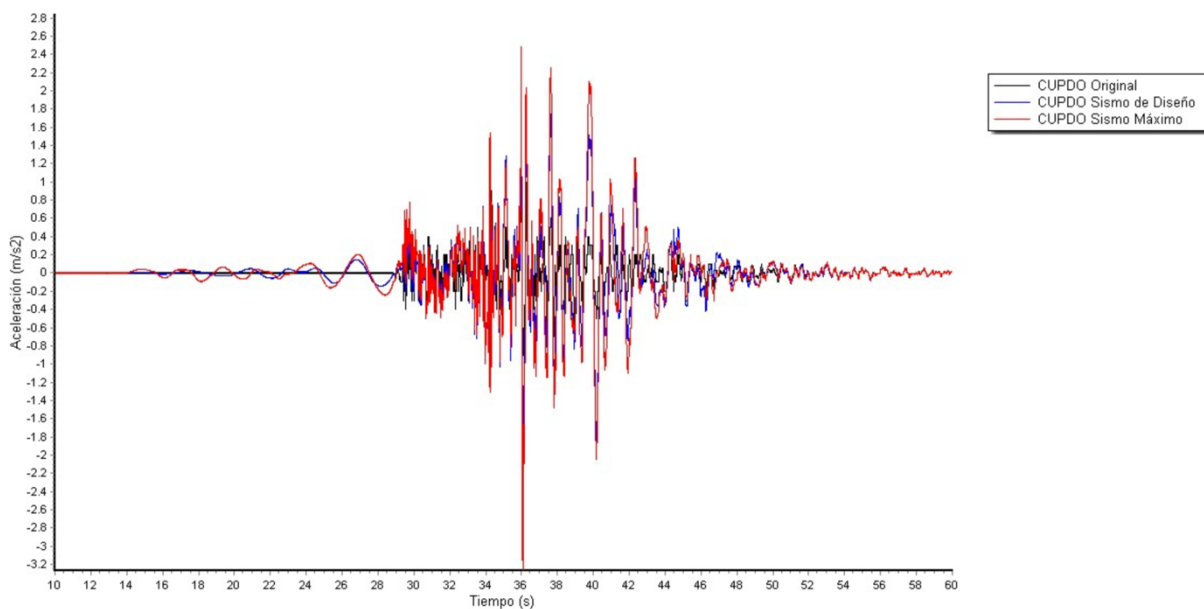
<sup>6</sup> Como no se pudo calcular  $T_d$  por las razones dadas en el capítulo 3, se utilizó  $T$  ya que es conservador.



**Figura 50.** Acelerogramas escalados del Terremoto de Cinchona en la dirección N00E.



**Figura 51.** Acelerogramas escalados del Terremoto de Cinchona en la dirección N90E.

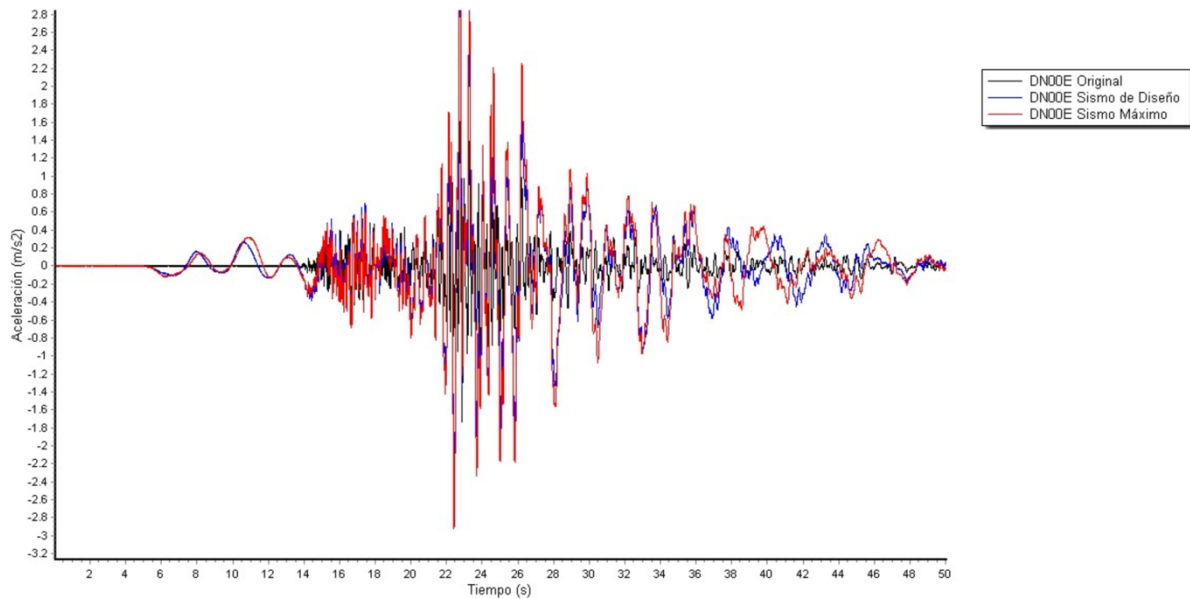


**Figura 52.** Acelerogramas escalados del Terremoto de Cinchona en la dirección UPDO.

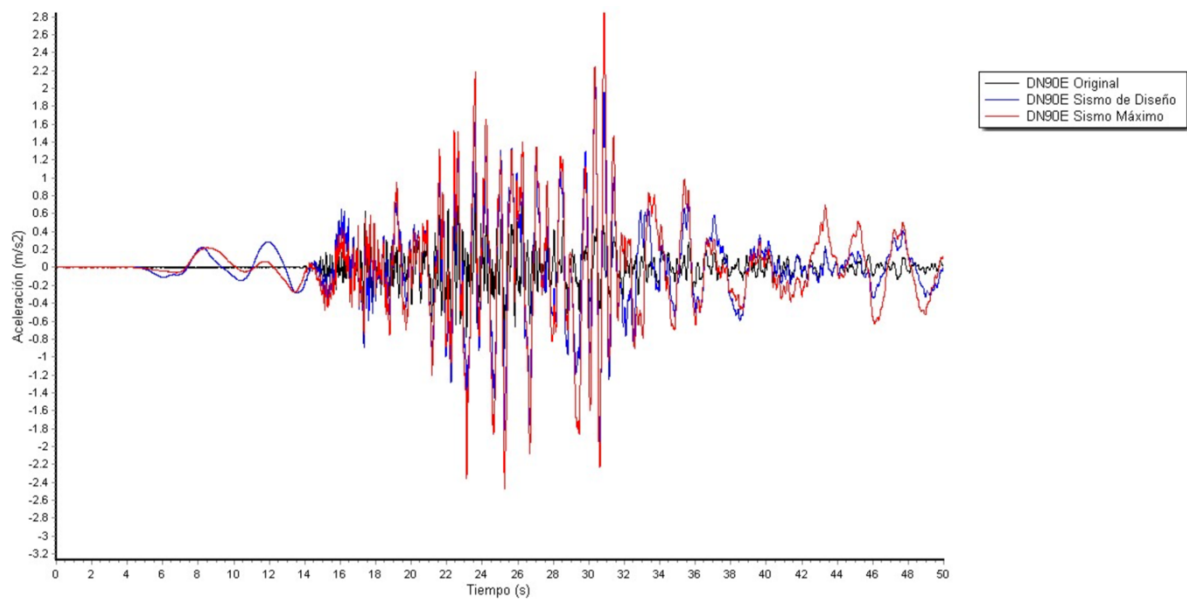
De las figuras anteriores se observa que las aceleraciones horizontales en el terreno, producto del Terremoto de Cinchona, son mayores que las verticales (aceleración pico vertical de  $0,97 \text{ m/s}^2$ ) y esto se puede deber a que no es un sismo registrado por una estación cercana a la falla, donde tienden a presentarse las mayores aceleraciones verticales. Además, se observa que la aceleración pico en el sentido N90E ( $1,99 \text{ m/s}^2$ ) es mayor que en el sentido N00E ( $1,69 \text{ m/s}^2$ ).

En cuanto al escalamiento, se puede observar que los acelerogramas escalados mantienen la esencia del acelerograma original. Sin embargo, en ciertos puntos, especialmente al inicio de las señales, se observan las onduletas que son parte del proceso de escalamiento de SeismoMatch. Estas ondas tienen un período alto y esto no es algo característico de los sismos costarricenses. Por lo tanto, a pesar de que los acelerogramas escalados se aproximen al espectro de demanda sísmica que plantea el CSCR-10/14 (como se verá más adelante), llevan consigo una serie de ondas amplificadas y artificiales que excitarán a las estructuras con períodos altos, provocando que los resultados obtenidos en el análisis sean conservadores.

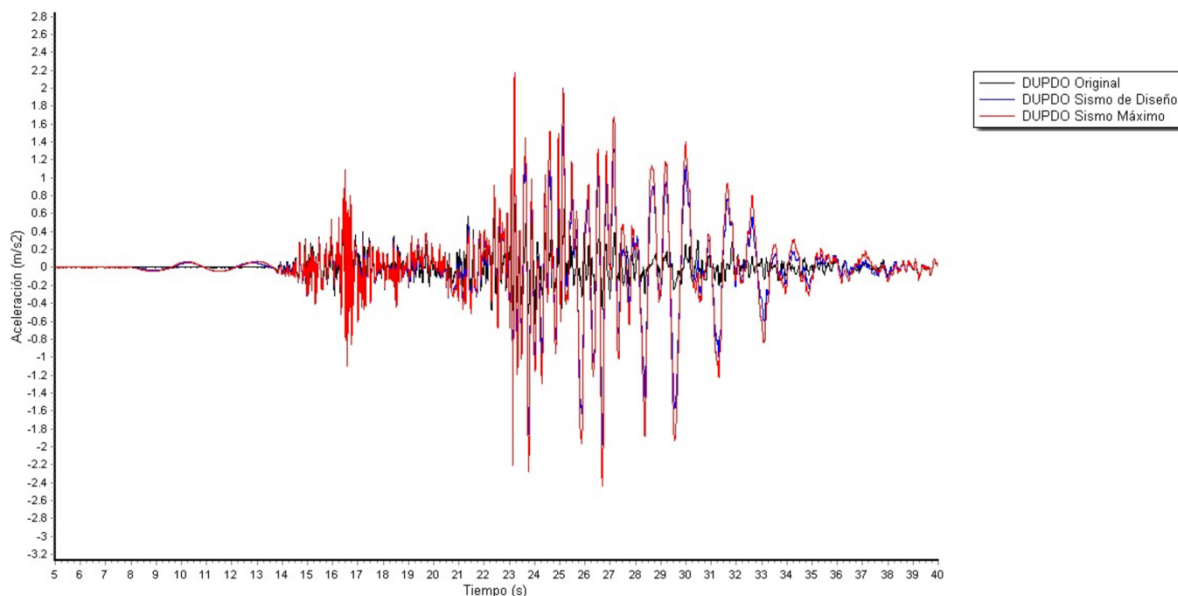
Para el caso del Terremoto de Damas, se cuenta con los siguientes acelerogramas escalados:



**Figura 53.** Acelerogramas escalados del Terremoto de Damas en la dirección N00E.



**Figura 54.** Acelerogramas escalados del Terremoto de Damas en la dirección N90E.



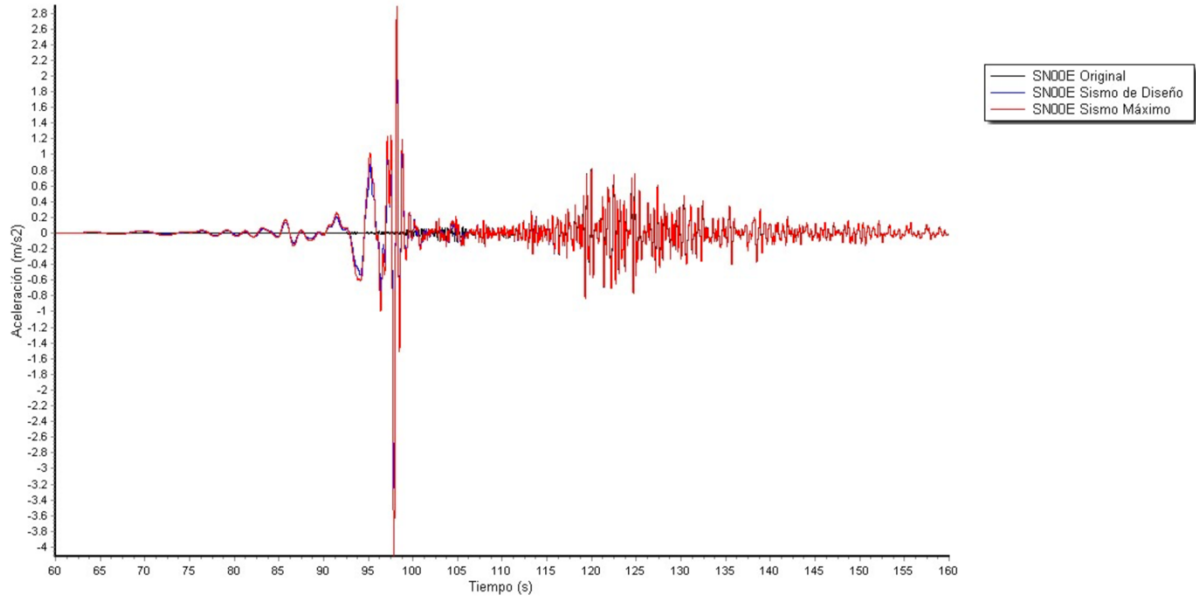
**Figura 55.** Acelerogramas escalados del Terremoto de Damas en la dirección UPDO.

De la figura anterior se observa que las aceleraciones horizontales en el terreno producto del Terremoto de Damas también son mayores que las verticales (aceleración pico vertical de  $0,71 \text{ m/s}^2$ ) y esto se puede deber a la misma razón que se dio al comentar los acelerogramas del Terremoto de Cinchona. Sin embargo, la aceleración pico en la dirección N00E ( $1,73 \text{ m/s}^2$ ) es mayor que en la dirección ortogonal ( $1,01 \text{ m/s}^2$ ).

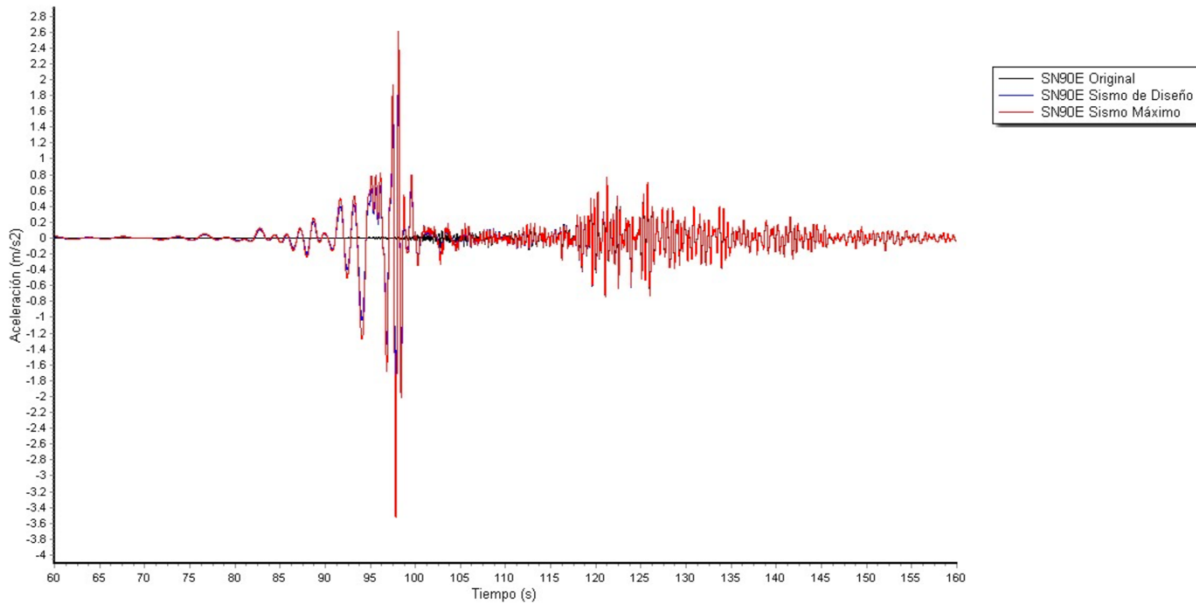
El proceso de escalamiento de los acelerogramas del Terremoto de Damas tienen el mismo efecto sobre los acelerogramas originales que en el caso del Terremoto de Cinchona. Las onduletas son agregadas al inicio del registro pero, aparte de esto, los acelerogramas escalados parecen preservar el comportamiento del terremoto.

Finalmente, en las siguientes figuras se muestran los acelerogramas escalados del Terremoto de Sámara:

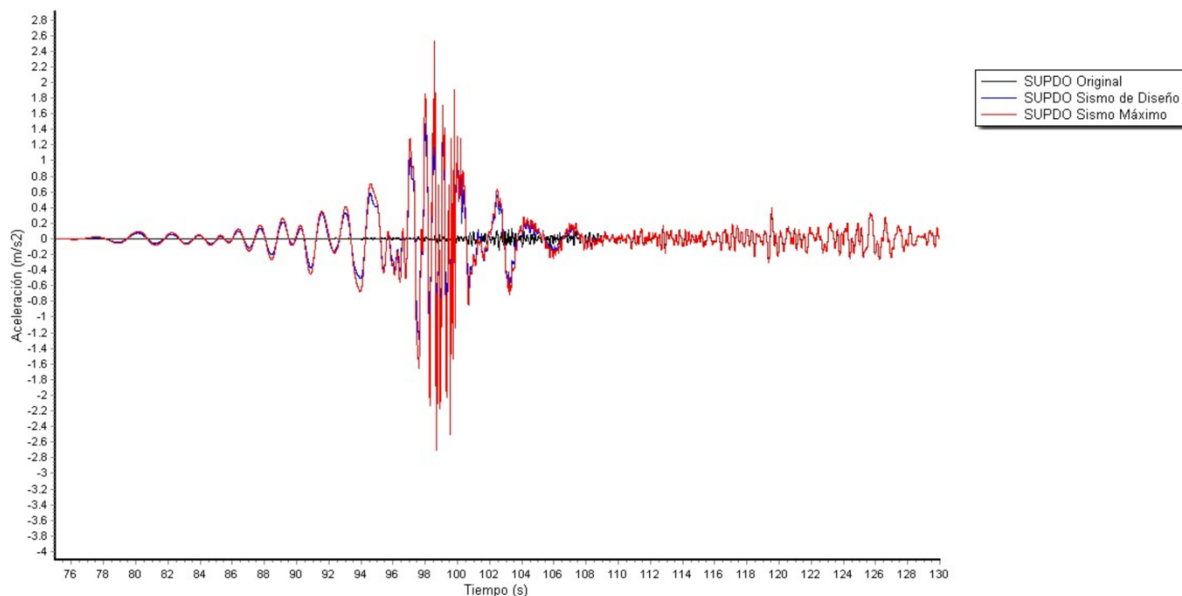




**Figura 56.** Acelerogramas escalados del Terremoto de Sámara en la dirección N00E.



**Figura 57.** Acelerogramas escalados del Terremoto de Sámara en la dirección N90E.



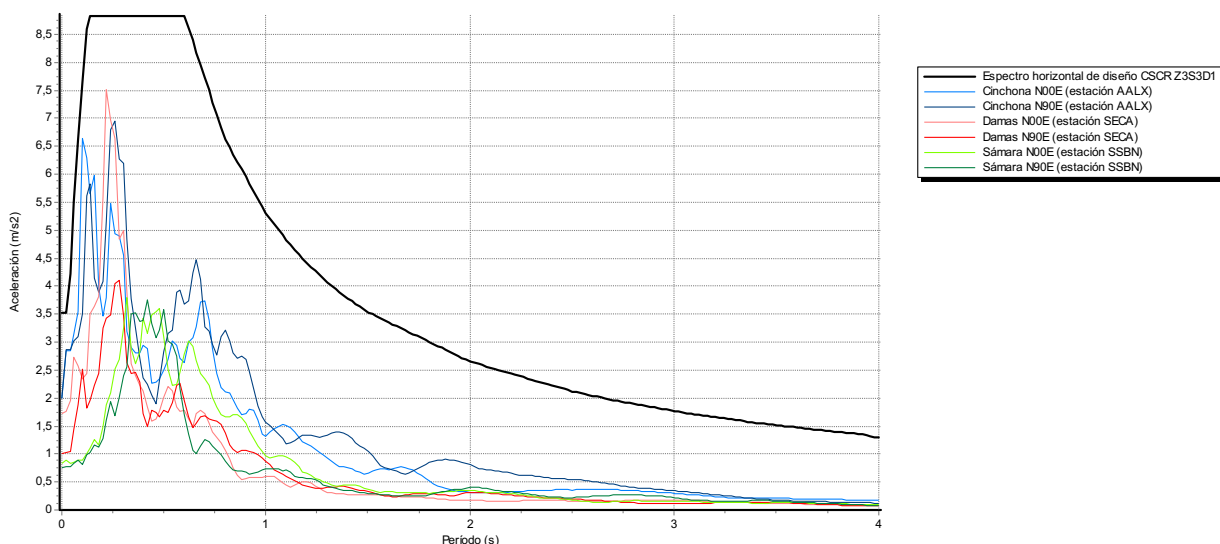
**Figura 58.** Acelerogramas escalados del Terremoto de Sámara en la dirección UPDO.

En cuanto a los acelerogramas del Terremoto de Sámara, se observa una variación mayor en el contenido de frecuencias comparado con los dos terremotos anteriores. Esto se debe a que el Terremoto de Sámara liberó la mayor cantidad de energía (una magnitud de momento mayor). Además, la aceleración pico vertical de  $0,40 \text{ m/s}^2$  tampoco excede las horizontales de  $0,83 \text{ m/s}^2$  en la dirección N00E y  $0,76 \text{ m/s}^2$  en la dirección N90E. La razón de esto es posiblemente la misma que se dio para los terremotos anteriores.

Por último, el proceso de escalamiento también es evidente en los acelerogramas del Terremoto de Sámara. La adición de onduletas de largo período al inicio del registro sísmico muestra la manera en que funciona el método de escalamiento implementado. Por lo tanto, se espera también que los resultados del análisis de respuesta en el tiempo, producto de la sacudida sísmica del Terremoto de Sámara, sean conservadores, por las razones dadas al analizar el escalamiento de los registros sísmicos de los terremotos anteriores.

### 6.1.3 Espectros de respuesta de aceleración originales

La siguiente figura muestra los espectros de respuesta de aceleración de ambas componentes horizontales de los tres sismos estudiados, generados mediante el programa SeismoMatch. El espectro de respuesta del CSCR-10/14 para la Zona III, suelo S3 y ductilidad unitaria, multiplicado por una aceleración base de 0,36g es definido como espectro de referencia; así, las ordenadas pasan a estar en  $m/s^2$  en vez de factores FED.

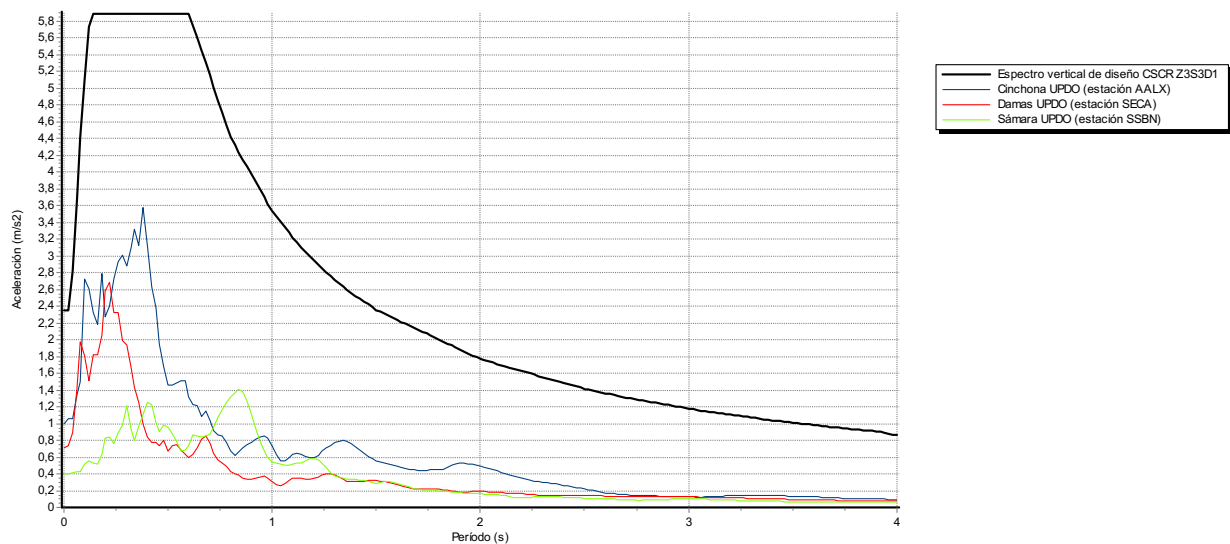


**Figura 59.** Espectros de aceleración horizontal de los terremotos en estudio.

De la figura anterior se puede apreciar que ningún espectro de respuesta excede el espectro de respuesta de diseño; sin embargo, a pesar de que el Terremoto de Cinchona y el de Damas tuvieron una magnitud similar, es notable que el efecto del Terremoto de Cinchona sobre la zona de reporte fue mayor debido a que la estación que registró su sacudida sísmica se encontraba más cerca del epicentro. De esta forma, el nivel de energía reportado fue mayor. El Terremoto de Sámara, a pesar de ser el de mayor magnitud, no excede los espectros de respuesta de los otros terremotos ya que fue el sismo estudiado con la mayor distancia entre el epicentro y la estación acelerográfica, por lo que las ondas sísmicas se atenuaron antes de llegar al punto de registro.

Aun así, todos los registros mantienen la forma del espectro de respuesta de diseño porque que Costa Rica se caracteriza por tener sismos con ondas de altas frecuencias (períodos bajos). Sin embargo, los registros horizontales del Terremoto de Sámara generan una mayor respuesta estructural en períodos altos, dado que los registros del Terremoto de Sámara tienen la mayor distancia epicentral y sus ondas sísmicas reducen su frecuencia al llegar al punto de registro, por lo que sus períodos de vibración aumentan y activan de una mayor manera la vibración de estructuras con períodos altos.

Por otro lado, la siguiente figura muestra los espectros de respuesta de aceleración de la componente vertical de los tres terremotos estudiados, generados mediante el programa SeismoMatch. Se utilizó como espectro de referencia el espectro de respuesta de aceleración horizontal multiplicado por  $2/3$ , para transformar la demanda horizontal en demanda vertical, según se comentó en secciones anteriores.



**Figura 60.** Espectros de aceleración vertical de los terremotos en estudio.

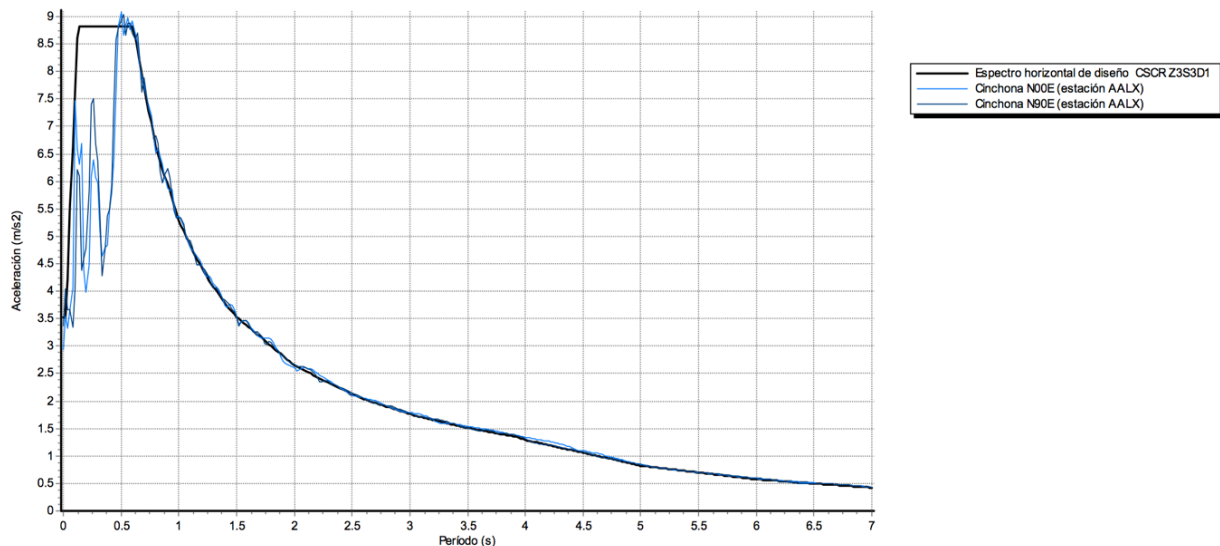
Se puede observar en la figura anterior que los espectros de respuesta de aceleración vertical de los terremotos estudiados tampoco exceden el espectro de diseño. Esto valida el supuesto mencionado en secciones anteriores donde se indicó que para sismos

lejanos a la falla, era conservador utilizar una aceleración vertical igual a 2/3 de la horizontal.

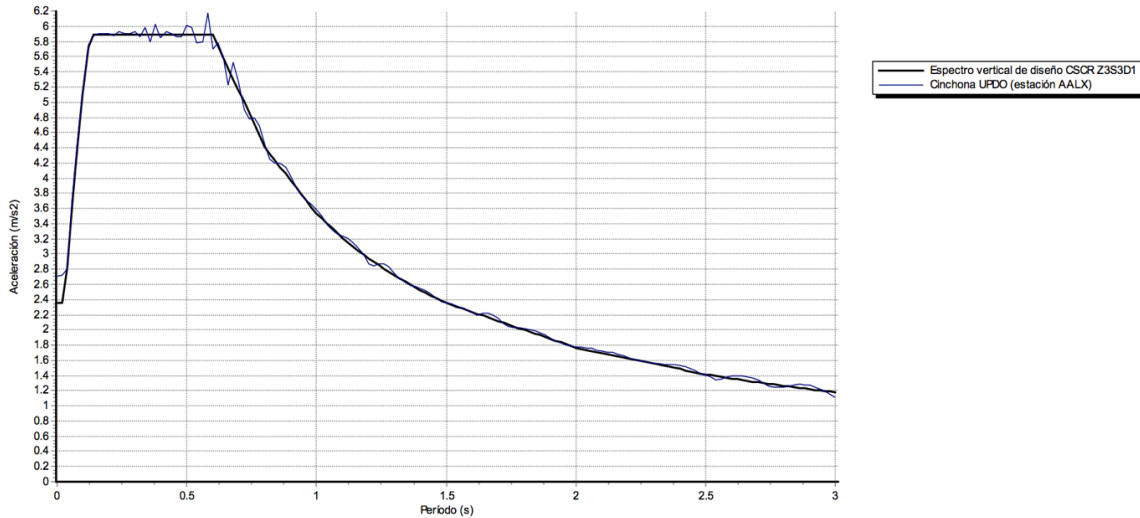
#### 6.1.4 Espectros de respuesta de aceleración escalados

En las siguientes figuras se presentan únicamente los espectros de respuesta de aceleración de los acelerogramas escalados del Terremoto de Cinchona, tanto para sismo de diseño como para sismo máximo. La razón de esto es que este es el sismo de referencia. Como el espectro de respuesta de aceleración de los acelerogramas escalados debe de tener una forma similar al espectro de referencia, el resto de espectros escalados se muestran en el Apéndice C.1.

Las siguientes figuras muestran los espectros de respuesta de aceleración horizontal de las componentes N00E y N90E del Terremoto de Cinchona y de la componente UPDO del mismo, todos escalados al sismo de diseño:



**Figura 61.** Espectros de respuesta horizontal del Terremoto de Cinchona escalados al sismo de diseño horizontal.

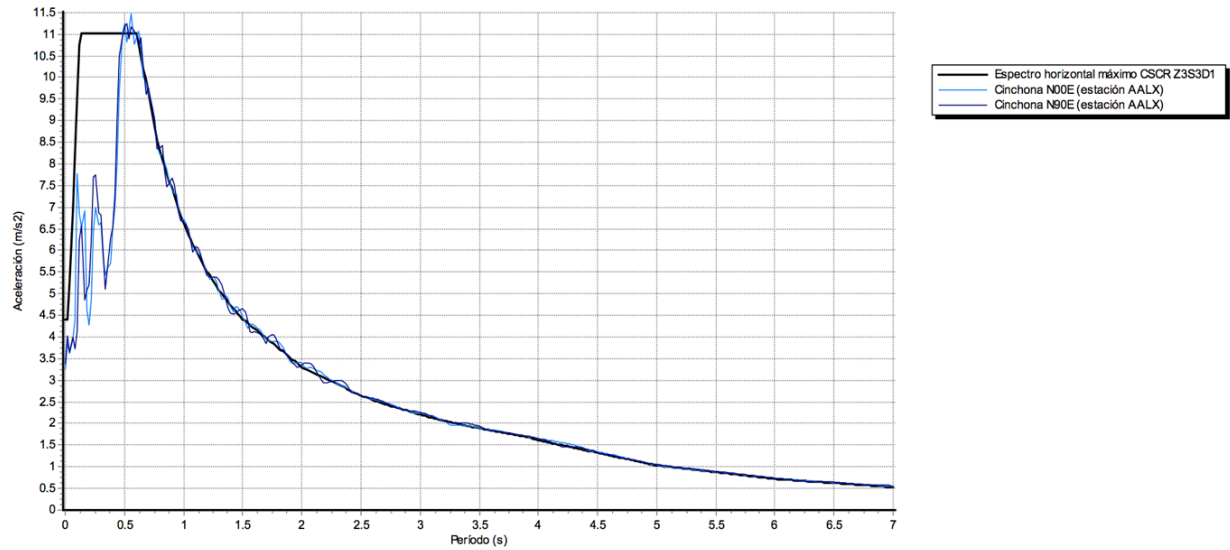


**Figura 62.** Espectro de respuesta vertical del Terremoto de Cinchona escalado al sismo de diseño vertical.

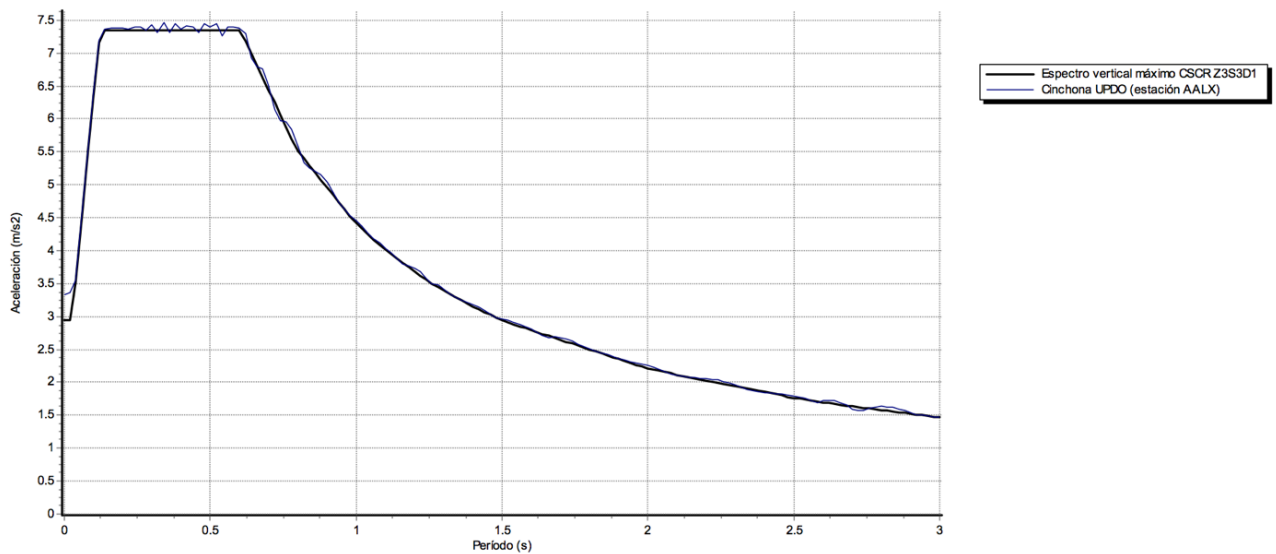
Para el caso de los espectros de respuesta horizontal y vertical de los acelerogramas anteriores escalados al sismo de diseño del CSCR-10/14, se puede observar que, dentro del rango de períodos de escalamiento adoptado, la mayoría de los puntos de estos son iguales o superiores al espectro de referencia. Por esto, se aceptan los resultados obtenidos.

Además, como en esta investigación se necesita también escalar las excitaciones sísmicas al sismo máximo para poder realizar la revisión del sistema de aislamiento sísmico, es necesario presentar los espectros de respuesta de los acelerogramas, utilizados en el análisis, escalados al sismo máximo.

Las siguientes figuras muestran los espectros de respuesta de aceleración horizontal de las componentes N00E y N90E del Terremoto de Cinchona y de la componente UPDO del mismo, todos escalados al sismo máximo:



**Figura 63.** Espectros de respuesta horizontal del Terremoto de Cinchona escalados al sismo máximo horizontal.

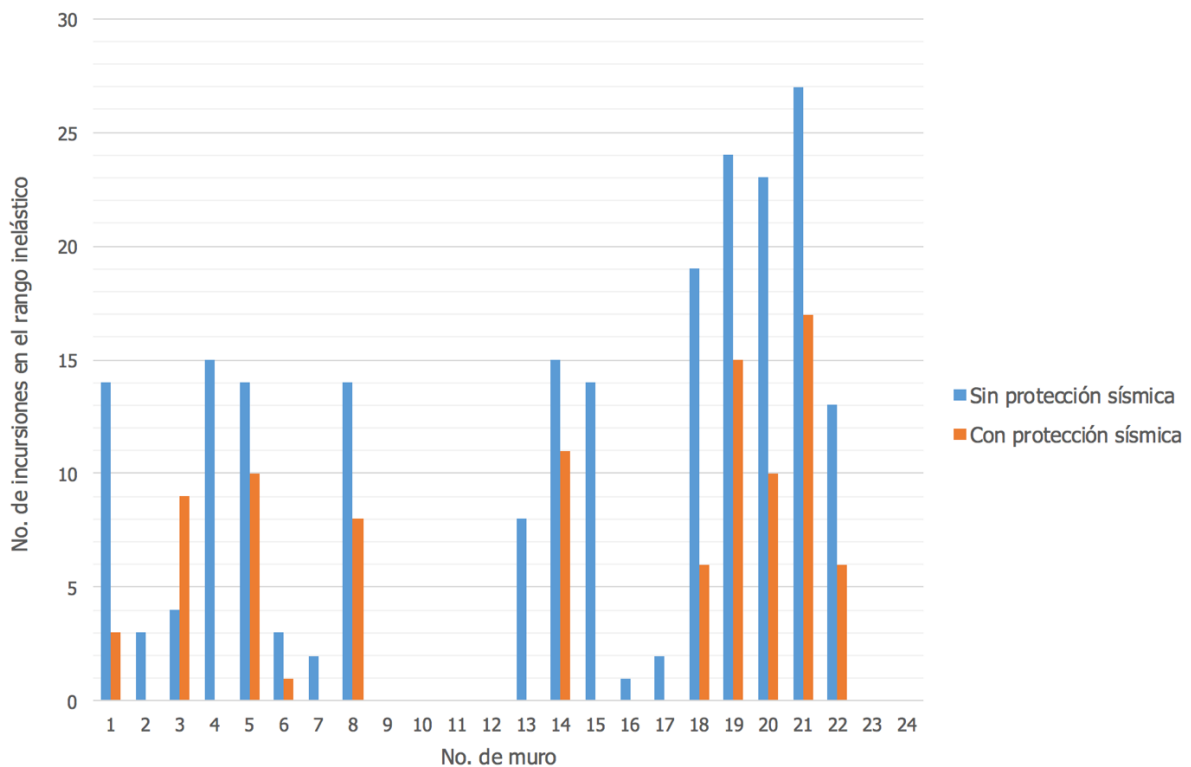


**Figura 64.** Espectro de respuesta vertical del Terremoto de Cinchona escalado al sismo máximo vertical.

Con las dos últimas figuras sucede lo mismo que con los espectros de respuesta escalados al sismo de diseño, se logró llegar al espectro meta en la mayoría de los puntos, dentro del rango de períodos de escalamiento. Sin embargo, la forma de los espectros es diferente pues los que fueron escalados al sismo máximo tienen una demanda 1,25 veces mayor que los del sismo máximo, por lo que las onduletas agregadas para alcanzar el espectro de referencia son diferentes en ambos casos.

## 6.2 Incursiones en el rango inelástico

A continuación se presentan los gráficos de incursiones en el rango inelástico de los muros estudiados. Sin embargo, sólo se muestran los correspondientes al Terremoto de Cinchona. El resto se muestra en tablas detalladas en el Apéndice C.2. Se comienza mostrando los de los muros del primer nivel actuando en su eje fuerte:



**Figura 65.** Número de incursiones en el rango inelástico de los muros del primer nivel actuando en su sentido fuerte, durante el Terremoto de Cinchona.

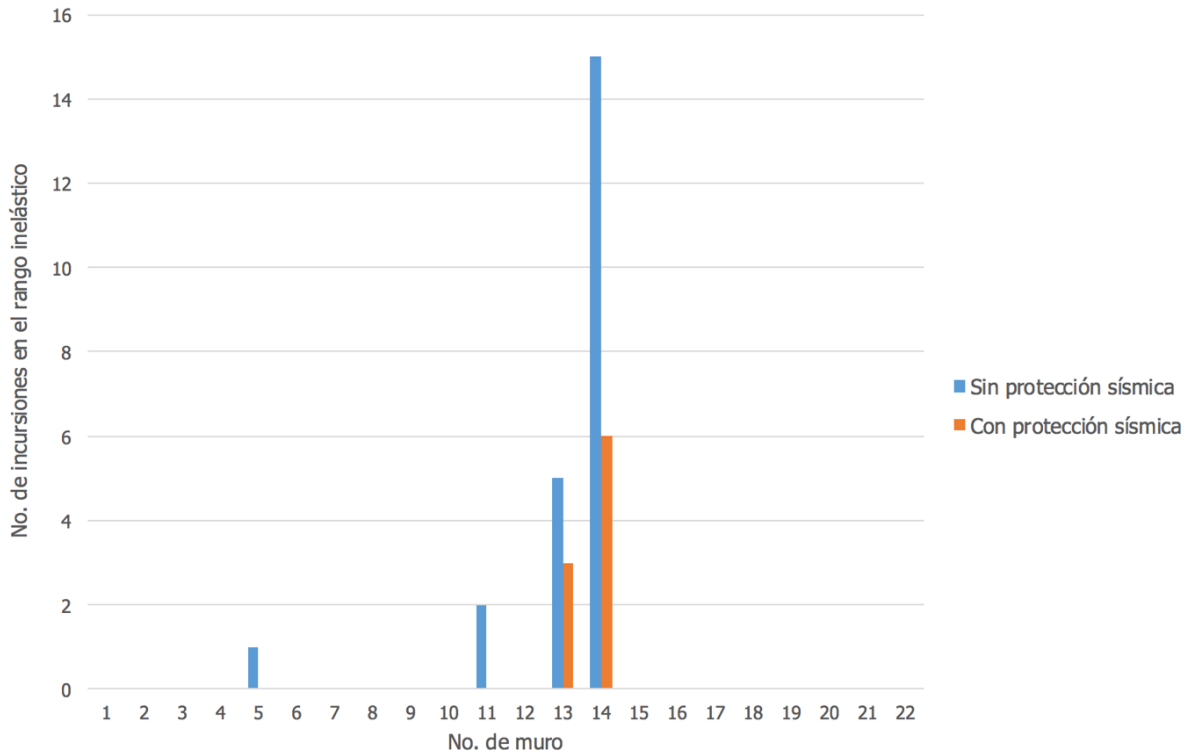


Como se puede observar, en el edificio sin aislamiento sísmico, la mayoría de los muros del primer nivel exceden su capacidad elástica a flexión en el eje fuerte e incursionan en el rango inelástico. Además, el muro con mayores incursiones en el rango inelástico (muro 21) es uno de los muros de la fachada del lado menos rígido, en planta, del edificio. Por lo tanto, ante cargas sísmicas, es de los muros que más demanda de flexión tiene, incluidos los efectos de torsión en planta de la estructura. Algo similar ocurre con el resto de los muros en la misma fachada pues son de los que más veces incursionan en el rango inelástico.

Para el caso del edificio con aislamiento sísmico y amortiguamiento viscoso, son menos los muros que entran en el rango inelástico resistiendo fuerzas en su sentido fuerte ya que el muro 21, que es de los más críticos, incursiona sólo 17 veces; es decir, 10 veces menos que en el caso sin protección sísmica. Por lo tanto, a pesar de que no se logró garantizar que los muros estudiados permanecieran en el rango elástico, con los sistemas de protección sísmica se redujo significativamente la demanda de carga sobre los muros gracias al aumento del período fundamental de la estructura y al amortiguamiento proporcionado. Como resultado, también se redujo el número de veces que estos incursionan en el rango inelástico. Esto se traduce a menos daño, tanto estructural como no estructural.

Cabe recalcar el comportamiento del muro 3 del primer nivel. Este muro incursiona más veces en el rango inelástico estando en el edificio con sistemas de protección sísmica que en el que no tiene. Como se vio en el análisis modal, el porcentaje de masa rotativa participando en el modo fundamental de torsión aumentó en el edificio aislado de su base por lo que, como el muro 3 está en una fachada extrema, posiblemente esta situación se deba a un aumento en los efectos de torsión sobre los muros más alejados del centro de rigidez en planta del edificio.

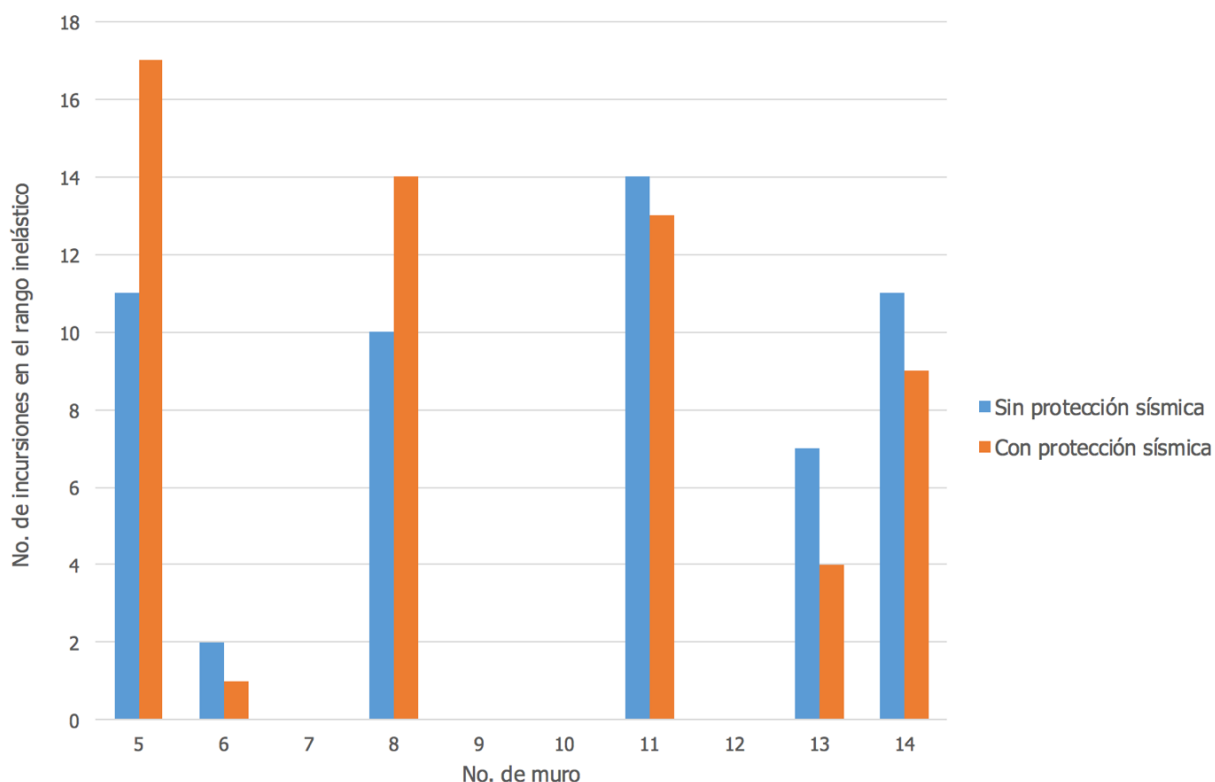
Por otro lado, los resultados de las incursiones en el rango inelástico para los muros del primer nivel, actuando en su sentido débil, se muestran a continuación:



**Figura 66.** Número de incursiones en el rango inelástico de los muros del primer nivel actuando en su sentido débil, durante el Terremoto de Cinchona.

En cuanto al sentido débil, son menos los muros que exceden su capacidad elástica a flexión. Esto es de esperarse ya que en una estructura tipo muro, los muros trabajan en su sentido fuerte pues en el sentido ortogonal tienen otro juego de muros resistiendo cargas. Además, se observa que los muros con mayores incursiones en el rango inelástico, producto de cargas actuando sobre su eje débil, son los muros entre la transición de la zona rígida y la zona flexible, en planta, de dicho nivel. Por lo tanto, aun en el sentido débil de los muros, se siguen observando los efectos de la torsión en planta del edificio sobre los elementos sismorresistentes.

En cuanto a los impactos de los sistemas de protección sísmica, estos también reducen la demanda de flexión sobre los muros del primer nivel resistiendo cargas en su sentido débil.

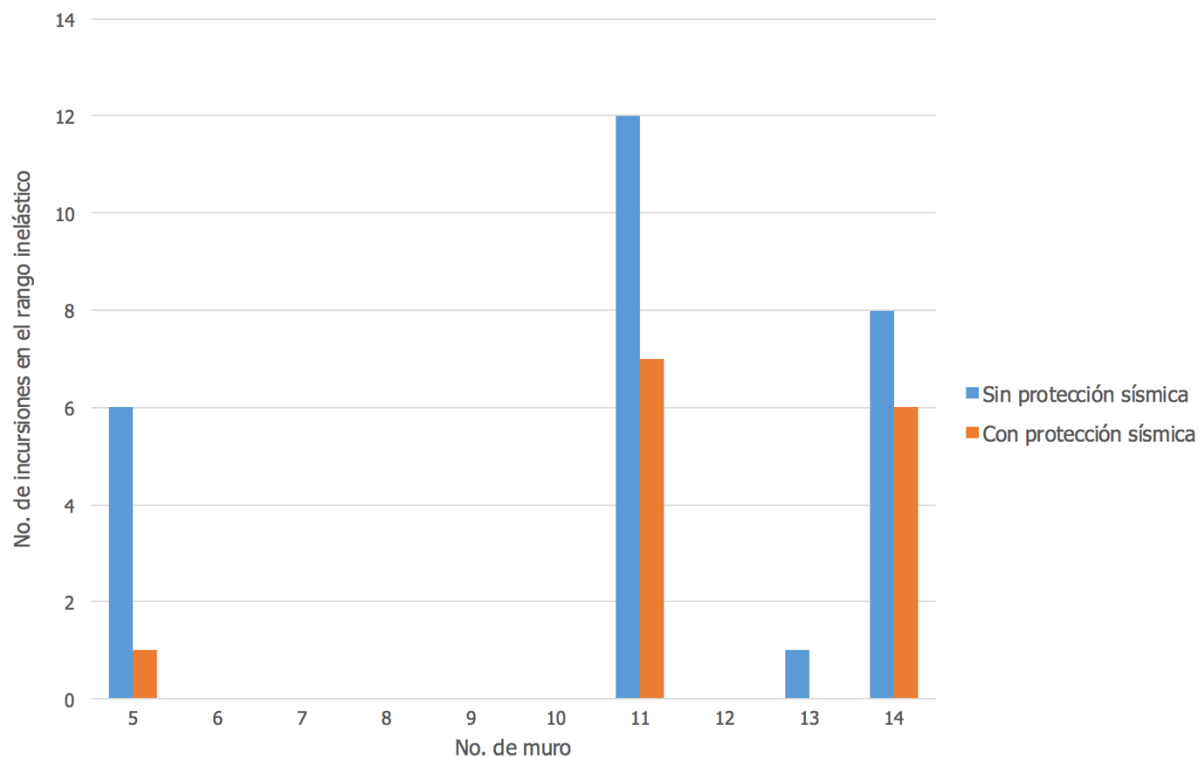


**Figura 67.** Número de incursiones en el rango inelástico de los muros del cuarto nivel actuando en su sentido fuerte, durante el Terremoto de Cinchona.

En el caso de los muros del cuarto nivel del edificio sin aislamiento sísmico, estos se siguen teniendo incursiones importantes en el rango inelástico al resistir cargas en el eje fuerte y esto se debe a la reducción en la rigidez a flexión de los muros en este punto dada la reducción en la resistencia a la compresión del concreto. Este comportamiento no es esperado ya que en niveles superiores se tienen demandas de carga menores, por lo que las incursiones en el rango inelástico de los muros del cuarto nivel deberían de reducirse comparadas a las del primer nivel y, en ciertos casos, están aumentando. Lo anterior también puede ser producto de la disminución en la rigidez en planta de la estructura en el cuarto nivel, ya que el área en planta y la cantidad de muros resistiendo en el sentido X disminuyen conforme se pasa del primer al cuarto nivel; por lo tanto, los muros tienen una rigidez relativa mayor y deben resistir mayores cargas que en el primer nivel.

En el edificio con aislamiento sísmico, la disminución de las incursiones en el rango inelástico de los muros del cuarto nivel, actuando en su eje fuerte, no son tan apreciables como sucedía con los muros del primer nivel. Por lo tanto, los LRB no benefician en gran manera a los elementos estructurales de los niveles superiores. Esto se debe a que, como la estructura aislada sigue siendo flexible, aumenta sus desplazamientos en niveles superiores por lo que las aceleraciones sísmicas aumentan, así como la demanda de carga sobre los elementos estructurales. De hecho, los muros 5 y 8, que son los que resisten cargas laterales en el sentido Y del edificio, incursionan más en el rango inelástico teniendo estos sistemas de protección sísmica. Esto se debe posiblemente a los problemas de torsión comentados anteriormente.

Los resultados en el eje débil de los muros del cuarto nivel se muestran a continuación:

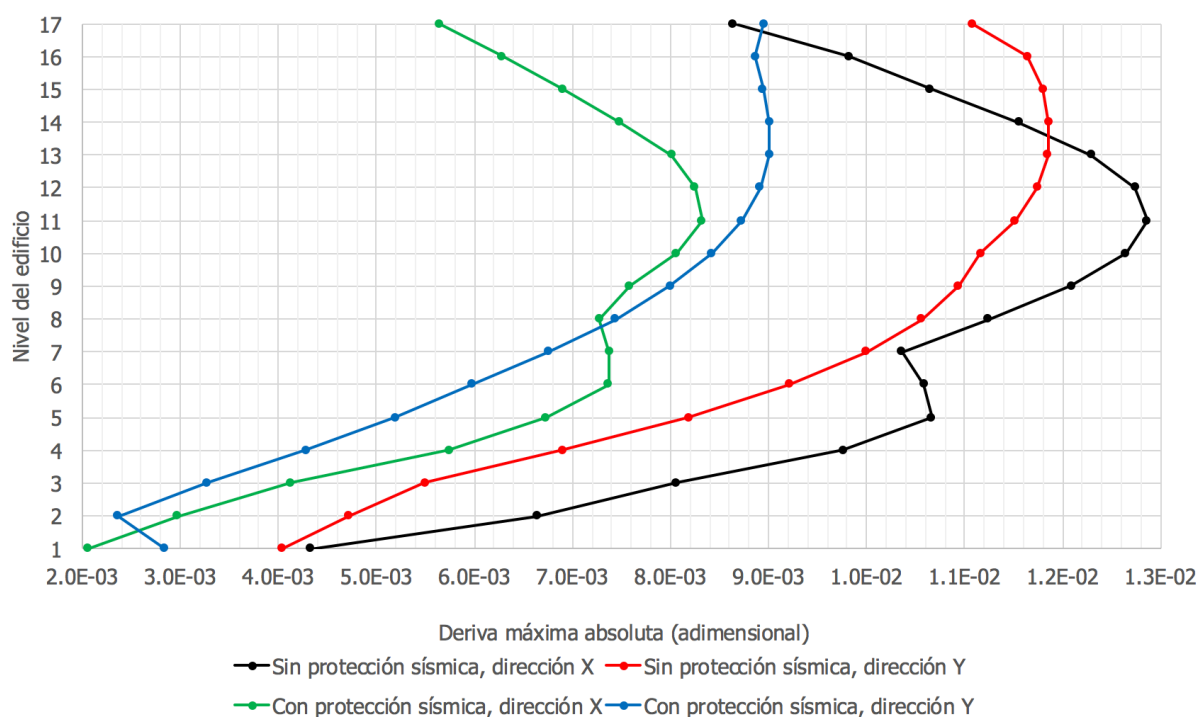


**Figura 68.** Número de incursiones en el rango inelástico de los muros del cuarto nivel actuando en su sentido débil, durante el Terremoto de Cinchona.

En cuanto al eje débil, los muros del cuarto nivel tienen un comportamiento similar a los del primer nivel, con la diferencia de que la mayoría de estos muros incursionan más veces en el rango inelástico, con ambas condiciones de base, por el aumento de rigidez relativa de los mismos, producto de la disminución de muros en dicho nivel.

### 6.3 Patrones de derivas y desplazamientos máximos

A continuación se presentan los gráficos de derivas máximas absolutas. Sin embargo, sólo se muestran las correspondientes al Terremoto de Cinchona. El resto se muestra en el Apéndice C.3.

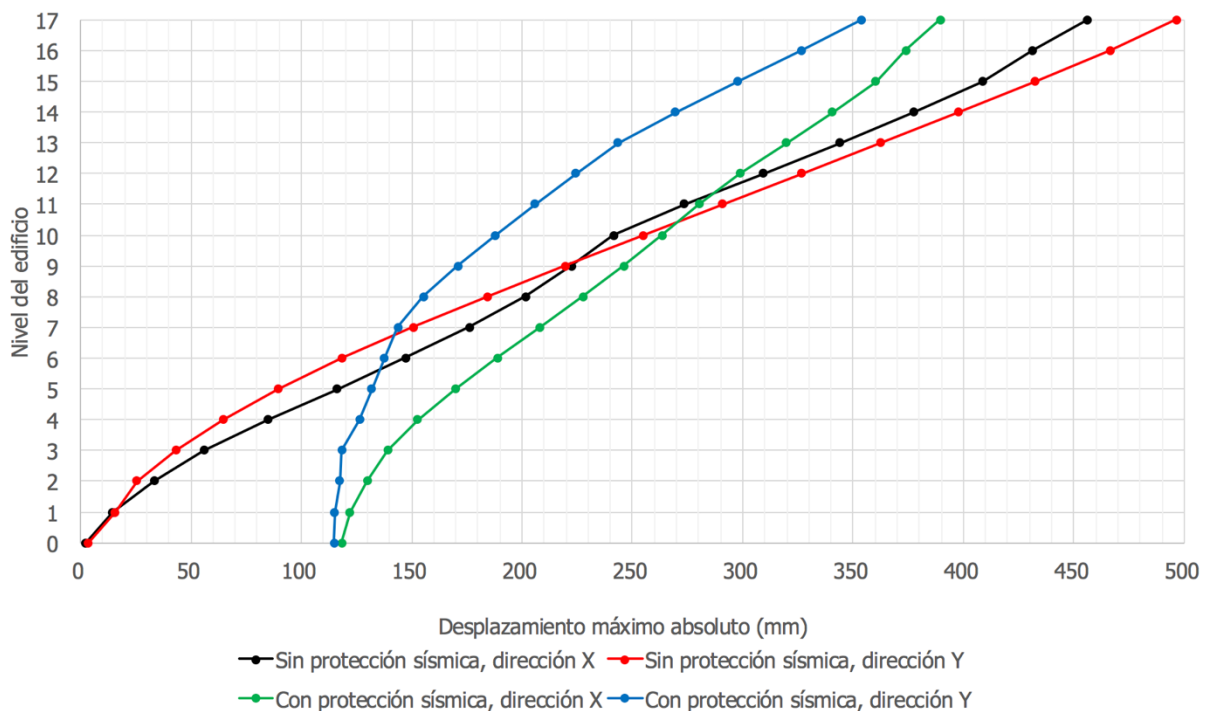


**Figura 69.** Derivas máximas absolutas durante el Terremoto de Cinchona.

Como se puede observar de la figura anterior, a pesar de que los resultados no son reales por no haberse definido las propiedades inelásticas del concreto, las derivas máximas son mayores, en ambos ejes principales del edificio, para la condición de base sin aislamiento sísmico. A pesar de que la flexibilidad de los LRB aumenta el desplazamiento en la base, que no se aprecia en las figura anterior por cuestiones de escala, los amortiguadores viscosos reducen este desplazamiento y proporcionan

amortiguamiento para reducir las derivas en los niveles superiores. Además, se puede observar que el patrón de derivas es similar en ambas condiciones de base, por lo que el uso de LRB no fue suficiente para que la superestructura se comportara como un cuerpo rígido en términos de deformaciones laterales. Sin embargo, en el eje X es clara la reducción drástica en derivas en los niveles superiores comparado con el edificio sin aislamiento sísmico. Por lo tanto, se concluye que es difícil rigidizar una estructura alta de concreto reforzado para que adopte el comportamiento de cuerpo rígido.

Como en los patrones de deriva no se observa el efecto de los LRB en cuanto a desplazamientos, se incluyen los patrones de desplazamiento máximo del edificio, en ambos sentidos del mismo. También, esto sólo se hace para el Terremoto de Cinchona, el resto se encuentra en el Apéndice C.4.



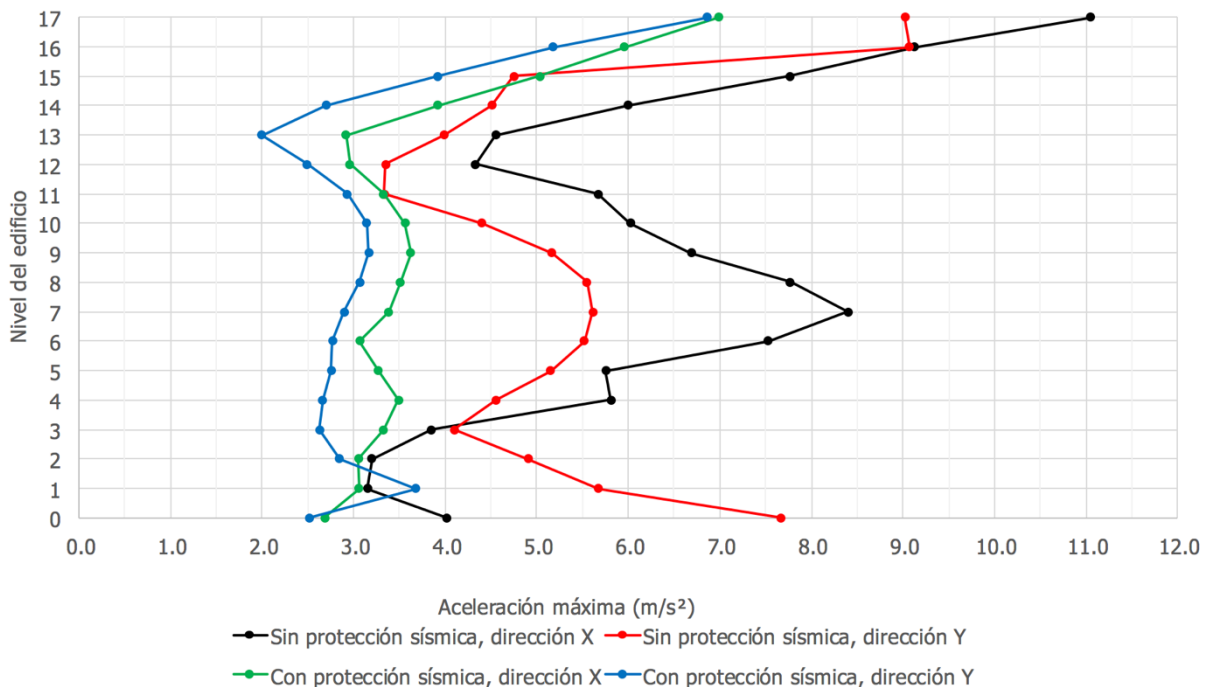
**Figura 70.** Desplazamientos máximos absolutos durante el Terremoto de Cinchona.

De la figura anterior se observa que los desplazamientos máximos son mayores para el edificio sin aislamiento sísmico. Por lo tanto, aun cuando los LRB son flexibles y sufren los mayores desplazamientos laterales a nivel de base, comparado con la base

del edificio sin aislamiento sísmico, el desplazamiento máximo en el techo es menor al tener tecnologías de protección sísmica puesto que estos dispositivos amortiguan la energía sísmica y reducen la demanda de desplazamiento. Sin embargo, no lo hacen de la manera suficiente para garantizar que la superestructura se comporte como cuerpo rígido puesto que los desplazamientos no son constantes en altura después del nivel de aislamiento sísmico.

## 6.4 Patrones de aceleraciones

Otro parámetro importante de comparar en este análisis es el patrón de aceleraciones. Resulta conveniente estudiar este parámetro en el nivel superior pues es el punto crítico de aceleraciones en un edificio de base convencional y afecta la tranquilidad de los usuarios. A continuación se muestran los patrones de aceleración para el Terremoto de Cinchona, el resto se encuentran en el Apéndice C.5.



**Figura 71.** Patrón de aceleraciones durante el Terremoto de Cinchona.

Como se puede observar, a pesar de que los resultados no son reales por no haberse definido las propiedades inelásticas del concreto, las aceleraciones en el edificio sin

aislamiento sísmico aumentan desde la base hasta el techo, como es de esperarse puesto que los desplazamientos son mayores en este punto y la aceleración es directamente proporcional a esta variable. En el caso de la estructura con aislamiento sísmico y amortiguamiento viscoso, las aceleraciones en el edificio también aumentan con la altura ya que esta sigue manteniendo un comportamiento flexible. Entonces, el amortiguamiento de los sistemas de protección sísmica no fue suficiente para garantizar que el amortiguamiento de la superestructura fuera capaz de disipar la energía sísmica restante y reducir la aceleración y los desplazamientos en niveles superiores. Sin embargo, el aumento de aceleraciones es menor gracias al amortiguamiento que los LRB y los amortiguadores viscosos lograron proporcionar.

## **6.5 Comparación según los terremotos**

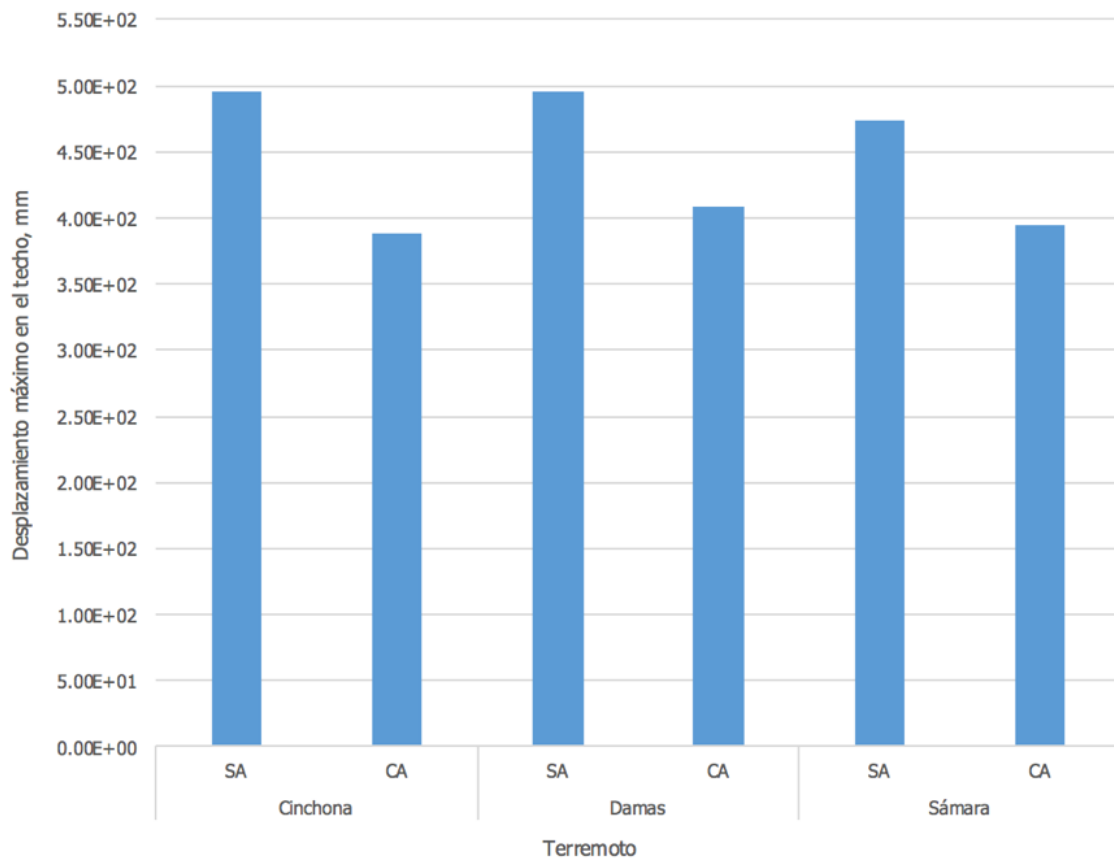
En esta sección se resumirán los parámetros de mayor interés para observar los beneficios del aislamiento sísmico y amortiguamiento viscoso durante los tres terremotos estudiados. Entre estos se encuentran: desplazamientos máximos en el techo del edificio, aceleraciones máximas en el techo del edificio, demanda de momentos en un muro crítico del sentido débil del edificio (sentido Y), demanda de momentos en un muro crítico del sentido fuerte del edificio (sentido X), desplazamientos máximos en los LRB y ciclos de histéresis de los LRB y amortiguadores viscosos críticos. Como nomenclatura de esta sección se tiene:

- SA: sin aislamiento sísmico.
- CA: con aislamiento sísmico y amortiguamiento viscoso.
- Cap: Capacidad elástica a flexión de los muros estudiados.

En la siguiente figura se observa el gráfico comparando los desplazamientos máximos del edificio a nivel de techo, en un punto extremo del mismo. Cabe recalcar que los valores que se presentan resultan de un análisis de respuesta en el tiempo en el cual no se definieron las propiedades inelásticas del concreto. Por lo tanto, los resultados no son reales porque el edificio incursiona en el rango inelástico durante los tres terremotos y esto altera los resultados elásticos.



Los resultados elásticos sirven como patrón para observar tendencias en el comportamientos de la estructura. Además, resulta importante recordar que, durante los tres terremotos, las derivas en el edificio fueron reducidas al utilizar los sistemas de protección sísmica. Esto ya que comparar desplazamientos por si solos no resulta conveniente porque, como el mayor desplazamiento se da a nivel de aislamiento, un desplazamiento mayor a nivel de techo no necesariamente implica un mayor desplazamiento en los niveles superiores de la estructura.



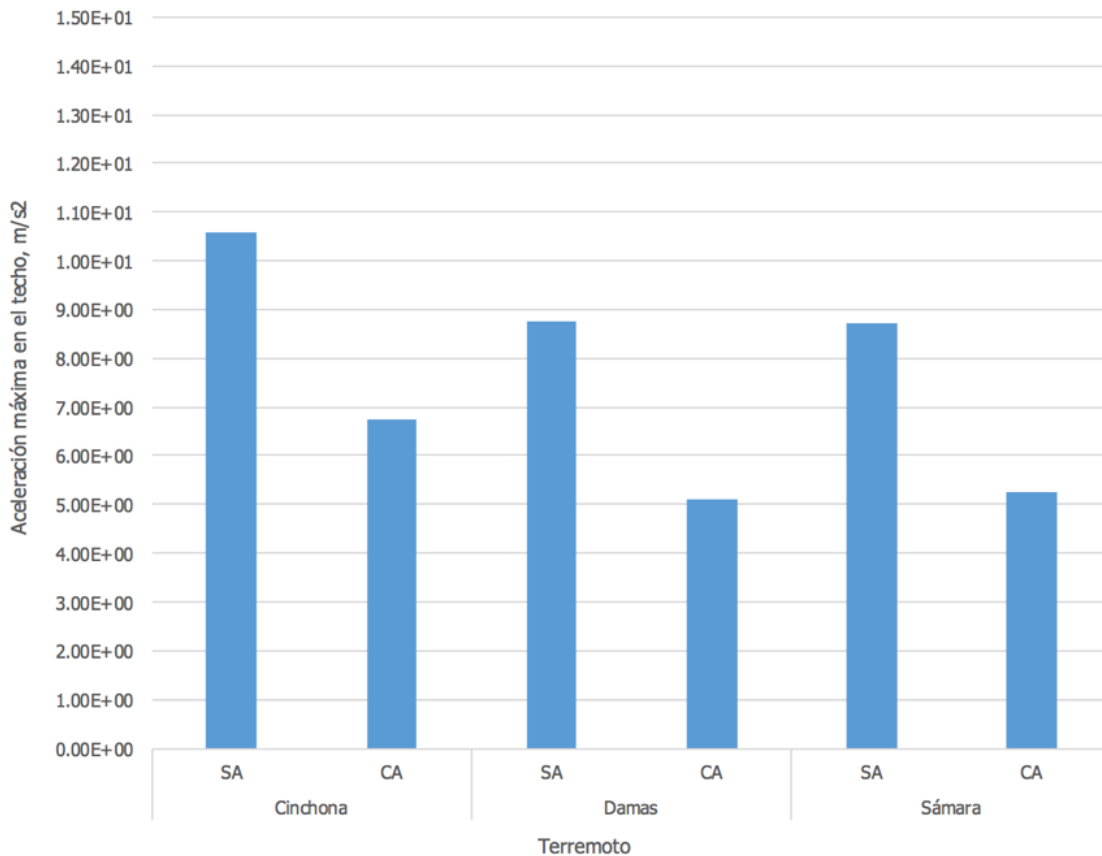
**Figura 72.** Gráfico comparativo de los desplazamientos máximos en el techo.

Como se observa en la figura anterior, el edificio sin aislamiento sísmico tiene un comportamiento similar durante los tres terremotos, con la ligera diferencia de que el Terremoto de Sámara produce un desplazamiento en el techo menor. Para el caso del edificio con aislamiento sísmico y amortiguamiento viscoso, el amortiguamiento y la flexibilidad del sistema de aislamiento reducen los desplazamientos a nivel de techo, a

pesar de que en la base se tenga un desplazamiento mayor y los desplazamientos sigan aumentando conforme se avanza en la superestructura (la estructura sigue siendo flexible).

A pesar de que el gráfico anterior indica que el menor desplazamiento máximo en el techo se da producto del Terremoto de Cinchona, en el Apéndice C.4 se observa, de una manera global, que esto le corresponde al Terremoto de Sámara.

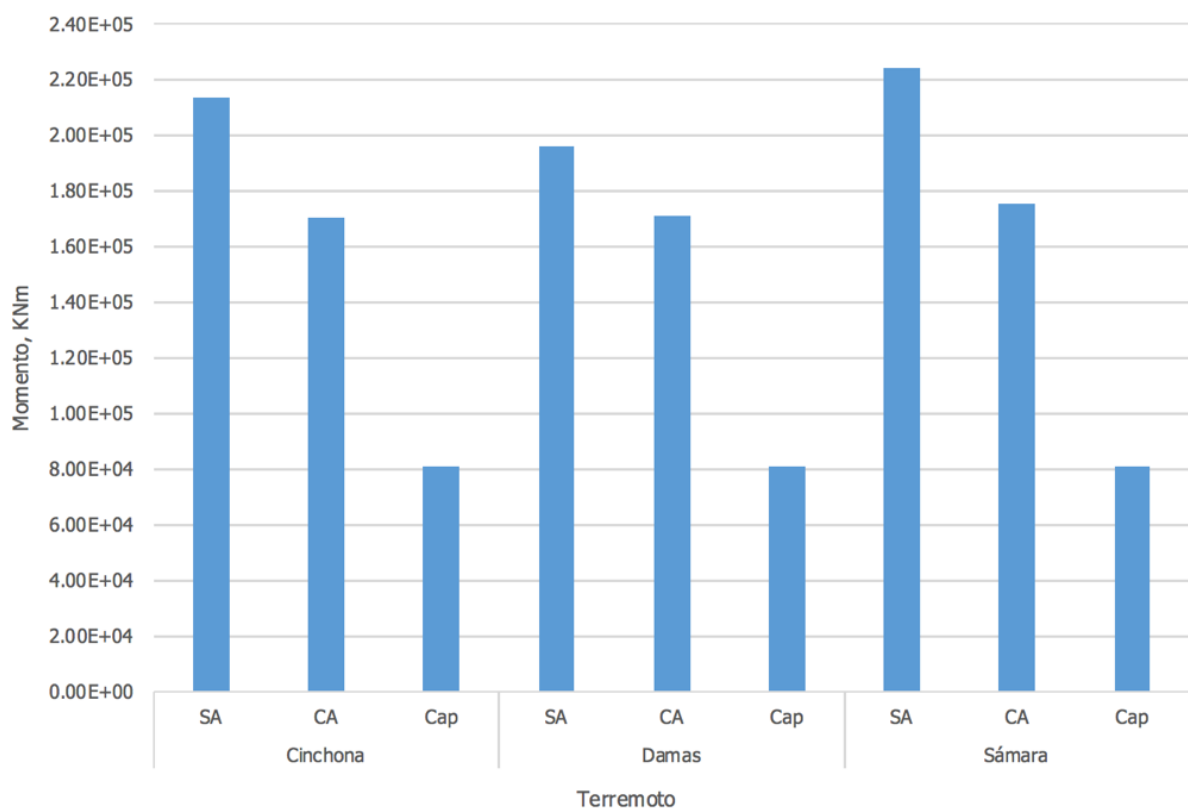
Por otro lado, en la siguiente figura se muestra un gráfico comparando las aceleraciones máximas que el edificio experimenta en el techo (sabiendo que no son valores reales porque no se definieron las propiedades inelásticas del concreto, pero sirven para observar patrones):



**Figura 73.** Gráfico comparativo de las aceleraciones máximas en el techo.

De la figura anterior se observa que, a pesar de que el edificio con aislamiento sísmico y con amortiguamiento viscoso reduce las aceleraciones en el techo comparado con el edificio sin aislamiento sísmico, los terremotos de Damas y Sámara generan menos aceleraciones para ambas condiciones de base, comparado con el Terremoto de Cinchona. La razón de lo anterior es que los terremotos de Damas y Sámara tienen la mayor distancia epicentral por lo que sus aceleraciones se atenúan con el recorrido de las ondas sísmicas..

Otro parámetro de interés son las fuerzas internas en los muros críticos (propensos a la formación de rótulas plásticas). En la siguiente figura se muestra un gráfico comparando los momentos en el muro 5, uno de los que más carga lateral toma en el sentido Y (débil) de la estructura.

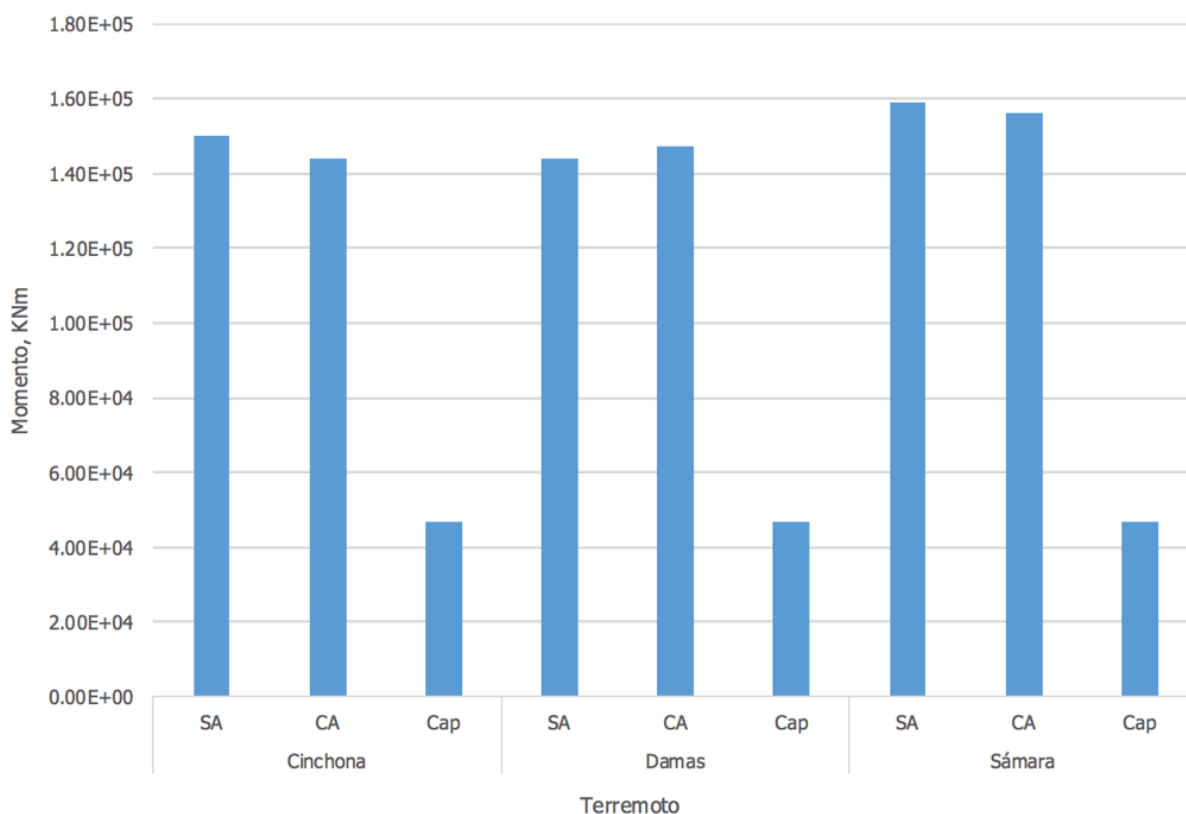


**Figura 74.** Gráfico comparativo de los momentos en el eje fuerte del muro 5 del primer nivel.

Como se observa en la figura anterior, el muro 5 del primer nivel excede su capacidad elástica a flexión en el sentido fuerte en todos los escenarios. El Terremoto de Sámara provoca la mayor demanda; a pesar de haber sufrido una posible atenuación de ondas, como se comentó anteriormente, sus ondas sísmicas tienen un mayor contenido de frecuencias debido a que tiene la mayor magnitud y estas excitan de mayor forma la manera de vibrar del edificio y, por lo tanto, generan una mayor demanda sobre dicho muro. El sistema de aislamiento sísmico y amortiguamiento viscoso utilizado no fue suficiente para mantener al muro dentro del rango elástico, pero redujo la demanda sobre él. Las mayores reducciones en demanda producto de la protección sísmica se dan con el Terremoto de Cinchona y con el Terremoto de Sámara y, como la distancia epicentral no es un parámetro común, el contenido de frecuencias pudo haber beneficiado el grado de amortiguamiento proporcionado por el sistema de protección sísmica.

Una reducción en la demanda trae beneficios estructurales puesto que permite un diseño más económico. Sin embargo, el elemento sigue incurriendo en el rango inelástico y esto genera daño en él. Aun así, el sistema de protección sísmica redujo, en este muro, la cantidad de incursiones en el rango inelástico, reduciendo el daño sobre el mismo. Esto se puede traducir a una reducción en costos de reparación en caso de que el edificio sea sometido al sismo de diseño.

Como este muro tiene continuidad vertical, resulta conveniente estudiar su comportamiento en el cuarto nivel, donde cambia de una resistencia de concreto de 70,0 MPa a 42,0 MPa. Además, este es el único parámetro que varía dentro del muro entre estos dos niveles puesto que la razón de confinamiento y la sección transversal del mismo se mantienen. Por lo tanto, cualquier cambio de comportamiento es atribuido a esta reducción en la rigidez del concreto. De esta forma, los resultados de flexión en el eje fuerte sobre este muro en el cuarto nivel se muestran en la siguiente figura:

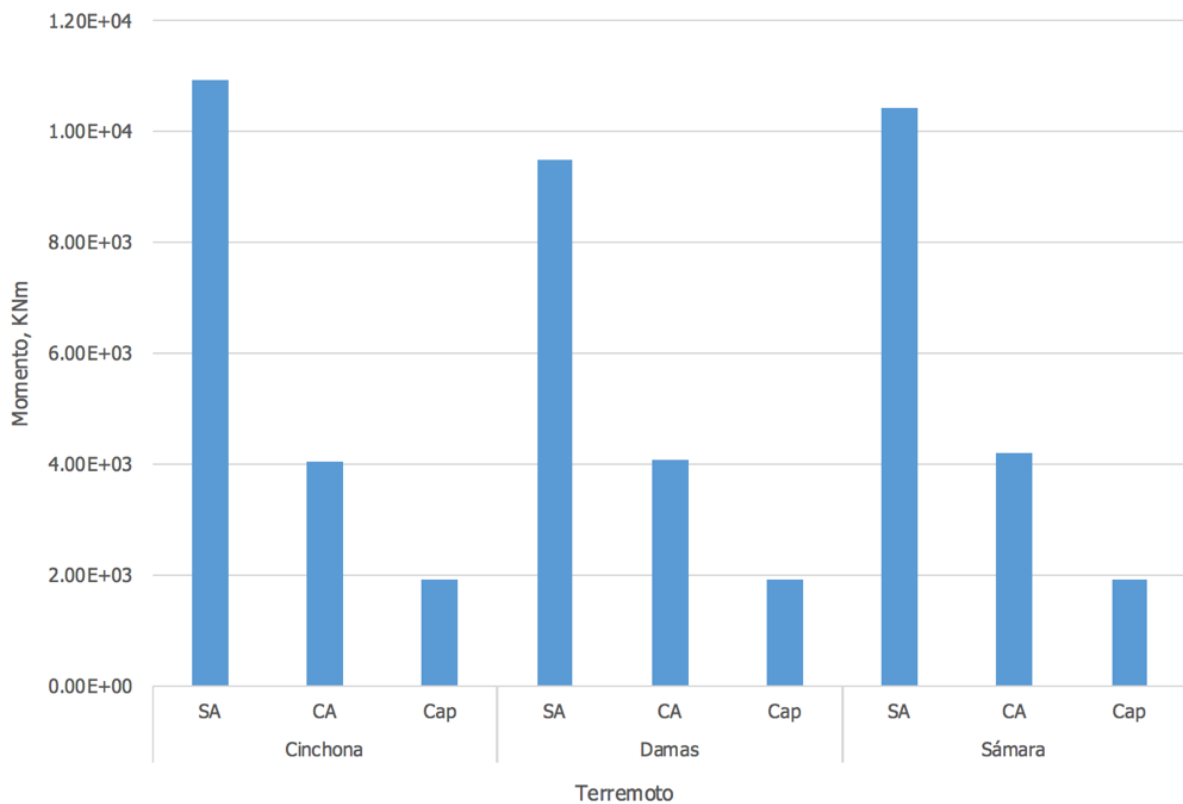


**Figura 75.** Gráfico comparativo de los momentos en el eje fuerte del muro 5 del cuarto nivel.

En el cuarto nivel, el muro 5 sigue siendo afectado de una mayor manera por el Terremoto de Sámara por las razones dadas anteriormente. Sin embargo, este gráfico demuestra que la reducción en la rigidez a la flexión, producto del cambio en la resistencia a la compresión del concreto, afecta la demanda de carga sobre el muro, incluso con sistemas de protección sísmica. La única variable que cambia en el muro del primer al cuarto nivel es la resistencia del concreto, por lo tanto, este cambio es el responsable de que la demanda en el muro con sistemas de protección sísmica sea similar, o mayor, a la demanda en el muro sin aislamiento sísmico en el edificio.

De esta misma forma, se estudió el muro 21 (sólo presente en el primer nivel y resistiendo en el eje X) ya que es uno de los muros con los mayores factores de sobredemanda por estar ubicando en la fachada de la zona más flexible del edificio (menor densidad de muros). Por esto, los efectos de torsión son importantes y

aumentan la demanda de carga sobre este muro. El gráfico comparativo se muestra a continuación:

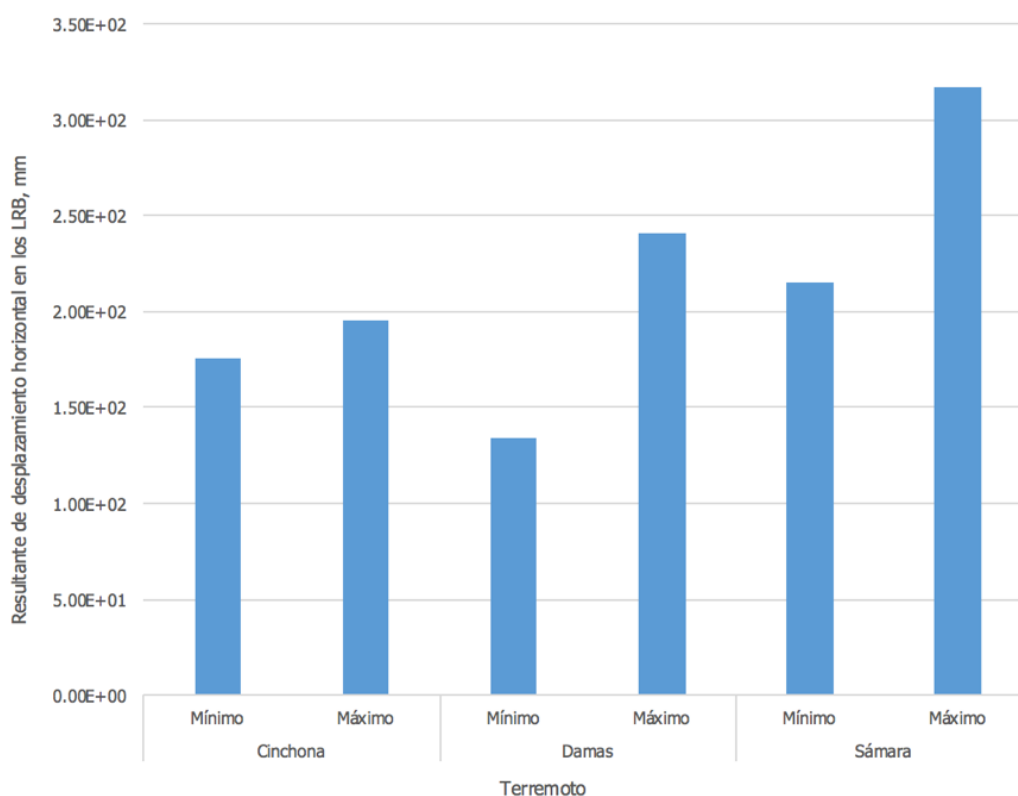


**Figura 76.** Gráfico comparativo de los momentos en el eje fuerte del muro 21 del primer nivel.

Como se observa en la figura anterior, el muro 21, a pesar de ser de los que más exceden su capacidad a flexión elástica en el eje fuerte, muestra las mayores reducciones en demanda producto de los sistemas de aislamiento sísmico y amortiguamiento viscoso. Como ya se mostró que el porcentaje de masa participando en los modos de torsión aumenta en el modelo con aislamiento y amortiguamiento sísmico y, como sobre este muro sólo hay tres niveles apoyados (no recibe una carga axial significativa), lo que explica la reducción de demanda a flexión en él es el arriostamiento proporcionado por los amortiguadores viscosos, que reducen los desplazamientos y, por lo tanto, restringen la concentración de esfuerzos producto de la torsión que ocurre en los muros de esa fachada (eje G). A pesar de la reducción en

demanda, excede la capacidad elástica a flexión en el eje fuerte e incursiona en el rango inelástico para los tres terremotos. Sin embargo, sucede lo mismo que con el muro 5, los sistemas de protección sísmica reducen la demanda y el número de veces que este muro incursiona en el rango inelástico. Por lo tanto, se reducen los daños y costos futuros de reparación.

Finalmente, también resulta conveniente estudiar la demanda de desplazamiento horizontal sobre los LRB producto de los tres terremotos. Como pide la normativa estudiada en esta investigación, el desplazamiento debe ser la resultante de la suma de cuadrados del desplazamiento en ambos sentidos horizontales. Para el siguiente gráfico, se tomaron las mínimas y máximas demandas de desplazamiento horizontal sobre los LRB, ya que de esto depende el grado de amortiguamiento.



**Figura 77.** Gráfico comparativo de la resultante de los desplazamientos horizontales en los LRB.

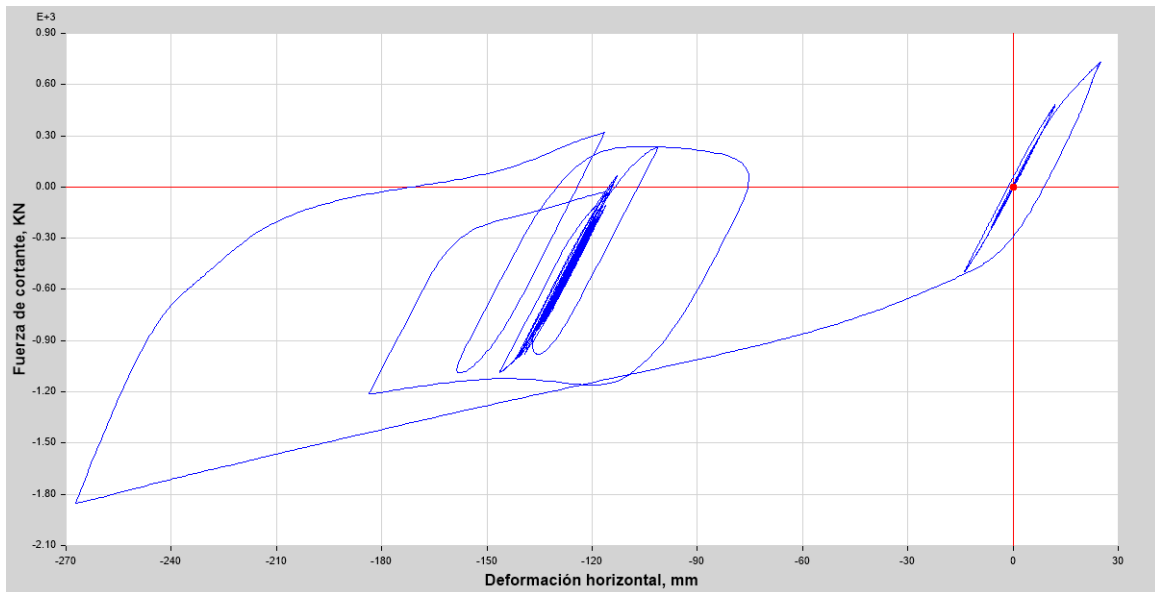
Como se mostró en la figura anterior, el Terremoto de Sámara produce los mayores desplazamientos en los LRB. Además, ninguno llega a la capacidad de desplazamiento horizontal máxima de los LRB utilizados en esta investigación (0,86 m).

Por esta razón, y como se mostrará en los siguientes ciclos de histéresis, el sistema de aislamiento sísmico tiene la capacidad de amortiguar más energía de la que amortiguó en los análisis de respuesta en el tiempo. Esto se debe a que, al tratarse de un edificio alto de concreto reforzado, la demanda axial sobre los LRB es alta y, para poder resistirla, se requiere de un LRB de gran diámetro y esto reduce la flexibilidad lateral de los aisladores.

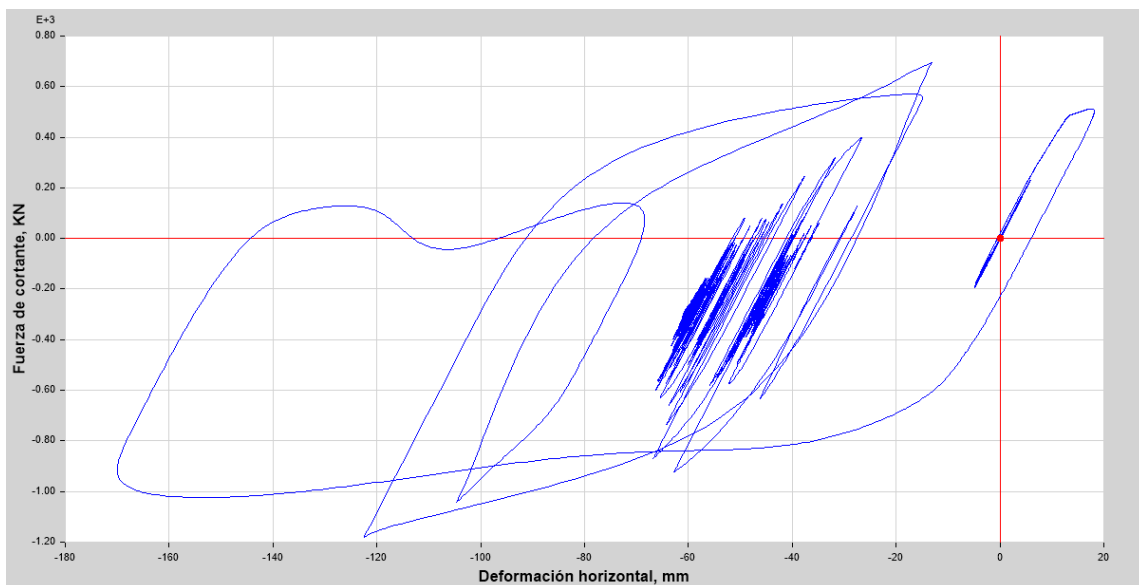
Aun así, los 26 LRB colocados lograron aumentar el período de la estructura de 2,32 s a 4,04 s. Sin embargo, proveen la suficiente rigidez lateral para impedir que los LRB lleguen a su capacidad de desplazamiento. Como consecuencia, disminuye el área del ciclo de histéresis y, así mismo, el amortiguamiento proporcionado.

Para demostrar lo anterior, se seleccionaron los ciclos de histéresis del LRB con mayor desplazamiento horizontal (resultante) y menor desplazamiento horizontal (resultante), ante la demanda de cargas del Terremoto de Sámara (nivel de demanda sísmica máxima), que se comentó que fue el que provocó los mayores desplazamientos y, por lo tanto, los mayores amortiguamientos en el nivel de aislamiento sísmico. Esto con el fin de comprobar que la rigidez en el nivel de aislamiento sísmico no permite que los LRB amortigüen la mayor cantidad de energía a través de su ciclo de histéresis, aun durante el terremoto que les demandó los mayores desplazamientos.





**Figura 78.** Ciclo de histéresis del LRB con mayor demanda de desplazamiento (K3), ante el sismo máximo de Sámara.

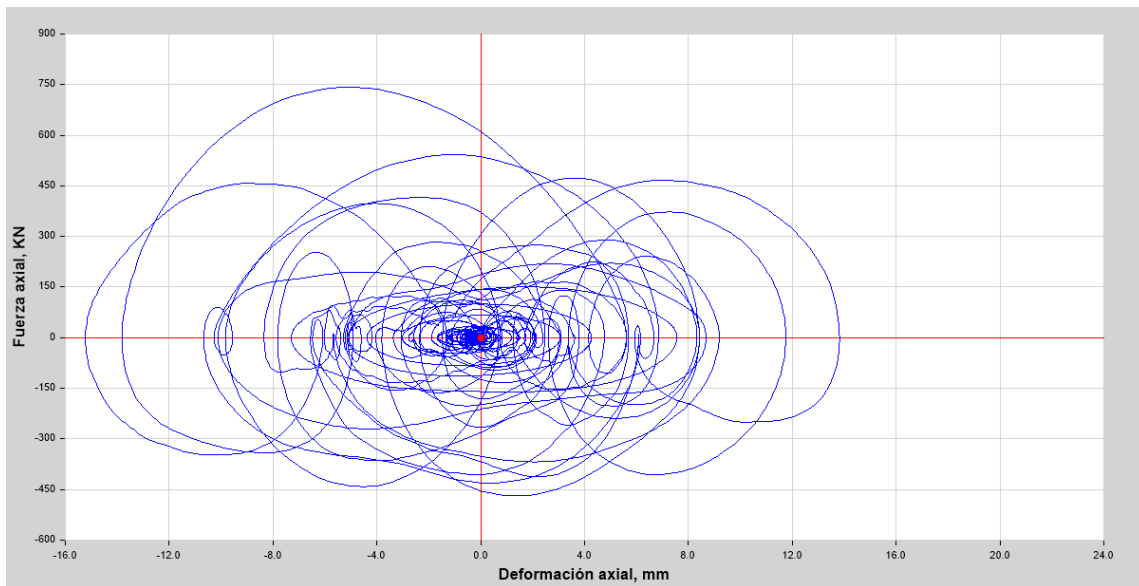


**Figura 79.** Ciclo de histéresis del LRB con menor demanda de desplazamiento (K15), ante el sismo máximo de Sámara.

Como se observa en las figuras anteriores, los dos LRB analizados (K3 con la mayor demanda de desplazamiento y K15 con la menor) funcionan de la manera adecuada pues tienen varios ciclos de histéresis completos. Sin embargo, ninguno llega a la

capacidad máxima de desplazamiento de 860 mm. Por esta razón, el área encerrada por los ciclos de histéresis es menor y, por lo tanto, también lo es el amortiguamiento. Los dos LRB anteriores corresponden a la demanda del Terremoto de Sámara, el cual provocó los mayores desplazamientos a nivel de aislamiento sísmico. Por lo tanto, el sistema de aislamiento sísmico disipó menos energía al ser sometido a la demanda de los otros dos terremotos. En ninguno de los tres casos se aprovechó la capacidad de aislamiento sísmico del sistema utilizado, por tratar de aislar sísmicamente a un edificio pesado. Además, se observa que, en ambos ciclos de histéresis, la mayoría de los ciclos ocurren a desplazamientos pequeños, disipando aún menos energía que el ciclo que llega a los desplazamientos máximos mostrados en los ciclo de histéresis anteriores.

Lo mismo sucede con los amortiguadores viscosos, el que más demanda de desplazamiento axial tiene es producto del Terremoto de Sámara y tampoco se llega a aprovechar la máxima capacidad de amortiguamiento de estos dispositivos. Esto se muestra en el siguiente ciclo de histéresis, correspondiente al amortiguador viscoso K55:



**Figura 80.** Ciclo de histéresis del amortiguador viscoso con mayor demanda de desplazamiento (K55), ante el sismo máximo de Sámara.

En la siguiente sección se revisará que se cumpla con las capacidades del sistema de aislamiento sísmico, y de amortiguamiento viscoso, a pesar de que ya se vio que en términos de desplazamientos ambos están holgados.

## 6.6 Revisión de los sistemas de protección sísmica

Como se ha comentado, el sistema de aislamiento sísmico y amortiguamiento viscoso se debe revisar con los resultados del análisis de respuesta en el tiempo, ya que de ellos depende la estabilidad global de la estructura (específicamente de los LRB porque, de fallar, se compromete el equilibrio de la misma). En los siguientes cuadros se muestra la demanda de cargas sobre cada uno de los dispositivos utilizados como parte del sistema de protección sísmica, incluyendo las capacidades de carga y deformación, para el Terremoto de Cinchona. Para los otros dos terremotos, los resultados se muestran en el Apéndice C.6.

**Cuadro 11.** Demanda en los LRB producto del Terremoto de Cinchona.

| No. de LRB | Capacidad a compresión (KN) | Compresión máxima (KN) | ¿Cumple por compresión? | Capacidad máxima de desplazamiento horizontal (mm) | Desplazamiento horizontal máximo (mm) | ¿Cumple por desplazamiento? | Capacidad a tensión (KN) | Tensión máxima (KN) | ¿Cumple por tensión? |
|------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|--|---------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------|
| K3         | 2,76,E+04                   | 6,12,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,76,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 6,12,E+03           | No                   |
| K4         | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,80,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K5         | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,84,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K6         | 2,76,E+04                   | 5,49,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,89,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 5,49,E+03           | No                   |
| K7         | 2,76,E+04                   | 2,20,E+04              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,77,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,20,E+04           | No                   |
| K8         | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,81,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K9         | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,85,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K10        | 2,76,E+04                   | 2,47,E+04              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,90,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,47,E+04           | No                   |
| K11        | 2,76,E+04                   | 2,03,E+04              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,78,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,03,E+04           | No                   |
| K12        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,82,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K13        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,86,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K14        | 2,76,E+04                   | 2,26,E+04              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,91,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,26,E+04           | No                   |
| K15        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,79,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K16        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,83,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K17        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,87,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K18        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,92,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K19        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,81,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K23        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,89,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K24        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,85,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K25        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,94,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K26        | 2,76,E+04                   | 2,77,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,82,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,77,E+03           | No                   |
| K27        | 2,76,E+04                   | 7,62,E+02              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,86,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 7,62,E+02           | No                   |
| K28        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,90,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K29        | 2,76,E+04                   | 2,79,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,95,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,79,E+03           | No                   |
| K30        | 2,76,E+04                   | 5,15,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,91,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 5,15,E+03           | No                   |
| K31        | 2,76,E+04                   | 7,24,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,77,E+02                             | Sí                          | 0,00,E+00                | 7,24,E+03           | No                   |

Como se observa del cuadro anterior, ningún LRB excedió sus capacidades de carga axial ni de desplazamiento horizontal pero sí de tensión. Estos dispositivos están diseñados para resistir cargas de compresión únicamente, no de tensión. Por lo tanto,

queda como recomendación a proyectos futuros el diseño de un mecanismo capaz de tomar las tensiones de los LRB pero sin afectar la rigidez global de la estructura; es decir, que sólo funcione para tomar dicha carga pero que no interfiera con el comportamiento de la estructura. Además, como se comentó en el capítulo anterior, se decidió utilizar sólo un tipo de LRB con una rigidez efectiva de 5,0 KN/mm, definida como la mínima necesaria para que los 26 LRB fueran capaces de garantizar la estabilidad de la estructura.

Debido a esto, varios LRB tienen grandes diferencias entre la capacidad y la demanda de carga axial. En cuanto a desplazamientos, la totalidad de LRB tiene más capacidad que la demanda provocada por los tres terremotos, pero la rigidez en la base del sistema de aislamiento no permitió desplazamientos mayores, reduciendo los beneficios de los LRB en el edificio estudiado.

**Cuadro 12.** Demanda en los amortiguadores viscosos producto del Terremoto de Cinchona.

| No. de amortiguador viscoso | Capacidad axial (KN) | Carga axial máxima (KN) | ¿Cumple por carga axial | Capacidad máxima de desplazamiento axial (mm) | Desplazamiento axial máximo (mm) | ¿Cumple por desplazamiento? |
|-----------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|---|----------------------------------|-----------------------------|
| K33                         | 2,00,E+03            | 3,33,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 9,37,E+00                        | Sí                          |
| K36                         | 2,00,E+03            | 3,80,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,13,E+01                        | Sí                          |
| K39                         | 2,00,E+03            | 4,61,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,35,E+01                        | Sí                          |
| K44                         | 2,00,E+03            | 3,79,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,24,E+01                        | Sí                          |
| K47                         | 2,00,E+03            | 4,78,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,44,E+01                        | Sí                          |
| K49                         | 2,00,E+03            | 7,08,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,39,E+01                        | Sí                          |
| K53                         | 2,00,E+03            | 7,25,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,46,E+01                        | Sí                          |
| K55                         | 2,00,E+03            | 7,43,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,52,E+01                        | Sí                          |
| K32                         | 2,00,E+03            | 3,00,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 7,17,E+00                        | Sí                          |
| K35                         | 2,00,E+03            | 3,31,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 8,43,E+00                        | Sí                          |
| K38                         | 2,00,E+03            | 3,56,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 9,79,E+00                        | Sí                          |
| K41                         | 2,00,E+03            | 1,08,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 2,50,E+00                        | Sí                          |
| K43                         | 2,00,E+03            | 2,16,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 5,67,E+00                        | Sí                          |
| K46                         | 2,00,E+03            | 4,04,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,02,E+01                        | Sí                          |
| K48                         | 2,00,E+03            | 5,03,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 9,92,E+00                        | Sí                          |
| K51                         | 2,00,E+03            | 3,59,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 7,19,E+00                        | Sí                          |
| K52                         | 2,00,E+03            | 5,31,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,08,E+01                        | Sí                          |
| K54                         | 2,00,E+03            | 5,34,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,11,E+01                        | Sí                          |
| K1                          | 2,00,E+03            | 2,43,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 4,87,E+00                        | Sí                          |
| K2                          | 2,00,E+03            | 2,48,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 5,35,E+00                        | Sí                          |
| K20                         | 2,00,E+03            | 2,13,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 4,14,E+00                        | Sí                          |
| K21                         | 2,00,E+03            | 2,04,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 4,11,E+00                        | Sí                          |
| K22                         | 2,00,E+03            | 2,19,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 4,44,E+00                        | Sí                          |
| K34                         | 2,00,E+03            | 2,37,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 5,10,E+00                        | Sí                          |
| K37                         | 2,00,E+03            | 2,66,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 6,00,E+00                        | Sí                          |
| K40                         | 2,00,E+03            | 3,15,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 7,68,E+00                        | Sí                          |
| K42                         | 2,00,E+03            | 2,33,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 5,35,E+00                        | Sí                          |
| K45                         | 2,00,E+03            | 2,75,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 6,13,E+00                        | Sí                          |

En cuanto a los amortiguadores viscosos, como se mostró en el cuadro anterior, la totalidad cumple por demanda de carga axial y de desplazamiento axial. Sucede lo mismo que con los LRB, la rigidez en la estructura en los niveles de protección sísmica

es tal que limita los desplazamientos e inhibe a los dispositivos de protección sísmica de llegar a su máxima capacidad de amortiguamiento.

Finalmente, como se muestra en el Apéndice C.7, los LRB deberían de tener una capacidad mínima a desplazamiento máximo de 627,6 mm. En este caso, tienen una capacidad de 860,0 mm, por lo que se cumple con las disposiciones mínimas de la ASCE 7-10.

El resto de parámetros de revisión, como desplazamientos mínimos ante sismos de diseño y restricciones de cortante, no se calcularon porque dichos parámetros no vienen presentes en el manual del fabricante que se utilizó en esta investigación (Anexo A). Tampoco se procede a la revisión de las fuerzas mínimas de diseño (análisis en este caso) ya que dependen de un factor de escala y, como los resultados en esta investigación no son reales puesto que no se definieron las propiedades inelásticas del concreto, no es posible hacerlo.

## 7 Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

En los dos capítulos anteriores de la presente investigación se presentaron los resultados principales de este trabajo. Con base en esto, se presentan las principales conclusiones del proyecto.

1. El aislamiento sísmico con LRB en la base del edificio Sabana Real no fue suficiente para observar las ventajas teóricas de la protección sísmica. A pesar de que aumentaron el período de la superestructura, como lo deben hacer, no lograron reducir, en gran manera, la energía sísmica que entra en el sistema estructural, por lo que los elementos estructurales siguen experimentando altos niveles de carga y de aceleraciones. De esta manera, se concluye que el aislamiento sísmico, como estrategia de control pasivo en estructuras, no se puede aplicar indistintamente a cualquier estructura, sino que requiere de un conocimiento completo del comportamiento dinámico de la misma, del sistema de protección sísmica y del diseño de la superestructura como un todo.
2. En estructuras aisladas sísmicamente y pesadas, resulta difícil alargar su período de vibración porque la rigidez axial necesaria en los LRB, para soportar el peso del edificio, aumenta el diámetro de los mismos y esto aumenta la rigidez lateral en el nivel de aislamiento sísmico. Como consecuencia, se limita el amortiguamiento por parte de los dispositivos porque no se les permite llegar al desplazamiento para el cual fueron diseñados.
3. El diseño de LRB y amortiguadores viscosos, como medidas de protección sísmica, debe ir de la mano con el diseño de la superestructura, para obtener el mejor comportamiento estructural.
4. El aislamiento sísmico no es conveniente en edificios con grandes irregularidades en planta. Estos pueden tener modos fundamentales de torsión con porcentajes grandes de masa participando, incurriendo en concentraciones de esfuerzos en los elementos estructurales que pueden ser difíciles de controlar, aun con sistemas de protección sísmica.

5. Una superestructura alta de concreto reforzado, y flexible, que cuenta con sistemas de aislamiento sísmico, no permite observar los verdaderos beneficios de utilizar LRB en la base de un edificio alto. Esta no logra tener un comportamiento rígido para controlar las derivas y las incursiones en el rango inelástico. De serlo, los LRB disminuirían la entrada de energía al sistema y, si se controlan los desplazamientos, también se controlan las aceleraciones y, por ende, las fuerzas internas en los elementos estructurales.
6. Estructuras irregulares y esbeltas, como es el caso del edificio Sabana Real, pueden tener problemas de tensión en los LRB y estos no están diseñados para tomar esas cargas.
7. Las normativas de diseño de edificios con aislamiento sísmico están elaboradas suponiendo un sistema de dos grados de libertad, donde la superestructura se comporta como un cuerpo rígido. Sin embargo, para edificios altos, como el estudiado en esta investigación, las ecuaciones de diseño no representan la realidad y dan como resultado parámetros de diseño sin sentido físico.
8. Los LRB no reducen el problema de torsión en planta. Dependiendo del acomodo y de sus rigideces, pueden llegar a aumentar la torsión en planta, aún más que sin aislamiento sísmico. Este fue el caso del edificio Sabana Real, aislado sísmicamente en esta investigación.
9. Los modos de vibración superiores en edificios altos tienen mayor presencia y, por lo tanto, provocan mayores aceleraciones en las estructuras. Al aislar la estructura sísmicamente, los modos traslacionales toman el mayor porcentaje de masa participativa y reducen el efecto de los modos superiores.
10. A pesar de que se observó que la distancia epicentral era una variable que afectaba la respuesta estructural del edificio, la muestra de tres terremotos no permite concluir definitivamente los parámetros de un sismo que afectan el comportamiento de un edificio alto de concreto reforzado. Lo único que se concluye es que los sismos con mayores distancias epicentrales sufren una atenuación de ondas sísmicas y alargamiento de sus períodos, introduciendo a la estructura menores aceleraciones pero entrando en resonancia con los

períodos de vibración altos, por lo que afectan más a estructuras relativamente más altas.

11. El método de escalamiento de acelerogramas utilizado, a pesar de ser el más adoptado por profesionales alrededor del mundo, en ausencia de señales sísmicas de período largo en el registro original, agrega al acelerograma onduletas de períodos largos para lograr llegar a la demanda del CSCR-10/14 en períodos altos, lo cual hace que el registro sísmico sintético no represente las aceleraciones reales a las cuales se somete el edificio.

## **7.2 Recomendaciones**

Como aporte a futuras investigaciones, se propone lo siguiente:

1. Estudiar la dinámica y respuesta estructural de edificios altos de concreto reforzado con amortiguadores viscosos, únicamente, u otra técnica de protección sísmica, para determinar si pueden llegar a ser más beneficiosos que los LRB.
2. Diseñar un mecanismo capaz de tomar las tensiones en los LRB colocados en la base de edificios con problemas de esbeltez, con el fin de solventar la debilidad del sistema de LRB de ser incapaces de resistir tensiones. Estos mecanismos no deben alterar la rigidez de la estructura para no reducir uno de los beneficios más grandes de los LRB: el aumento en la flexibilidad de la base y, por lo tanto, del período fundamental de la estructura, capaz de reducir las aceleraciones dentro de la misma.
3. Definir las propiedades inelásticas del concreto para llevar a cabo un análisis no-lineal de respuesta en el tiempo de una estructura aislada sísmicamente y así poder realizar un análisis cuantitativo para concluir, con valores numéricos, los beneficios del aislamiento sísmico en edificios altos de concreto reforzado.
4. Realizar un análisis no-lineal de respuesta en el tiempo con una mayor muestra de terremotos para poder determinar cuáles variables de estos llegan a afectar más a los edificios altos de concreto reforzado, con y sin sistemas de protección sísmica.



5. Realizar un análisis de costos de aislar sísmicamente un edificio de concreto reforzado, con problemas de esbeltez e irregularidad en planta, para determinar si dicha tecnología de protección sísmica resulta conveniente, a pesar de no obtener la respuesta estructural esperada.
6. Realizar un análisis de costos comparativo para un edificio de baja altura, con y sin LRB, para determinar los beneficios de dicha medida de protección sísmica en estructuras de ese tipo.

## 8 Fuentes de consulta

- Alhan, C., Gavin, H. (2004). Parametric Study of Linear and Non-Linear Passively Damped Seismic Isolation Systems for Buildings. Duke University, Estados Unidos.
- American Concrete Institute (ACI). (2014). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural, ACI 318S-14. Farmington Hills, Michigan.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2010). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE 7-10. Reston, Virginia.
- Arnold, C. (s.f.). Earthquake Effects on Buildings. Federal Emergency Management Agency, Estados Unidos.
- Arya, A. (1994). Concepts and Techniques for Seismic Base-Isolation of Structures. Earthquake Engineering, Tenth World Conference. Balkema, Rotterdam.
- Boroschek, R., Retamales, R., Aguilar, A. (2012). Seismic Response of Isolated Structures Subjected to Mw 8,8 Chile Earthquake of February 27, 2010. (Paper No. M-2). The International Symposium for CISMID 25<sup>th</sup> Anniversary.
- Boroschek, R., Retamales, R., Lafontaine, M. (2017). Seismic Isolation of The Ñuñoa Capital Building, The Tallest Base Isolated Building in The Americas. 16<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, Chile.
- Bratosin, D. (2004). Non-linear Effects in Seismic Base Isolation. Proceedings of the Romanian Academy. Romania. Vol. 5, No. 3, 2004, pp 297-309.
- Brenes, C. (2001). Factibilidad Económica de la Utilización de un Sistema de Aislamiento Sísmico en la Base de Edificios. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería en Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Carmona, C. (s.f.). Terremoto de Cinchona reveló errores constructivos. Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, San José, Costa Rica.
- Chang, D. (2015). Estudio de Relaciones Momento-Curvatura en Secciones de Concreto Armado y Concreto Preesforzado Sometidas a Flexión. Proyecto de graduación para

- optar por el grado de Magister Scientiae en Ingeniería Civil, Escuela Posgrado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Chopra, A. (2012). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. (4th ed.). Prentice Hall, New Jersey, United States, p. 514.
- Comisión del Código Sísmico de Costa Rica (CCSCR). (2010). Comentarios al Código Sísmico de Costa Rica 2010. Editorial Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Comisión del Código Sísmico de Costa Rica (CCSCR). (2014). Código Sísmico de Costa Rica 2010 (rev 2014), CSCR-10/14. Editorial Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.
- Consejo de Edificios Altos y Hábitat Urbano (CTBUH). (2017). Tall Buildings in Costa Rica. Obtenido de: <http://regions.ctbuh.org/costa-rica> [consultado en mayo, 2017].
- Cubillo, R. (2015). Comparación de las Propiedades Elásticas Dinámicas para Edificios Tipo Marco con Base Fija y Base Aislada: Caso Concreto Reforzado. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Department of Natural Resources, Missouri (DNR). (2012). Effects of Shaking Caused by Earthquakes – New Madrid Earthquakes Bicentennial. Obtenido de: <https://dnr.mo.gov/blogs/missouri-geology/effects-of-shaking-caused-by-earthquakes-new-madrid-earthquakes-bicentennial/> [consultado en enero, 2018].
- Dynamic Isolation Systems (DIS). (2007). Seismic Isolation for Buildings and Bridges. Obtenido de: [http://www.dis-inc.com/pdf\\_files/DIS\\_BASE\\_ISO.pdf](http://www.dis-inc.com/pdf_files/DIS_BASE_ISO.pdf) [consultado el 8 febrero, 2018].
- Elgamal, A., Fraser, M. (2004). Seismic Isolation & Energy Dissipation Systems. Department of Structural Engineering, University of California San Diego.
- Fernández, C. (1997). Comportamiento de Estructuras con Aislamiento Sísmico en su Base Considerando el Acoplamiento Torsional. Proyecto de graduación para optar

por el grado de Magister Scientiae en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería en Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

González, A., Zamora, L. (2013). Riesgo Sísmico y Continuidad de Operaciones: Diseño y Construcción de un Centro de Datos con Aislamiento de Base en Costa Rica. Congreso Estructuras 2013. San José, Costa Rica.

Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa (ILCE). (s.f.). Ondas Sísmicas. Obtenido de: [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/34/html/sec\\_8.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/34/html/sec_8.html) [consultado en diciembre, 2017].

Instituto Nacional de Normalización (INN). (2013). Análisis y Diseño de Edificios con Aislación Sísmica, NCh2745-13. Chile.

Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES). (s.f.). Vulcanismo Mundial. Obtenido de: <http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/VULCANISMO%20MUNDIAL.pdf> [consultado en noviembre, 2017].

Insuma S.A. (2006). Estudio Geotécnico: Proyecto VIP Otto Wood. San José, Costa Rica. ITT Infrastructure. (2007). Products. Obtenido de: [http://www.itt-infrastructure.com/CorporateSite/media/itt/Resources/TechnicalData/Seismic\\_Products\\_Catalog.pdf?ext=.pdf](http://www.itt-infrastructure.com/CorporateSite/media/itt/Resources/TechnicalData/Seismic_Products_Catalog.pdf?ext=.pdf) [consultado en abril, 2018].

Kawamura, S., Sugisaki, R., Ogura, K., Maezawa, S., Tanaka, S., Yajima, A. (2000). Seismic Isolation Retrofit in Japan. 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand.

Kehoe, B., Rattalla, M. (2000). Considerations of Vertical Acceleration on Structural Response. 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand.

Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS). (2004). Descarga de registros: 2004-11-20-Damas. Obtenido de: <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=Descargar> [consultado en diciembre, 2017].

Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS). (2009a). Descarga de registros: 2009-01-08-Cinchona. Obtenido de: <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=Descargar> [consultado en diciembre, 2017].

- Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS). (2009b). Terremoto de Vara Blanca del 08 de enero del 2009. Obtenido de: <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=71> [consultado en enero, 2018].
- Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS). (2011a). Amplificación de Ondas. Obtenido de: <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=14> [consultado en setiembre, 2017].
- Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS). (2011b). Magnitud e Intensidad. Obtenido de: <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=11> [consultado en setiembre, 2017].
- Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS). (2011c). Marco Tectónico de Costa Rica. Obtenido de: <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=4> [consultado en setiembre, 2017].
- Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS). (2011d). Tipos de Ondas. Obtenido de: <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=7> [consultado en octubre, 2017].
- Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS). (2012a). Descarga de registros: 2012-09-05-Sámara. Obtenido de: <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=Descargar> [consultado en agosto, 2017].
- Laboratorio de Ingeniería Sísmica (LIS). (2012b). Registro Acelerográfico de Nosara. Obtenido de: <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=727> [consultado en diciembre, 2017].
- Linkimer, L., Mora, M., Vargas, A., Soto, G., Barquero, R., Rojas, W., Taylor, W., Taylor, M.. (2013). El Terremoto de Sámara (Costa Rica) del 5 de setiembre del 2012 (Mw 7,6). *Revista Geológica de América Central*, No. 49.
- Linkimer, L., Porras, J., Araya, M., Rojas, W., Taylor, M., Barquero, M.. (2015). Sismicidad en Costa Rica durante el 2015. *Revista Geológica de América Central*, No. 54.
- Mander, J., Priestley, M., Park, R. (1988a). Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 114(8), 1827-1849.
- Mander, J., Priestley, M., Park, R. (1988b). Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 114(8), 1804-1826.
- Méndez, C., Spuler, T., Moor, G., Stirnimann, F. (2012). Design, Full-scale Testing and CE Certification of Anti-seismic Devices According to the New European Norm EN

- 15129: Elastomeric Isolators. 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Lisbon, Portugal.
- Mieles, Y., Hernández, J. (s.f.). Comportamiento de Secciones de Hormigón Sometidas a Flexión Reforzadas con Barras de Acero o PRF. Universidad Técnica de Manabí. Ecuador.
- Nakagawa, K., Shimazaki, D., Yoshida, S., Okada, K. (2015). Application of Seismic Isolation Systems in Japanese High-Rise Buildings. Council on Tall Buildings and Urban Habitat.
- National Programme on Technology Enhanced Learning (NPTEL). (2014). Energy Dissipated by Damping. Obtenido de: <http://nptel.ac.in/courses/101105022/m8l14.pdf> [consultado en junio, 2018].
- Patil, R., Rajakumara, H.N. (2016). Effect of Vertical Ground Acceleration on Buildings. International Journal of Recent Advances in Engineering & Technology (IJRAET). Vol. 4.
- Plevris, V., Kremmyda, G., Fahjan, Y. (2017). Selection and Scaling Time History Records for Performance-Based Design. In Performance-Based Seismic Design of Concrete Structures and Infrastructures (pp 1-35). Hershey, Pennsylvania: IGI Global.
- Pontificia Universidad Católica de Chile (PUCCh). (s.f.). Aislación Sísmica y Disipación. Departamento de Estructuras y Geotecnia, Chile.
- Priestley, M.J.N. (2003). Myths and Fallacies in Earthquake Engineering, Revisited. The Ninth Mallet Milne Lecture. Pavia, Italy.
- Proycon. (2008). Sabana Real. Obtenido de: <http://proycon.com/portfolio/sabana-real/> [consultado en diciembre, 2017].
- Red Sismológica Nacional (RSN). (2004). Terremoto de Damas (Quepos) del 20 de noviembre del 2004. Red Sismológica Nacional UCR-ICE, San José, Costa Rica.
- Red Sismológica Nacional (RSN). (s.f.a). El Terremoto de Cinchona del jueves 8 de enero de 2009. Red Sismológica Nacional UCR-ICE, San José, Costa Rica.
- Red Sismológica Nacional (RSN). (s.f.b). Tabla Mercalli Modificada. Obtenido de: [http://www.rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Educativo/escala\\_mercalli\\_rsn.pdf](http://www.rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Educativo/escala_mercalli_rsn.pdf) [consultado en diciembre, 2017].

- Robinson, W. (1998). Passive Control of Structures, the New Zealand Experience. ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 375, Vol. 35, No. 4, pp 63-75.
- Rodríguez, V., Miramontes, D. (2001). Identificación del Amortiguamiento Histerético Efectivo de Algunos Modelos Cíclicos en Variables Generalizadas. Universidad Autónoma de Zacatecas. Zacatecas, México.
- Salas, R. (1999). Análisis de la Amplificación Dinámica en Suelos del Área Metropolitana de San José Mediante Modelos de Perfiles de Suelo. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería en Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Schmidt, V., Moya, A., Climent, A., Rojas, W., Boschini, I. (2005). Microzonificación Sísmica de San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Starkey, S., Knorr, B. (1998). Base Isolation Bearings Construction Report. (OR-EF-91-02). Oregon Department of Transportation and Federal Highway Administration.
- Symans, M. (2004). Seismic Protective Systems: Seismic Isolation. Federal Emergency Management Agency.
- Tarback, E., Lutgens, F., Tasa, D. (2005). Ciencias de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física (pp 307-337). Madrid, España: Pearson Educación S.A.
- Taylor Devices. (2016). Fluid Viscous Damping as an Alternative to Base Isolation. Obtenido de: <http://www.taylordevices.com/fluidviscousdamping.html> [consultado en abril, 2018].
- Tikate, P. (2015). Seismic Isolation: Earthquake Protection of Buildings. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, Issue 2, Vol 2.
- Torunbalci, N. (2004). Seismic Isolation and Energy Dissipating Systems in Earthquake Resistant Design. (Paper No. 3273). 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering. Canada.
- United States Geological Survey (USGS). (2014a). M 6,1 – Costa Rica, 2009-01-08 19:21:35 UTC. Obtenido de: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000gscg#executive> [consultado en octubre, 2017].

United States Geological Survey (USGS). (2014b). M 6,4 – Costa Rica, 2004-11-20 08:07:22 UTC. Obtenido de:

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000d8tf#executive>

[consultado en diciembre, 2017].

United States Geological Survey (USGS). (2014c). M 7,6 – Costa Rica, 2012-09-05 14:42:07 UTC. Obtenido de:

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000jrsw#executive>

[consultado en octubre, 2017].

United States Geological Survey (USGS). (2017). M 6,5 – 18 km W of Parrita, Costa Rica, 2017-11-13 02:28:23 UTC. Obtenido de:

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000bmhe#executive>

[consultado en enero, 2018].

University of Waikato. (2007). Seismic Waves. Obtenido de:

<https://www.sciencelearn.org.nz/resources/340-seismic-waves> [consultado en

diciembre, 2017].



## 9 Apéndices

### 9.1 Apéndice A: Análisis de momento-curvatura de los muros

#### 9.1.1 Apéndice A.1: Diagramas de momento-curvatura

**Cuadro 13.** Parámetros de entrada para calcular la capacidad a flexión de cada tipo de muro.

| Nivel | Sección | $f'_c$ (MPa) | $\varepsilon_y$ (1/m) | E (Mpa)   | $A_{conf}$ (cm <sup>2</sup> ) | $S_T$ (cm) | $\delta_x$ | $\delta_y$ | $\delta_v$ | Cant. de varillas long. | $S_L$ (cm) | $f_y$ (Mpa) |
|-------|---------|--------------|-----------------------|-----------|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|-------------------------|------------|-------------|
| 1     | MC1     | 2,75,E+01    | 1,11,E-03             | 2,48,E+04 | 4,66,E+03                     | 10,00      | 1,06,E-02  | 1,12,E-02  | 2,17,E-02  | 20,00                   | 22,00      | 2,75,E+02   |
| 1     | MC2     | 2,75,E+01    | 1,11,E-03             | 2,48,E+04 | 4,66,E+03                     | 10,00      | 1,06,E-02  | 1,12,E-02  | 2,20,E-02  | 20,00                   | 22,00      | 2,75,E+02   |
| 1     | MC3     | 2,75,E+01    | 1,11,E-03             | 2,48,E+04 | 1,03,E+04                     | 10,00      | 1,10,E-02  | 1,10,E-02  | 2,48,E-02  | 38,00                   | 22,00      | 2,75,E+02   |
| 1     | MC4     | 2,75,E+01    | 1,11,E-03             | 2,48,E+04 | 4,66,E+03                     | 10,00      | 1,10,E-02  | 1,10,E-02  | 2,20,E-02  | 20,00                   | 22,00      | 2,75,E+02   |
| 1     | MC4a    | 2,75,E+01    | 1,11,E-03             | 2,48,E+04 | 3,36,E+03                     | 10,00      | 1,10,E-02  | 1,10,E-02  | 2,20,E-02  | 18,00                   | 22,00      | 2,75,E+02   |
| 1     | MC5     | 2,75,E+01    | 1,11,E-03             | 2,48,E+04 | 4,66,E+03                     | 10,00      | 1,10,E-02  | 1,10,E-02  | 2,20,E-02  | 26,00                   | 16,00      | 2,75,E+02   |
| 1     | MC7     | 6,87,E+01    | 1,88,E-03             | 3,65,E+04 | 7,10,E+03                     | 10,00      | 1,65,E-02  | 1,33,E-02  | 3,00,E-02  | 38,00                   | 16,00      | 4,12,E+02   |
| 1     | MC8     | 6,87,E+01    | 1,88,E-03             | 3,65,E+04 | 4,66,E+03                     | 10,00      | 1,10,E-02  | 1,10,E-02  | 2,97,E-02  | 26,00                   | 16,00      | 4,12,E+02   |
| 1     | MC9     | 6,87,E+01    | 1,88,E-03             | 3,65,E+04 | 8,42,E+03                     | 10,00      | 1,28,E-02  | 1,10,E-02  | 3,00,E-02  | 44,00                   | 16,00      | 4,12,E+02   |
| 1     | MC10    | 6,87,E+01    | 1,88,E-03             | 3,65,E+04 | 6,26,E+03                     | 10,00      | 1,26,E-02  | 1,10,E-02  | 3,00,E-02  | 34,00                   | 16,00      | 4,12,E+02   |
| 1     | MC11    | 6,87,E+01    | 1,88,E-03             | 3,65,E+04 | 4,66,E+03                     | 10,00      | 1,10,E-02  | 1,10,E-02  | 3,00,E-02  | 26,00                   | 16,00      | 4,12,E+02   |
| 1     | MC12    | 6,87,E+01    | 1,88,E-03             | 3,65,E+04 | 2,18,E+04                     | 10,00      | 1,33,E-02  | 1,38,E-02  | 3,00,E-02  | 112,00                  | 18,00      | 4,12,E+02   |
| 4     | MC7     | 4,12,E+01    | 1,36,E-03             | 3,03,E+04 | 7,10,E+03                     | 10,00      | 1,65,E-02  | 1,33,E-02  | 3,00,E-02  | 38,00                   | 16,00      | 4,12,E+02   |
| 4     | MC8     | 4,12,E+01    | 1,36,E-03             | 3,03,E+04 | 4,66,E+03                     | 10,00      | 1,10,E-02  | 1,10,E-02  | 3,00,E-02  | 26,00                   | 16,00      | 4,12,E+02   |
| 4     | MC9     | 4,12,E+01    | 1,36,E-03             | 3,03,E+04 | 8,42,E+03                     | 10,00      | 1,28,E-02  | 1,10,E-02  | 3,00,E-02  | 44,00                   | 16,00      | 4,12,E+02   |
| 4     | MC10    | 4,12,E+01    | 1,36,E-03             | 3,03,E+04 | 6,26,E+03                     | 10,00      | 1,26,E-02  | 1,10,E-02  | 3,00,E-02  | 34,00                   | 16,00      | 4,12,E+02   |
| 4     | MC11    | 4,12,E+01    | 1,36,E-03             | 3,03,E+04 | 4,66,E+03                     | 10,00      | 1,10,E-02  | 1,10,E-02  | 3,00,E-02  | 26,00                   | 16,00      | 4,12,E+02   |
| 4     | MC12    | 4,12,E+01    | 1,36,E-03             | 3,03,E+04 | 2,18,E+04                     | 10,00      | 1,30,E-02  | 1,53,E-02  | 3,00,E-02  | 112,00                  | 18,00      | 4,12,E+02   |

En el cuadro anterior,  $f'_c$  es la resistencia a la compresión simple del concreto,  $\varepsilon_y$  la deformación unitaria de fluencia de flexión, E el módulo de elasticidad del concreto,  $A_{conf}$  el área de concreto confinada de la sección transversal del muro,  $S_T$  la separación de amarres transversales,  $\delta_x$  la densidad de acero en el eje X (eje débil del muro),  $\delta_y$  la densidad de acero en el eje Y del muro (eje fuerte del muro),  $\delta_v$  la densidad de acero volumétrica,  $S_L$  la separación promedio de barras longitudinales en el muro y  $f_y$  la resistencia a fluencia del acero de los amarres.

**Cuadro 14.** Resultados de los diagramas de momento-curvatura de los muros del primer nivel.

| No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                             |  |                        | Eje fuerte                                    |                             |  |                        |
|-------------|-------|---|-----------------------------|--|------------------------|---|-----------------------------|--|------------------------|
|             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Curvatura de fluencia (1/m) | Mínima capacidad última en flexión (KNm) | Curvatura última (1/m) | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Curvatura de fluencia (1/m) | Mínima capacidad última en flexión (KNm) | Curvatura última (1/m) |
| 1           | 1     | 5,80,E+02                                     | 1,33,E-02                   | 5,22,E+02                                | 1,34,E-01              | 4,14,E+03                                     | 2,05,E-03                   | 4,35,E+03                                | 2,43,E-02              |
| 2           | 1     | 7,12,E+02                                     | 1,41,E-02                   | 6,48,E+02                                | 1,18,E-01              | 5,06,E+03                                     | 2,10,E-03                   | 5,28,E+03                                | 1,95,E-02              |
| 3           | 1     | 7,15,E+02                                     | 1,41,E-02                   | 6,52,E+02                                | 1,18,E-01              | 5,09,E+03                                     | 2,11,E-03                   | 5,31,E+03                                | 1,95,E-02              |
| 4           | 1     | 6,03,E+02                                     | 1,34,E-02                   | 5,43,E+02                                | 1,32,E-01              | 4,29,E+03                                     | 2,06,E-03                   | 4,51,E+03                                | 2,34,E-02              |
| 6           | 1     | 9,50,E+02                                     | 1,50,E-02                   | 8,01,E+02                                | 9,73,E-02              | 6,40,E+03                                     | 2,20,E-03                   | 6,43,E+03                                | 1,46,E-02              |
| 7           | 1     | 1,03,E+03                                     | 1,54,E-02                   | 8,77,E+02                                | 8,88,E-02              | 6,95,E+03                                     | 2,24,E-03                   | 6,94,E+03                                | 1,32,E-02              |
| 9           | 1     | 1,57,E+03                                     | 1,34,E-02                   | 1,45,E+03                                | 5,27,E-02              | 1,04,E+04                                     | 2,02,E-03                   | 1,08,E+04                                | 7,88,E-03              |
| 10          | 1     | 1,55,E+03                                     | 1,40,E-02                   | 1,41,E+03                                | 5,53,E-02              | 1,03,E+04                                     | 2,12,E-03                   | 1,05,E+04                                | 8,27,E-03              |
| 11          | 1     | 7,59,E+03                                     | 3,25,E-03                   | 7,80,E+03                                | 2,89,E-02              | 1,58,E+04                                     | 2,25,E-03                   | 1,60,E+04                                | 1,99,E-02              |
| 12          | 1     | 1,56,E+03                                     | 1,37,E-02                   | 1,42,E+03                                | 5,44,E-02              | 1,03,E+04                                     | 2,08,E-03                   | 1,06,E+04                                | 8,13,E-03              |
| 13          | 1     | 4,88,E+03                                     | 3,05,E-03                   | 4,85,E+03                                | 5,68,E-02              | 1,56,E+04                                     | 1,43,E-03                   | 1,58,E+04                                | 2,90,E-02              |
| 14          | 1     | 1,66,E+03                                     | 4,17,E-03                   | 1,55,E+03                                | 8,77,E-02              | 4,97,E+03                                     | 1,80,E-03                   | 5,06,E+03                                | 4,38,E-02              |
| 15          | 1     | 4,47,E+02                                     | 1,22,E-02                   | 3,82,E+02                                | 1,23,E-01              | 3,04,E+03                                     | 1,85,E-03                   | 3,10,E+03                                | 2,07,E-02              |
| 16          | 1     | 7,28,E+02                                     | 1,41,E-02                   | 6,64,E+02                                | 1,16,E-01              | 5,18,E+03                                     | 2,11,E-03                   | 5,40,E+03                                | 1,91,E-02              |
| 17          | 1     | 7,11,E+02                                     | 1,41,E-02                   | 6,47,E+02                                | 1,18,E-01              | 5,05,E+03                                     | 2,10,E-03                   | 5,28,E+03                                | 1,95,E-02              |
| 18          | 1     | 4,23,E+02                                     | 1,28,E-02                   | 3,73,E+02                                | 1,13,E-01              | 2,09,E+03                                     | 2,80,E-03                   | 2,12,E+03                                | 2,17,E-02              |
| 19          | 1     | 3,90,E+02                                     | 1,28,E-02                   | 3,35,E+02                                | 1,40,E-01              | 2,64,E+03                                     | 1,88,E-03                   | 2,74,E+03                                | 2,41,E-02              |
| 20          | 1     | 5,35,E+02                                     | 1,43,E-02                   | 4,59,E+02                                | 1,13,E-01              | 3,59,E+03                                     | 2,01,E-03                   | 3,65,E+03                                | 1,73,E-02              |
| 21          | 1     | 3,01,E+02                                     | 9,99,E-03                   | 2,39,E+02                                | 1,36,E-01              | 1,92,E+03                                     | 1,32,E-03                   | 1,94,E+03                                | 2,57,E-02              |
| 22          | 1     | 2,74,E+03                                     | 2,47,E-03                   | 2,95,E+03                                | 2,54,E-02              | 4,91,E+03                                     | 1,27,E-03                   | 5,37,E+03                                | 3,23,E-02              |
| 5           | 1     | 3,15,E+04                                     | 2,28,E-03                   | 3,31,E+04                                | 9,73,E-03              | 8,06,E+04                                     | 5,67,E-04                   | 8,45,E+04                                | 1,53,E-02              |
| 8           | 1     | 3,52,E+04                                     | 2,35,E-03                   | 3,62,E+04                                | 8,72,E-03              | 9,03,E+04                                     | 5,86,E-04                   | 9,41,E+04                                | 1,54,E-02              |

**Cuadro 15.** Resultados de los diagramas de momento-curvatura de los muros del cuarto nivel.

| No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                             |  |                        | Eje fuerte                                    |                             |  |                        |
|-------------|-------|---|-----------------------------|--|------------------------|---|-----------------------------|--|------------------------|
|             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Curvatura de fluencia (1/m) | Mínima capacidad última en flexión (KNm) | Curvatura última (1/m) | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Curvatura de fluencia (1/m) | Mínima capacidad última en flexión (KNm) | Curvatura última (1/m) |
| 6           | 4     | 8,37,E+02                                     | 1,59,E-02                   | 7,03,E+02                                | 9,31,E-02              | 5,35,E+03                                     | 2,55,E-03                   | 5,38,E+03                                | 1,25,E-02              |
| 7           | 4     | 9,15,E+02                                     | 1,49,E-02                   | 7,67,E+02                                | 7,72,E-02              | 5,69,E+03                                     | 2,10,E-03                   | 5,78,E+03                                | 1,13,E-02              |
| 9           | 4     | 9,93,E+02                                     | 1,52,E-02                   | 8,84,E+02                                | 1,08,E-01              | 6,66,E+03                                     | 2,29,E-03                   | 6,98,E+03                                | 1,50,E-02              |
| 10          | 4     | 1,40,E+03                                     | 1,28,E-02                   | 1,32,E+03                                | 6,36,E-02              | 8,97,E+03                                     | 1,81,E-03                   | 9,77,E+03                                | 9,46,E-03              |
| 11          | 4     | 1,74,E+03                                     | 2,99,E-03                   | 1,79,E+03                                | 6,67,E-02              | 3,32,E+03                                     | 1,85,E-03                   | 3,50,E+03                                | 4,36,E-02              |
| 12          | 4     | 1,39,E+03                                     | 1,30,E-02                   | 1,30,E+03                                | 3,49,E-02              | 8,92,E+03                                     | 1,84,E-03                   | 9,67,E+03                                | 9,62,E-03              |
| 13          | 4     | 4,11,E+03                                     | 3,18,E-03                   | 4,07,E+03                                | 5,08,E-02              | 1,29,E+04                                     | 1,49,E-03                   | 1,30,E+04                                | 2,54,E-02              |
| 14          | 4     | 1,31,E+03                                     | 4,46,E-03                   | 1,23,E+03                                | 9,35,E-02              | 3,84,E+03                                     | 1,84,E-03                   | 3,98,E+03                                | 4,37,E-02              |
| 5           | 4     | 1,87,E+04                                     | 2,19,E-03                   | 1,95,E+04                                | 1,14,E-02              | 4,66,E+04                                     | 5,42,E-04                   | 4,92,E+04                                | 1,52,E-02              |
| 8           | 4     | 2,19,E+04                                     | 2,18,E-03                   | 2,26,E+04                                | 9,57,E-03              | 5,56,E+04                                     | 5,65,E-04                   | 5,80,E+04                                | 1,53,E-02              |

## Ejemplo de un diagrama de momento-curvatura

A continuación se presenta el resumen proporcionado por XTRACT Cross Section Analysis, para calcular el diagrama de momento-curvatura del muro 5 en el nivel 1 y resistiendo cargas en su eje fuerte.

### XTRACT Analysis Report - Educational

Diego Eskenazi

For use only in an academic or research setting.

Section Name: MC12 Nivel 1

Loading Name: Muro 5 eje Y

Edificio Sabana Real

Analysis Type: Moment Curvature

Page \_\_ of \_\_

#### Section Details:

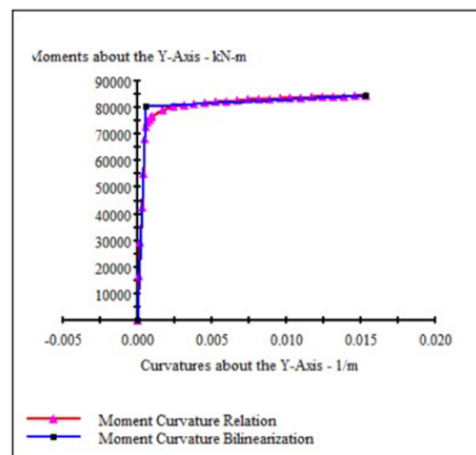
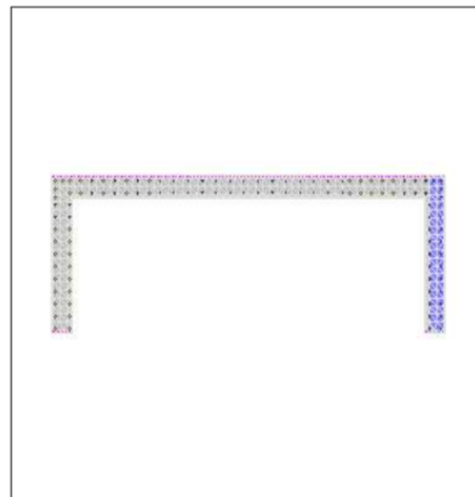
X Centroid: 275.1 cm  
 Y Centroid: 145.6 cm  
 Section Area: 26.70E+3 cm<sup>2</sup>

#### Loading Details:

Constant Load - P: 2163 kN  
 Incrementing Loads: Myy Only  
 Number of Points: 30  
 Analysis Strategy: Displacement Control

#### Analysis Results:

Failing Material: ACERO G60  
 Failure Strain: 80.00E-3 Tension  
 Curvature at Initial Load: -.1968E-12 1/m  
 Curvature at First Yield: .4802E-3 1/m  
 Ultimate Curvature: 15.29E-3 1/m  
 Moment at First Yield: 68.23E+3 kN-m  
 Ultimate Moment: 84.48E+3 kN-m  
 Centroid Strain at Yield: .7639E-3 Ten  
 Centroid Strain at Ultimate: 38.72E-3 Ten  
 N.A. at First Yield: 159.1 cm  
 N.A. at Ultimate: 253.2 cm  
 Energy per Length: 1238 kN  
 Effective Yield Curvature: .5671E-3 1/m  
 Effective Yield Moment: 80.57E+3 kN-m  
 Over Strength Factor: 1.049  
 EI Effective: 1.42E+11 N-m<sup>2</sup>  
 Yield EI Effective: 2.65E+8 N-m<sup>2</sup>  
 Bilinear Hardening Slope: .1868 %  
 Curvature Ductility: 26.96



**Figura 81.** Resumen del cálculo del diagrama de momento-curvatura del muro 5 del nivel 1, en el eje fuerte.

### 9.1.2 Apéndice A.2: Revisión preliminar de la incursión de los muros estudiados en el rango inelástico

**Cuadro 16.** Revisión de la incursión en el rango inelástico de los muros del primer nivel.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Sección | Carga axial mínima (KN) | Eje débil                                     |                                |                              |                        | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |
|-------------------------------------|-------------|-------|---------|-------------------------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|
|                                     |             |       |         |                         | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda |
| X                                   | 1           | 1     | MC05    | -7,17,E+02              | 5,80E+02                                      | 1,16,E+02                      | No                           | NA                     | 4,14E+03                                      | 7,91,E+03                      | Si                           | 1,9                    |
| X                                   | 2           | 1     | MC05    | -1,92,E+03              | 7,12E+02                                      | 1,14,E+02                      | No                           | NA                     | 5,06E+03                                      | 5,70,E+03                      | Si                           | 1,1                    |
| X                                   | 3           | 1     | MC05    | -2,00,E+03              | 7,15E+02                                      | 1,17,E+02                      | No                           | NA                     | 5,09E+03                                      | 5,68,E+03                      | Si                           | 1,1                    |
| X                                   | 4           | 1     | MC05    | -9,33,E+02              | 6,03E+02                                      | 1,32,E+02                      | No                           | NA                     | 4,29E+03                                      | 8,62,E+03                      | Si                           | 2,0                    |
| X                                   | 6           | 1     | MC11    | -4,79,E+03              | 9,50E+02                                      | 1,12,E+02                      | No                           | NA                     | 6,40E+03                                      | 6,76,E+03                      | Si                           | 1,1                    |
| X                                   | 7           | 1     | MC11    | -5,51,E+03              | 1,03E+03                                      | 1,12,E+02                      | No                           | NA                     | 6,95E+03                                      | 6,73,E+03                      | No                           | NA                     |
| X                                   | 9           | 1     | MC08    | -1,09,E+04              | 1,57E+03                                      | 9,92,E+01                      | No                           | NA                     | 1,04E+04                                      | 6,47,E+03                      | No                           | NA                     |
| X                                   | 10          | 1     | MC08    | -1,04,E+04              | 1,55E+03                                      | 1,15,E+02                      | No                           | NA                     | 1,03E+04                                      | 6,47,E+03                      | No                           | NA                     |
| X                                   | 11          | 1     | MC07    | -2,30,E+03              | 7,59E+03                                      | 8,03,E+03                      | Si                           | 1,1                    | 1,58E+04                                      | 1,37,E+04                      | No                           | NA                     |
| X                                   | 12          | 1     | MC08    | -1,03,E+04              | 1,56E+03                                      | 1,05,E+02                      | No                           | NA                     | 1,03E+04                                      | 6,12,E+03                      | No                           | NA                     |
| X                                   | 13          | 1     | MC09    | -1,29,E+04              | 4,88E+03                                      | 5,10,E+03                      | Si                           | 1,0                    | 1,56E+04                                      | 2,12,E+04                      | Si                           | 1,4                    |
| X                                   | 14          | 1     | MC10    | -3,14,E+03              | 1,66E+03                                      | 3,31,E+03                      | Si                           | 2,0                    | 4,97E+03                                      | 1,40,E+04                      | Si                           | 2,8                    |
| X                                   | 15          | 1     | MC4     | -8,51,E+02              | 4,47E+02                                      | 9,43,E+01                      | No                           | NA                     | 3,04E+03                                      | 6,58,E+03                      | Si                           | 2,2                    |
| X                                   | 16          | 1     | MC05    | -2,19,E+03              | 7,28E+02                                      | 1,01,E+02                      | No                           | NA                     | 5,18E+03                                      | 4,60,E+03                      | No                           | NA                     |
| X                                   | 17          | 1     | MC05    | -2,08,E+03              | 7,11E+02                                      | 1,00,E+02                      | No                           | NA                     | 5,05E+03                                      | 5,27,E+03                      | Si                           | 1,0                    |
| X                                   | 18          | 1     | MC4a    | -9,13,E+02              | 4,23E+02                                      | 7,66,E+01                      | No                           | NA                     | 2,09E+03                                      | 6,55,E+03                      | Si                           | 3,1                    |
| X                                   | 19          | 1     | MC1     | 3,32,E+01               | 3,90E+02                                      | 9,70,E+01                      | No                           | NA                     | 2,64E+03                                      | 9,16,E+03                      | Si                           | 3,5                    |
| X                                   | 20          | 1     | MC1     | -1,25,E+03              | 5,35E+02                                      | 5,40,E+01                      | No                           | NA                     | 3,59E+03                                      | 1,21,E+04                      | Si                           | 3,4                    |
| X                                   | 21          | 1     | MC2     | -9,75,E+02              | 3,01E+02                                      | 4,44,E+01                      | No                           | NA                     | 1,92E+03                                      | 9,27,E+03                      | Si                           | 4,8                    |
| X                                   | 22          | 1     | MC3     | -1,27,E+02              | 2,74E+03                                      | 9,96,E+01                      | No                           | NA                     | 4,91E+03                                      | 7,84,E+03                      | Si                           | 1,6                    |
| Y                                   | 5           | 1     | MC12    | -2,17,E+03              | 3,15E+04                                      | 3,00,E+04                      | No                           | NA                     | 8,06E+04                                      | 2,43,E+05                      | Si                           | 3,0                    |
| Y                                   | 8           | 1     | MC12    | -5,85,E+03              | 3,52E+04                                      | 3,19,E+04                      | No                           | NA                     | 9,03E+04                                      | 2,64,E+05                      | Si                           | 2,9                    |

**Cuadro 17.** Revisión de la incursión en el rango inelástico de los muros del cuarto nivel.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Sección | Carga axial mínima (KN) | Eje débil                                     |                                |                              |                        | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |
|-------------------------------------|-------------|-------|---------|-------------------------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|
|                                     |             |       |         |                         | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda |
| X                                   | 6           | 4     | MC11    | -3,64,E+03              | 8,37E+02                                      | 9,20,E+01                      | No                           | NA                     | 5,35E+03                                      | 5,61,E+03                      | Si                           | 1,1                    |
| X                                   | 7           | 4     | MC11    | -4,28,E+03              | 9,15E+02                                      | 9,22,E+01                      | No                           | NA                     | 5,69E+03                                      | 5,61,E+03                      | No                           | NA                     |
| X                                   | 9           | 4     | MC08    | -8,89,E+03              | 9,93E+02                                      | 1,88,E+02                      | No                           | NA                     | 6,66E+03                                      | 5,67,E+03                      | No                           | NA                     |
| X                                   | 10          | 4     | MC08    | -8,37,E+03              | 1,40E+03                                      | 1,85,E+02                      | No                           | NA                     | 8,97E+03                                      | 5,64,E+03                      | No                           | NA                     |
| X                                   | 11          | 4     | MC07    | -8,16,E+02              | 1,74E+03                                      | 3,42,E+03                      | Si                           | 2,0                    | 3,32E+03                                      | 9,86,E+03                      | Si                           | 3,0                    |
| X                                   | 12          | 4     | MC08    | -7,85,E+03              | 1,39E+03                                      | 1,15,E+02                      | No                           | NA                     | 8,92E+03                                      | 5,85,E+03                      | No                           | NA                     |
| X                                   | 13          | 4     | MC09    | -9,99,E+03              | 4,11E+03                                      | 4,37,E+03                      | Si                           | 1,1                    | 1,29E+04                                      | 1,83,E+04                      | Si                           | 1,4                    |
| X                                   | 14          | 4     | MC10    | -1,49,E+03              | 1,31E+03                                      | 1,51,E+03                      | Si                           | 1,2                    | 3,84E+03                                      | 8,90,E+03                      | Si                           | 2,3                    |
| Y                                   | 5           | 4     | MC12    | -8,78,E+02              | 1,87E+04                                      | 2,21,E+04                      | Si                           | 1,2                    | 4,66E+04                                      | 1,55,E+05                      | Si                           | 3,3                    |
| Y                                   | 8           | 4     | MC12    | -4,22,E+03              | 2,19E+04                                      | 2,25,E+04                      | Si                           | 1,0                    | 5,56E+04                                      | 1,74,E+05                      | Si                           | 3,1                    |

### 9.1.3 Apéndice A.3: Factores de agrietamiento de los muros estudiados

**Cuadro 18.** Factores de agrietamiento reales de los muros del primer nivel.

| No. de muro | Nivel | Sección | Eje débil                       |                                 |                                    | Eje fuerte                      |                                 |                                    | Factor de agrietamiento de flexión promedio |
|-------------|-------|---------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---|
|             |       |         | EI efectivo (KNm <sup>2</sup> ) | EI elástico (KNm <sup>2</sup> ) | Factor de agrietamiento de flexión | EI efectivo (KNm <sup>2</sup> ) | EI elástico (KNm <sup>2</sup> ) | Factor de agrietamiento de flexión |   |
| 1           | 1     | MC05    | 4,37,E+04                       | 1,58,E+05                       | 0,28                               | 2,02,E+06                       | 7,71,E+06                       | 0,26                               | 0,27  |
| 2           | 1     | MC05    | 5,06,E+04                       | 1,58,E+05                       | 0,32                               | 2,41,E+06                       | 7,71,E+06                       | 0,31                               | 0,32  |
| 3           | 1     | MC05    | 5,09,E+04                       | 1,58,E+05                       | 0,32                               | 2,49,E+06                       | 7,71,E+06                       | 0,32                               | 0,32  |
| 4           | 1     | MC05    | 4,49,E+04                       | 1,58,E+05                       | 0,28                               | 2,09,E+06                       | 7,71,E+06                       | 0,27                               | 0,28  |
| 6           | 1     | MC11    | 6,35,E+04                       | 1,83,E+05                       | 0,35                               | 2,91,E+06                       | 8,25,E+06                       | 0,35                               | 0,35  |
| 7           | 1     | MC11    | 6,71,E+04                       | 1,83,E+05                       | 0,37                               | 3,10,E+06                       | 8,25,E+06                       | 0,38                               | 0,37  |
| 9           | 1     | MC08    | 1,17,E+05                       | 1,95,E+05                       | 0,60                               | 5,15,E+06                       | 8,55,E+06                       | 0,60                               | 0,60  |
| 10          | 1     | MC08    | 1,11,E+05                       | 1,95,E+05                       | 0,57                               | 4,84,E+06                       | 8,55,E+06                       | 0,57                               | 0,57  |
| 11          | 1     | MC07    | 2,34,E+06                       | 5,22,E+06                       | 0,45                               | 7,03,E+06                       | 1,44,E+07                       | 0,49                               | 0,47  |
| 12          | 1     | MC08    | 1,13,E+05                       | 1,95,E+05                       | 0,58                               | 4,94,E+06                       | 1,44,E+07                       | 0,34                               | 0,46  |
| 13          | 1     | MC09    | 1,60,E+06                       | 5,00,E+06                       | 0,32                               | 1,09,E+07                       | 3,00,E+07                       | 0,36                               | 0,34  |
| 14          | 1     | MC10    | 3,97,E+05                       | 2,11,E+06                       | 0,19                               | 2,77,E+06                       | 1,29,E+07                       | 0,21                               | 0,20  |
| 15          | 1     | MC4     | 3,66,E+04                       | 1,22,E+05                       | 0,30                               | 1,65,E+06                       | 5,59,E+06                       | 0,30                               | 0,30  |
| 16          | 1     | MC05    | 5,18,E+04                       | 1,58,E+05                       | 0,33                               | 2,45,E+06                       | 7,71,E+06                       | 0,32                               | 0,32  |
| 17          | 1     | MC05    | 5,06,E+04                       | 1,58,E+05                       | 0,32                               | 2,40,E+06                       | 7,71,E+06                       | 0,31                               | 0,32  |
| 18          | 1     | MC4a    | 3,31,E+04                       | 9,21,E+04                       | 0,36                               | 7,46,E+05                       | 2,22,E+06                       | 0,34                               | 0,35  |
| 19          | 1     | MC1     | 3,05,E+04                       | 1,23,E+05                       | 0,25                               | 1,40,E+06                       | 5,60,E+06                       | 0,25                               | 0,25  |
| 20          | 1     | MC1     | 3,74,E+04                       | 1,23,E+05                       | 0,30                               | 1,79,E+06                       | 5,60,E+06                       | 0,32                               | 0,31  |
| 21          | 1     | MC2     | 3,01,E+04                       | 1,18,E+05                       | 0,26                               | 1,46,E+06                       | 5,33,E+06                       | 0,27                               | 0,26  |
| 22          | 1     | MC3     | 1,19,E+06                       | 4,97,E+06                       | 0,24                               | 3,88,E+06                       | 2,36,E+07                       | 0,16                               | 0,20  |
| 5           | 1     | MC12    | 1,38,E+07                       | 3,93,E+07                       | 0,35                               | 1,42,E+08                       | 4,94,E+08                       | 0,29                               | 0,32  |
| 8           | 1     | MC12    | 1,50,E+07                       | 3,93,E+07                       | 0,38                               | 1,54,E+08                       | 4,94,E+08                       | 0,31                               | 0,35  |

**Cuadro 19.** Factores de agrietamiento reales de los muros del cuarto nivel.

| No. de muro | Nivel | Sección | Eje débil                       |                              |                                    | Eje fuerte                      |                                 |                                    | Factor de agrietamiento de flexión promedio |
|-------------|-------|---------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---|
|             |       |         | EI elástico (KNm <sup>2</sup> ) | EI bruto (KNm <sup>2</sup> ) | Factor de agrietamiento de flexión | EI efectivo (KNm <sup>2</sup> ) | EI elástico (KNm <sup>2</sup> ) | Factor de agrietamiento de flexión |   |
| 6           | 4     | MC11    | 5,44,E+04                       | 1,48,E+05                    | 0,37                               | 2,37,E+06                       | 6,50,E+06                       | 0,36                               | 0,37  |
| 7           | 4     | MC11    | 6,12,E+04                       | 1,48,E+05                    | 0,41                               | 2,71,E+06                       | 6,50,E+06                       | 0,42                               | 0,42  |
| 9           | 4     | MC08    | 6,53,E+04                       | 1,75,E+05                    | 0,37                               | 2,91,E+06                       | 8,07,E+06                       | 0,36                               | 0,37  |
| 10          | 4     | MC08    | 1,09,E+05                       | 1,75,E+05                    | 0,62                               | 4,97,E+06                       | 8,07,E+06                       | 0,62                               | 0,62  |
| 11          | 4     | MC07    | 5,82,E+05                       | 4,11,E+06                    | 0,14                               | 1,80,E+06                       | 1,14,E+07                       | 0,16                               | 0,15  |
| 12          | 4     | MC08    | 1,07,E+05                       | 1,75,E+05                    | 0,61                               | 4,85,E+06                       | 8,07,E+06                       | 0,60                               | 0,61  |
| 13          | 4     | MC09    | 1,29,E+06                       | 3,96,E+06                    | 0,33                               | 8,67,E+06                       | 2,36,E+07                       | 0,37                               | 0,35  |
| 14          | 4     | MC10    | 2,94,E+05                       | 1,66,E+06                    | 0,18                               | 2,08,E+06                       | 1,02,E+07                       | 0,20                               | 0,19  |
| 5           | 4     | MC12    | 8,51,E+06                       | 2,98,E+07                    | 0,29                               | 8,60,E+07                       | 3,73,E+08                       | 0,23                               | 0,26  |
| 8           | 4     | MC12    | 1,01,E+07                       | 2,98,E+07                    | 0,34                               | 9,83,E+07                       | 3,73,E+08                       | 0,26                               | 0,30  |

## 9.2 Apéndice B: Diseño del LRB

La rigidez efectiva mínima en cada LRB se determinó mediante un proceso iterativo, mostrado en el siguiente cuadro:

**Cuadro 20.** Iteraciones para determinar la rigidez efectiva necesaria en los LRB para garantizar la estabilidad estructural del edificio.

| Keff por LRB (KN/mm) | Período fundamental (s) | ¿Sistema estable? |
|----------------------|-------------------------|-------------------|
| 1,40                 | -3,51                   | No                |
| 2,00                 | -4,38                   | No                |
| 3,00                 | -10,86                  | No                |
| 4,00                 | -6,21                   | No                |
| 4,50                 | -40,00                  | No                |
| 5,00                 | 4,04                    | Sí                |

Como se muestra del cuadro anterior, se requiere de una rigidez efectiva de 5,0 KN/mm en cada LRB según el análisis espectral de superposición modal, en aras de aumentar al máximo posible el período fundamental de la estructura y reducir la demanda sísmica sobre los elementos estructurales, sin comprometer la estabilidad de la misma. A esta rigidez se le asigna el período fundamental correspondiente a formas traslacionales (4,04 s), no el período fundamental original del edificio aislado (6,52 s) que corresponde a un modo de torsión en planta.

Para maximizar el amortiguamiento, se tomó la mayor fuerza de fluencia del plomo para el aislador que soportaba la carga axial máxima y que tenía dicha rigidez efectiva dentro de sus rangos permitidos. Este aislador es el de 1,36 m de diámetro presentado en el Anexo A. Por lo tanto, con  $K_{ef} = 5\,000\text{ KN/m}$  y  $Q_D = 890\text{ KN}$ , se obtienen los siguientes cálculos:

- Rigidez post-fluencia:

$$K_{ef} = \frac{Q_D + K_2 d_{bd}}{K_2} \rightarrow 5000 = \frac{890 + K_2 0,86}{0,86} \rightarrow K_2 = 3\,965\text{ KN/m}$$

- Rigidez elástica:

$$K_1 = 10K_2 = 39\,650 \text{ KN/m}$$

- Desplazamiento de fluencia del LRB para la condición del desplazamiento de análisis:

$$D_y = \frac{Q_D}{K_1 - K_2} = \frac{890}{39\,650 - 3\,965} = 0,024 \text{ m}$$

- Área total máxima del ciclo histéresis del sistema de aislamiento para la condición del desplazamiento de análisis:

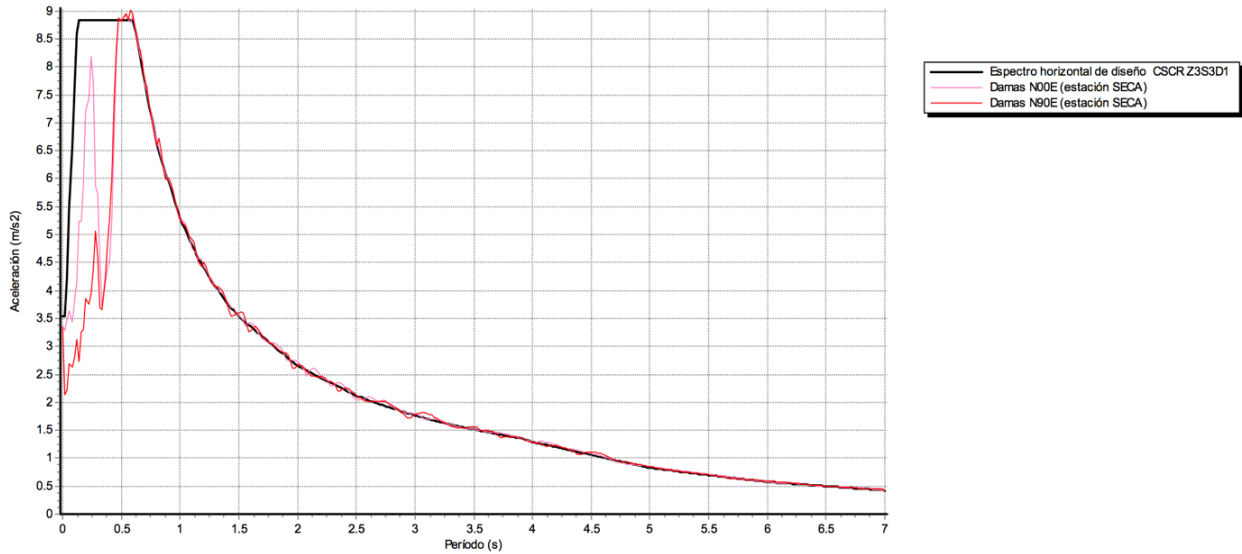
$$A_T = m4Q_D(d_{bd} - D_y) = 26(4)(890)(0,86 - 0,024) = 77\,293,18 \text{ KNm}$$

- Amortiguamiento efectivo total del sistema de aislamiento:

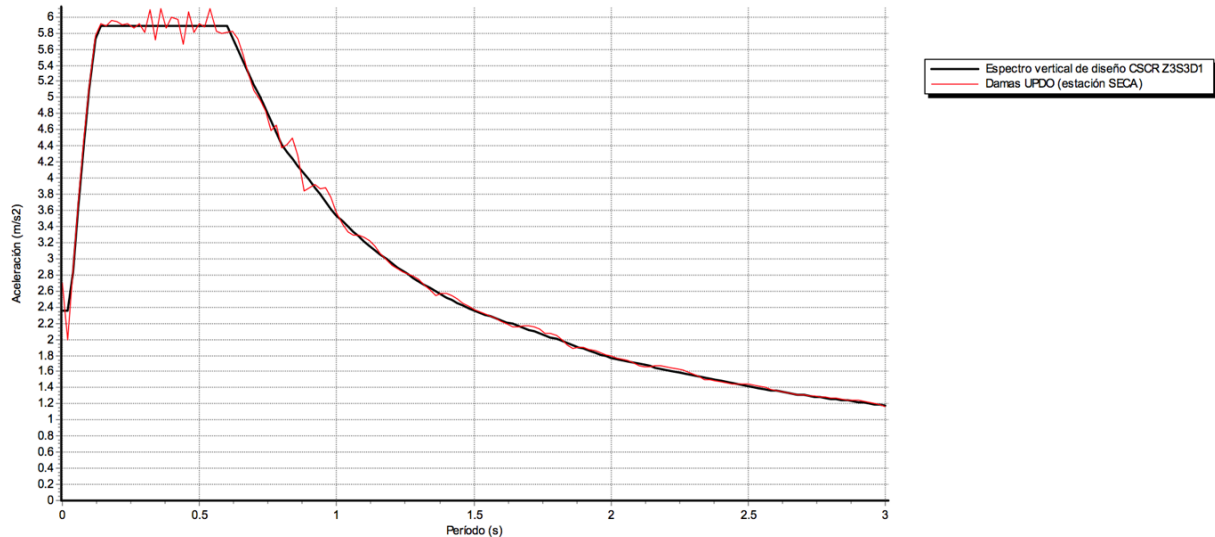
$$\xi = \frac{100}{2\pi} \left[ \frac{A_T}{mK_{ef}d_{bd}^2} \right] = \frac{100}{2\pi} \left[ \frac{77\,293,18}{26(5000)(0,86)^2} \right] = 13\%$$

## 9.3 Apéndice C: Análisis de respuesta en el tiempo

### 9.3.1 Apéndice C.1: Espectros de respuesta de aceleración escalados

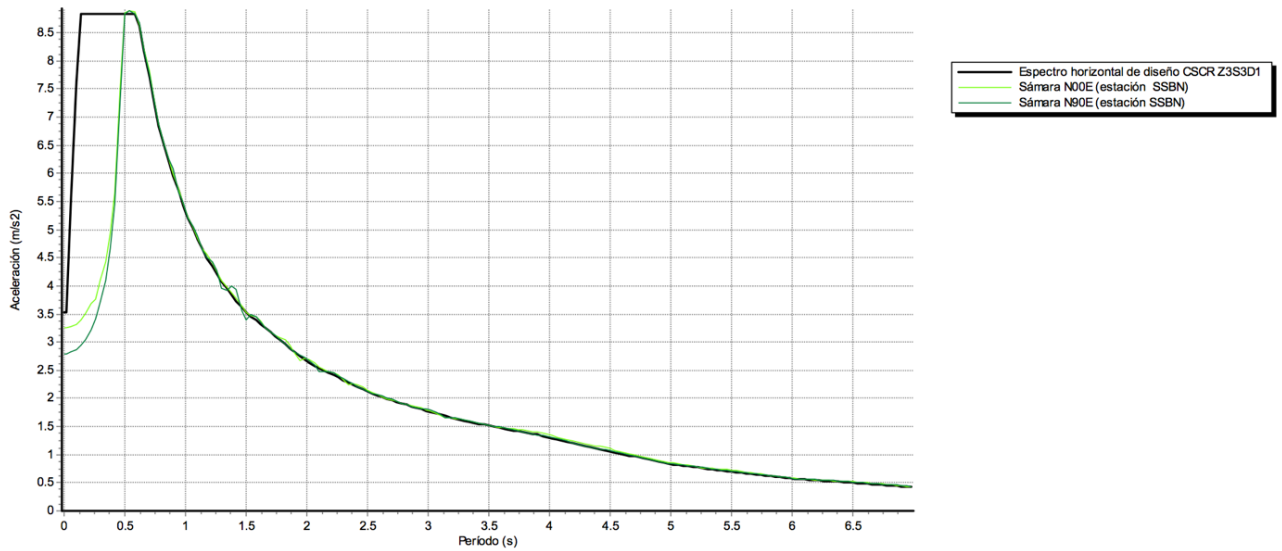


**Figura 82.** Espectros de respuesta horizontal del Terremoto de Damas escalados al sismo de diseño horizontal.

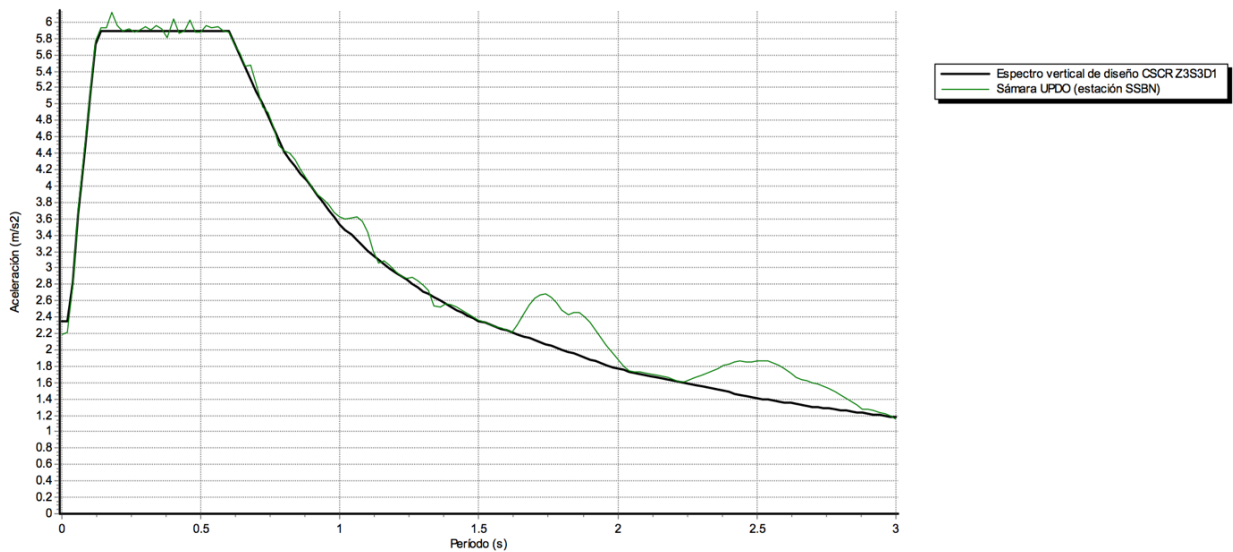


**Figura 83.** Espectro de respuesta vertical del Terremoto de Damas escalado al sismo de diseño vertical.

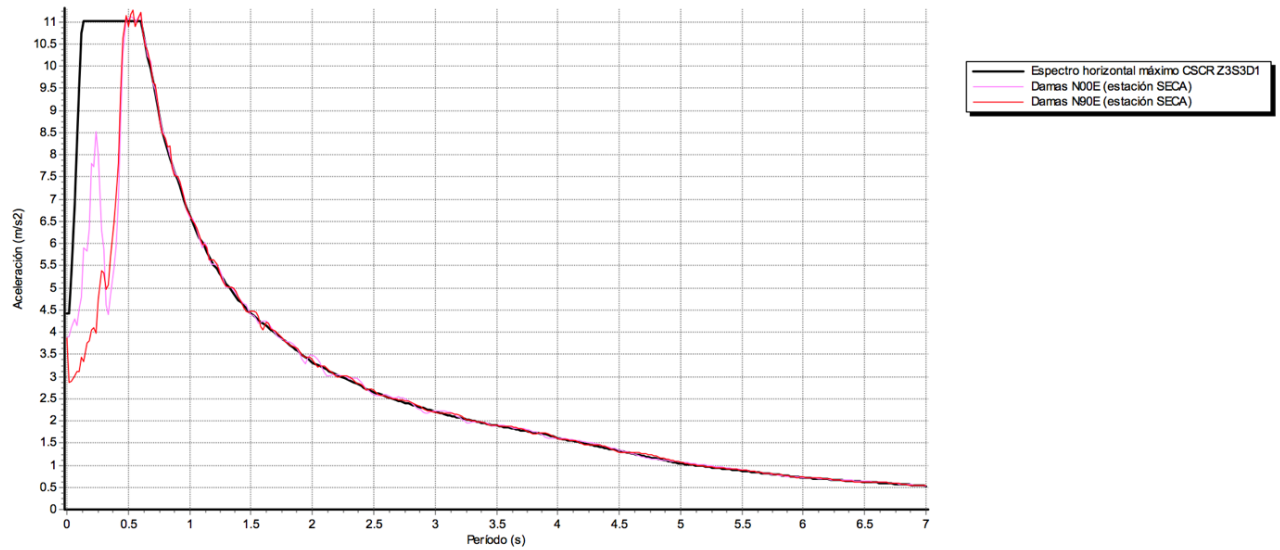




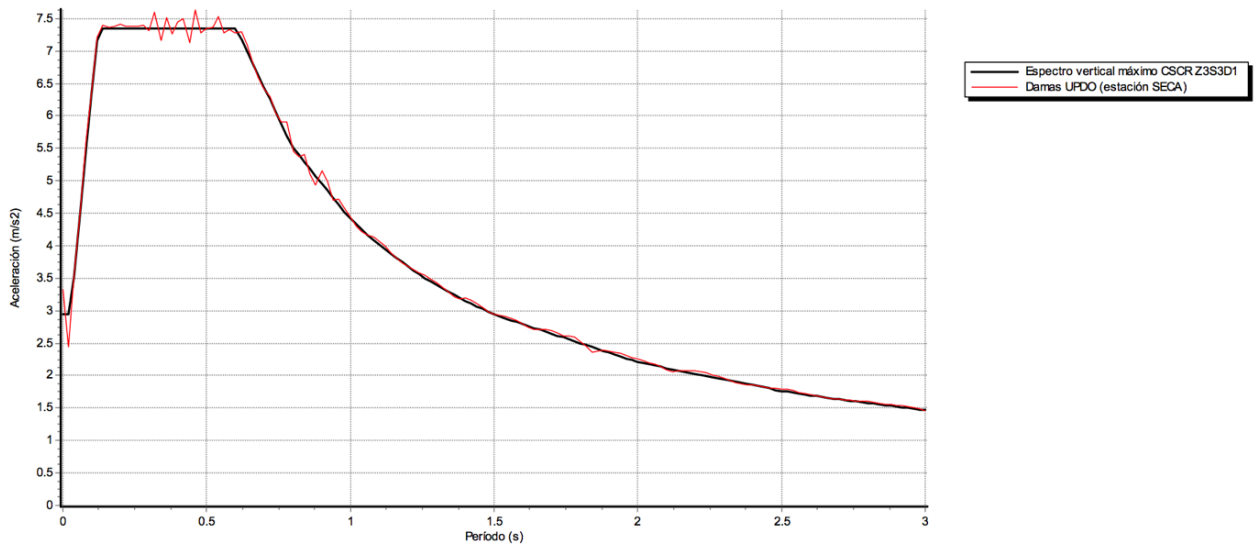
**Figura 84.** Espectros de respuesta horizontal del Terremoto de Sámara escalados al sismo de diseño horizontal.



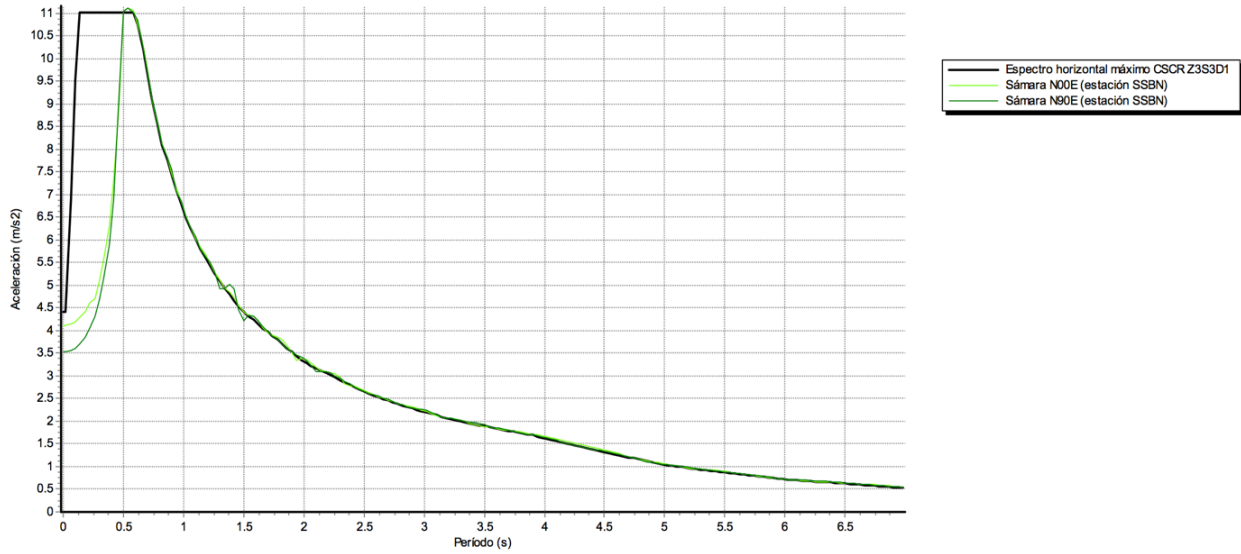
**Figura 85.** Espectro de respuesta vertical del Terremoto de Sámara escalado al sismo de diseño vertical.



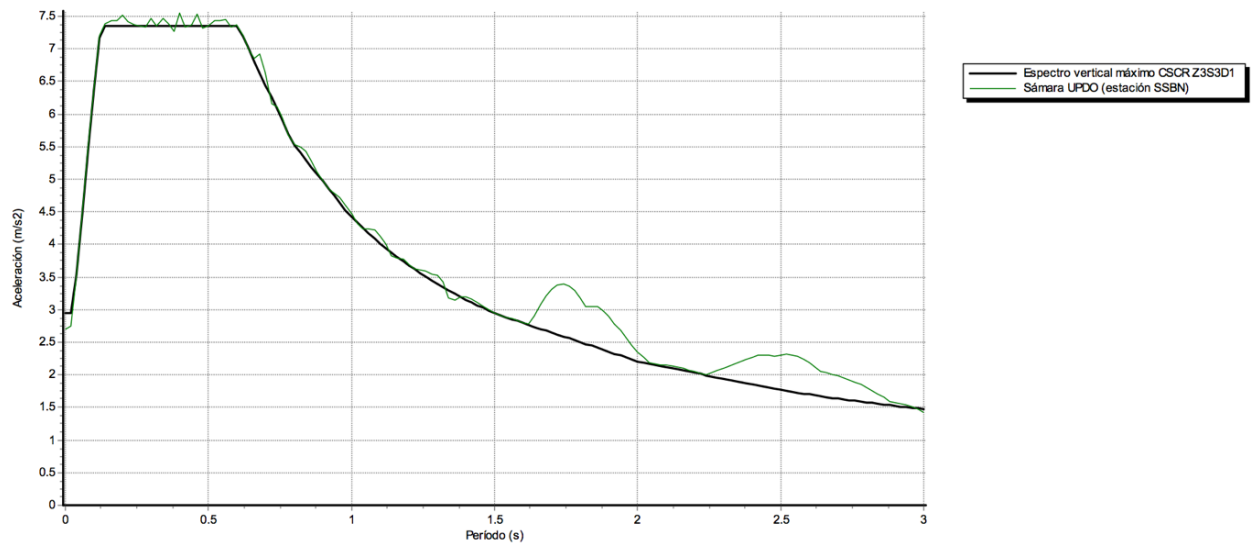
**Figura 86.** Espectros de respuesta horizontal del Terremoto de Damas escalados al sismo máximo horizontal.



**Figura 87.** Espectro de respuesta vertical del Terremoto de Damas escalado al sismo máximo vertical.



**Figura 88.** Espectros de respuesta horizontal del Terremoto de Sámara escalados al sismo máximo horizontal.



**Figura 89.** Espectro de respuesta vertical del Terremoto de Sámara escalado al sismo máximo vertical.

### 9.3.2 Apéndice C.2: Incursiones de los muros en el rango inelástico

#### Caso del edificio sin sistemas de protección sísmica

**Cuadro 21.** Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del primer nivel en el edificio sin aislamiento sísmico, durante el Terremoto de Cinchona.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                                |                              |                        |  | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |  |
|-------------------------------------|-------------|-------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|
|                                     |             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? |
| X                                   | 1           | 1     | 5,80E+02                                      | 9,40E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 4,14E+03                                      | 9,11E+03                       | Sí                           | 2,20                   | 14   |
| X                                   | 2           | 1     | 7,12E+02                                      | 1,16E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 5,06E+03                                      | 6,97E+03                       | Sí                           | 1,38                   | 3  |
| X                                   | 3           | 1     | 7,15E+02                                      | 1,14E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 5,09E+03                                      | 6,50E+03                       | Sí                           | 1,28                   | 4  |
| X                                   | 4           | 1     | 6,03E+02                                      | 1,11E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 4,29E+03                                      | 9,50E+03                       | Sí                           | 2,21                   | 15   |
| X                                   | 6           | 1     | 9,50E+02                                      | 1,07E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 6,40E+03                                      | 8,41E+03                       | Sí                           | 1,31                   | 3  |
| X                                   | 7           | 1     | 1,03E+03                                      | 1,06E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 6,95E+03                                      | 7,62E+03                       | Sí                           | 1,10                   | 2  |
| X                                   | 9           | 1     | 1,57E+03                                      | 8,97E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,04E+04                                      | 7,98E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 10          | 1     | 1,55E+03                                      | 1,12E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 1,03E+04                                      | 7,65E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 11          | 1     | 7,59E+03                                      | 8,00E+03                       | Sí                           | 1,05                   | 2  | 1,58E+04                                      | 1,34E+04                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 12          | 1     | 1,56E+03                                      | 8,28E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,03E+04                                      | 7,61E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 13          | 1     | 4,88E+03                                      | 5,93E+03                       | Sí                           | 1,22                   | 5  | 1,56E+04                                      | 2,14E+04                       | Sí                           | 1,38                   | 8  |
| X                                   | 14          | 1     | 1,66E+03                                      | 3,74E+03                       | Sí                           | 2,25                   | 15   | 4,97E+03                                      | 1,47E+04                       | Sí                           | 2,96                   | 15   |
| X                                   | 15          | 1     | 4,47E+02                                      | 8,06E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 3,04E+03                                      | 7,42E+03                       | Sí                           | 2,44                   | 14   |
| X                                   | 16          | 1     | 7,28E+02                                      | 6,63E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,18E+03                                      | 5,80E+03                       | Sí                           | 1,12                   | 1  |
| X                                   | 17          | 1     | 7,11E+02                                      | 9,15E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,05E+03                                      | 5,46E+03                       | Sí                           | 1,08                   | 2  |
| X                                   | 18          | 1     | 4,23E+02                                      | 9,14E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 2,09E+03                                      | 7,53E+03                       | Sí                           | 3,60                   | 19   |
| X                                   | 19          | 1     | 3,90E+02                                      | 8,71E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 2,64E+03                                      | 1,07E+04                       | Sí                           | 4,06                   | 24   |
| X                                   | 20          | 1     | 5,35E+02                                      | 4,78E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 3,59E+03                                      | 1,45E+04                       | Sí                           | 4,04                   | 23   |
| X                                   | 21          | 1     | 3,01E+02                                      | 4,11E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,92E+03                                      | 1,09E+04                       | Sí                           | 5,68                   | 27   |
| X                                   | 22          | 1     | 2,74E+03                                      | 1,12E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 4,91E+03                                      | 9,33E+03                       | Sí                           | 1,90                   | 13   |
| Y                                   | 5           | 1     | 3,15E+04                                      | 3,42E+04                       | Sí                           | 1,09                   | 1  | 8,06E+04                                      | 2,13E+05                       | Sí                           | 2,65                   | 14   |
| Y                                   | 8           | 1     | 3,52E+04                                      | 3,48E+04                       | No                           | NA                     | 0  | 9,03E+04                                      | 2,40E+05                       | Sí                           | 2,65                   | 14   |

**Cuadro 22.** Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del cuarto nivel en el edificio sin aislamiento sísmico, durante el Terremoto de Cinchona.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                                |                              |                        |  | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |  |
|-------------------------------------|-------------|-------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|
|                                     |             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? |
| X                                   | 6           | 4     | 8,37E+02                                      | 7,77E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,35E+03                                      | 6,17E+03                       | Sí                           | 1,16                   | 2  |
| X                                   | 7           | 4     | 9,15E+02                                      | 7,74E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,69E+03                                      | 5,45E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 9           | 4     | 9,93E+02                                      | 1,99E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 6,66E+03                                      | 5,76E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 10          | 4     | 1,40E+03                                      | 1,93E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 8,97E+03                                      | 5,99E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 11          | 4     | 1,74E+03                                      | 3,63E+03                       | Sí                           | 2,09                   | 12   | 3,32E+03                                      | 9,23E+03                       | Sí                           | 2,78                   | 14   |
| X                                   | 12          | 4     | 1,39E+03                                      | 1,16E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 8,92E+03                                      | 6,03E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 13          | 4     | 4,11E+03                                      | 4,56E+03                       | Sí                           | 1,11                   | 1  | 1,29E+04                                      | 1,73E+04                       | Sí                           | 1,34                   | 7  |
| X                                   | 14          | 4     | 1,31E+03                                      | 2,35E+03                       | Sí                           | 1,79                   | 8  | 3,84E+03                                      | 9,43E+03                       | Sí                           | 2,46                   | 11   |
| Y                                   | 5           | 4     | 1,87E+04                                      | 2,20E+04                       | Sí                           | 1,18                   | 6  | 4,66E+04                                      | 1,50E+05                       | Sí                           | 3,21                   | 11   |
| Y                                   | 8           | 4     | 2,19E+04                                      | 2,14E+04                       | No                           | NA                     | 0  | 5,56E+04                                      | 1,66E+05                       | Sí                           | 2,98                   | 10   |

**Cuadro 23.** Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del primer nivel en el edificio sin aislamiento sísmico, durante el Terremoto de Damas.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                                |                              |                        |  | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |  |
|-------------------------------------|-------------|-------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|
|                                     |             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? |
| X                                   | 1           | 1     | 5,80E+02                                      | 9,08E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 4,14E+03                                      | 8,49E+03                       | Sí                           | 2,05                   | 13   |
| X                                   | 2           | 1     | 7,12E+02                                      | 9,71E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,06E+03                                      | 6,50E+03                       | Sí                           | 1,29                   | 2  |
| X                                   | 3           | 1     | 7,15E+02                                      | 1,03E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 5,09E+03                                      | 5,99E+03                       | Sí                           | 1,18                   | 2  |
| X                                   | 4           | 1     | 6,03E+02                                      | 1,16E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 4,29E+03                                      | 8,65E+03                       | Sí                           | 2,02                   | 13   |
| X                                   | 6           | 1     | 9,50E+02                                      | 9,68E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 6,40E+03                                      | 7,73E+03                       | Sí                           | 1,21                   | 1  |
| X                                   | 7           | 1     | 1,03E+03                                      | 9,71E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 6,95E+03                                      | 7,00E+03                       | Sí                           | 1,01                   | 1  |
| X                                   | 9           | 1     | 1,57E+03                                      | 7,92E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,04E+04                                      | 7,38E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 10          | 1     | 1,55E+03                                      | 1,01E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 1,03E+04                                      | 6,93E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 11          | 1     | 7,59E+03                                      | 8,19E+03                       | Sí                           | 1,08                   | 0  | 1,58E+04                                      | 1,38E+04                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 12          | 1     | 1,56E+03                                      | 7,73E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,03E+04                                      | 6,93E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 13          | 1     | 4,88E+03                                      | 6,92E+03                       | Sí                           | 1,42                   | 14   | 1,56E+04                                      | 2,15E+04                       | Sí                           | 1,38                   | 7  |
| X                                   | 14          | 1     | 1,66E+03                                      | 2,67E+03                       | Sí                           | 1,61                   | 13   | 4,97E+03                                      | 1,23E+04                       | Sí                           | 2,47                   | 20   |
| X                                   | 15          | 1     | 4,47E+02                                      | 7,19E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 3,04E+03                                      | 6,58E+03                       | Sí                           | 2,16                   | 12   |
| X                                   | 16          | 1     | 7,28E+02                                      | 6,59E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,18E+03                                      | 5,20E+03                       | Sí                           | 1,00                   | 1  |
| X                                   | 17          | 1     | 7,11E+02                                      | 8,89E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,05E+03                                      | 4,73E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 18          | 1     | 4,23E+02                                      | 8,49E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 2,09E+03                                      | 6,61E+03                       | Sí                           | 3,16                   | 25   |
| X                                   | 19          | 1     | 3,90E+02                                      | 7,80E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 2,64E+03                                      | 9,45E+03                       | Sí                           | 3,58                   | 29   |
| X                                   | 20          | 1     | 5,35E+02                                      | 4,29E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 3,59E+03                                      | 1,26E+04                       | Sí                           | 3,51                   | 30   |
| X                                   | 21          | 1     | 3,01E+02                                      | 3,63E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,92E+03                                      | 9,48E+03                       | Sí                           | 4,93                   | 38   |
| X                                   | 22          | 1     | 2,74E+03                                      | 1,08E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 4,91E+03                                      | 8,07E+03                       | Sí                           | 1,64                   | 9  |
| Y                                   | 5           | 1     | 3,15E+04                                      | 3,18E+04                       | Sí                           | 1,01                   | 1  | 8,06E+04                                      | 1,96E+05                       | Sí                           | 2,43                   | 30   |
| Y                                   | 8           | 1     | 3,52E+04                                      | 3,16E+04                       | No                           | NA                     | 0  | 9,03E+04                                      | 2,30E+05                       | Sí                           | 2,55                   | 28   |

**Cuadro 24.** Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del cuarto nivel en el edificio sin aislamiento sísmico, durante el Terremoto de Damas.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                                |                              |                        |  | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |  |
|-------------------------------------|-------------|-------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|
|                                     |             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? |
| X                                   | 6           | 4     | 8,37E+02                                      | 7,99E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,35E+03                                      | 6,49E+03                       | Sí                           | 1,21                   | 1  |
| X                                   | 7           | 4     | 9,15E+02                                      | 8,00E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,69E+03                                      | 5,93E+03                       | Sí                           | 1,04                   | 1  |
| X                                   | 9           | 4     | 9,93E+02                                      | 1,83E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 6,66E+03                                      | 6,18E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 10          | 4     | 1,40E+03                                      | 1,78E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 8,97E+03                                      | 6,20E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 11          | 4     | 1,74E+03                                      | 4,68E+03                       | Sí                           | 2,69                   | 24   | 3,32E+03                                      | 1,06E+04                       | Sí                           | 3,20                   | 25   |
| X                                   | 12          | 4     | 1,39E+03                                      | 1,07E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 8,92E+03                                      | 6,24E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 13          | 4     | 4,11E+03                                      | 5,42E+03                       | Sí                           | 1,32                   | 8  | 1,29E+04                                      | 2,01E+04                       | Sí                           | 1,56                   | 8  |
| X                                   | 14          | 4     | 1,31E+03                                      | 1,50E+03                       | Sí                           | 1,15                   | 2  | 3,84E+03                                      | 9,15E+03                       | Sí                           | 2,38                   | 14   |
| Y                                   | 5           | 4     | 1,87E+04                                      | 2,42E+04                       | Sí                           | 1,30                   | 1  | 4,66E+04                                      | 1,44E+05                       | Sí                           | 3,09                   | 30   |
| Y                                   | 8           | 4     | 2,19E+04                                      | 2,37E+04                       | Sí                           | 1,08                   | 1  | 5,56E+04                                      | 1,56E+05                       | Sí                           | 2,80                   | 29   |

**Cuadro 25.** Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del primer nivel en el edificio sin aislamiento sísmico, durante el Terremoto de Sámara.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                                |                              |                        |  | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |  |
|-------------------------------------|-------------|-------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|
|                                     |             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? |
| X                                   | 1           | 1     | 5,80E+02                                      | 1,07E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 4,14E+03                                      | 7,82E+03                       | Sí                           | 1,89                   | 7  |
| X                                   | 2           | 1     | 7,12E+02                                      | 1,07E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 5,06E+03                                      | 5,96E+03                       | Sí                           | 1,18                   | 3  |
| X                                   | 3           | 1     | 7,15E+02                                      | 1,04E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 5,09E+03                                      | 6,42E+03                       | Sí                           | 1,26                   | 2  |
| X                                   | 4           | 1     | 6,03E+02                                      | 1,01E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 4,29E+03                                      | 9,16E+03                       | Sí                           | 2,13                   | 8  |
| X                                   | 6           | 1     | 9,50E+02                                      | 1,03E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 6,40E+03                                      | 7,19E+03                       | Sí                           | 1,12                   | 5  |
| X                                   | 7           | 1     | 1,03E+03                                      | 1,00E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 6,95E+03                                      | 7,65E+03                       | Sí                           | 1,10                   | 1  |
| X                                   | 9           | 1     | 1,57E+03                                      | 8,54E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,04E+04                                      | 6,83E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 10          | 1     | 1,55E+03                                      | 1,04E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 1,03E+04                                      | 7,18E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 11          | 1     | 7,59E+03                                      | 4,77E+03                       | No                           | NA                     | 0  | 1,58E+04                                      | 1,16E+04                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 12          | 1     | 1,56E+03                                      | 8,05E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,03E+04                                      | 6,53E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 13          | 1     | 4,88E+03                                      | 4,40E+03                       | No                           | NA                     | 0  | 1,56E+04                                      | 2,16E+04                       | Sí                           | 1,39                   | 3  |
| X                                   | 14          | 1     | 1,66E+03                                      | 4,33E+03                       | Sí                           | 2,61                   | 11   | 4,97E+03                                      | 1,55E+04                       | Sí                           | 3,11                   | 13   |
| X                                   | 15          | 1     | 4,47E+02                                      | 8,43E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 3,04E+03                                      | 6,53E+03                       | Sí                           | 2,15                   | 8  |
| X                                   | 16          | 1     | 7,28E+02                                      | 6,76E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,18E+03                                      | 5,12E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 17          | 1     | 7,11E+02                                      | 9,08E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,05E+03                                      | 5,73E+03                       | Sí                           | 1,14                   | 1  |
| X                                   | 18          | 1     | 4,23E+02                                      | 7,34E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 2,09E+03                                      | 7,25E+03                       | Sí                           | 3,47                   | 15   |
| X                                   | 19          | 1     | 3,90E+02                                      | 8,02E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 2,64E+03                                      | 1,03E+04                       | Sí                           | 3,91                   | 16   |
| X                                   | 20          | 1     | 5,35E+02                                      | 4,62E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 3,59E+03                                      | 1,36E+04                       | Sí                           | 3,80                   | 15   |
| X                                   | 21          | 1     | 3,01E+02                                      | 3,65E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,92E+03                                      | 1,04E+04                       | Sí                           | 5,40                   | 19   |
| X                                   | 22          | 1     | 2,74E+03                                      | 1,10E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 4,91E+03                                      | 8,84E+03                       | Sí                           | 1,80                   | 7  |
| Y                                   | 5           | 1     | 3,15E+04                                      | 3,05E+04                       | No                           | NA                     | 0  | 8,06E+04                                      | 2,24E+05                       | Sí                           | 2,77                   | 10   |
| Y                                   | 8           | 1     | 3,52E+04                                      | 3,46E+04                       | No                           | NA                     | 0  | 9,03E+04                                      | 2,10E+05                       | Sí                           | 2,33                   | 11   |

**Cuadro 26.** Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del cuarto nivel en el edificio sin aislamiento sísmico, durante el Terremoto de Sámara.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                                |                              |                        |  | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |  |
|-------------------------------------|-------------|-------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|
|                                     |             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? |
| X                                   | 6           | 4     | 8,37E+02                                      | 8,61E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,35E+03                                      | 5,87E+03                       | Sí                           | 1,10                   | 2  |
| X                                   | 7           | 4     | 9,15E+02                                      | 8,68E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,69E+03                                      | 5,64E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 9           | 4     | 9,93E+02                                      | 1,95E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 6,66E+03                                      | 5,71E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 10          | 4     | 1,40E+03                                      | 1,84E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 8,97E+03                                      | 5,79E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 11          | 4     | 1,74E+03                                      | 2,02E+03                       | Sí                           | 1,16                   | 7  | 3,32E+03                                      | 8,47E+03                       | Sí                           | 2,55                   | 15   |
| X                                   | 12          | 4     | 1,39E+03                                      | 1,11E+02                       | No                           | NA                     | 0  | 8,92E+03                                      | 6,14E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 13          | 4     | 4,11E+03                                      | 2,76E+03                       | No                           | NA                     | 0  | 1,29E+04                                      | 1,66E+04                       | Sí                           | 1,29                   | 6  |
| X                                   | 14          | 4     | 1,31E+03                                      | 2,66E+03                       | Sí                           | 2,03                   | 7  | 3,84E+03                                      | 9,69E+03                       | Sí                           | 2,52                   | 11   |
| Y                                   | 5           | 4     | 1,87E+04                                      | 2,21E+04                       | Sí                           | 1,18                   | 4  | 4,66E+04                                      | 1,59E+05                       | Sí                           | 3,42                   | 11   |
| Y                                   | 8           | 4     | 2,19E+04                                      | 2,21E+04                       | Sí                           | 1,01                   | 1  | 5,56E+04                                      | 1,84E+05                       | Sí                           | 3,31                   | 12   |

## Caso del edificio con sistemas de protección sísmica

**Cuadro 27.** Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del primer nivel en el edificio con sistemas de protección sísmica, durante el Terremoto de Cinchona.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                                |                              |                        |  | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |  |
|-------------------------------------|-------------|-------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|
|                                     |             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? |
| X                                   | 1           | 1     | 5,80E+02                                      | 3,01E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 4,14E+03                                      | 5,06E+03                       | Sí                           | 1,22                   | 3  |
| X                                   | 2           | 1     | 7,12E+02                                      | 6,65E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,06E+03                                      | 4,97E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 3           | 1     | 7,15E+02                                      | 6,83E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,09E+03                                      | 5,12E+03                       | Sí                           | 1,01                   | 9  |
| X                                   | 4           | 1     | 6,03E+02                                      | 3,13E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 4,29E+03                                      | 3,75E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 6           | 1     | 9,50E+02                                      | 3,91E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 6,40E+03                                      | 6,88E+03                       | Sí                           | 1,08                   | 1  |
| X                                   | 7           | 1     | 1,03E+03                                      | 3,84E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 6,95E+03                                      | 6,69E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 9           | 1     | 1,57E+03                                      | 2,87E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,04E+04                                      | 7,01E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 10          | 1     | 1,55E+03                                      | 2,83E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,03E+04                                      | 6,37E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 11          | 1     | 7,59E+03                                      | 6,80E+03                       | No                           | NA                     | 0  | 1,58E+04                                      | 8,01E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 12          | 1     | 1,56E+03                                      | 2,68E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,03E+04                                      | 7,13E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 13          | 1     | 4,88E+03                                      | 6,00E+03                       | Sí                           | 1,23                   | 3  | 1,56E+04                                      | 1,45E+04                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 14          | 1     | 1,66E+03                                      | 2,37E+03                       | Sí                           | 1,43                   | 6  | 4,97E+03                                      | 9,11E+03                       | Sí                           | 1,83                   | 11   |
| X                                   | 15          | 1     | 4,47E+02                                      | 1,89E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 3,04E+03                                      | 2,94E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 16          | 1     | 7,28E+02                                      | 1,93E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,18E+03                                      | 4,31E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 17          | 1     | 7,11E+02                                      | 2,25E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,05E+03                                      | 3,98E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 18          | 1     | 4,23E+02                                      | 2,78E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 2,09E+03                                      | 2,87E+03                       | Sí                           | 1,37                   | 6  |
| X                                   | 19          | 1     | 3,90E+02                                      | 2,02E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 2,64E+03                                      | 5,22E+03                       | Sí                           | 1,97                   | 15   |
| X                                   | 20          | 1     | 5,35E+02                                      | 2,07E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 3,59E+03                                      | 5,75E+03                       | Sí                           | 1,60                   | 10   |
| X                                   | 21          | 1     | 3,01E+02                                      | 1,34E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,92E+03                                      | 4,04E+03                       | Sí                           | 2,10                   | 17   |
| X                                   | 22          | 1     | 2,74E+03                                      | 3,46E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 4,91E+03                                      | 7,29E+03                       | Sí                           | 1,48                   | 6  |
| Y                                   | 5           | 1     | 3,15E+04                                      | 2,10E+04                       | No                           | NA                     | 0  | 8,06E+04                                      | 1,70E+05                       | Sí                           | 2,11                   | 10   |
| Y                                   | 8           | 1     | 3,52E+04                                      | 2,26E+04                       | No                           | NA                     | 0  | 9,03E+04                                      | 1,73E+05                       | Sí                           | 1,92                   | 8  |

**Cuadro 28.** Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del cuarto nivel en el edificio con sistemas de protección sísmica, durante el Terremoto de Cinchona.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                                |                              |                        |  | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |  |
|-------------------------------------|-------------|-------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|
|                                     |             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? |
| X                                   | 6           | 4     | 8,37E+02                                      | 3,12E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,35E+03                                      | 5,39E+03                       | Sí                           | 1,01                   | 1  |
| X                                   | 7           | 4     | 9,15E+02                                      | 2,94E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,69E+03                                      | 4,59E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 9           | 4     | 9,93E+02                                      | 8,35E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 6,66E+03                                      | 4,81E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 10          | 4     | 1,40E+03                                      | 7,33E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 8,97E+03                                      | 4,99E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 11          | 4     | 1,74E+03                                      | 3,14E+03                       | Sí                           | 1,81                   | 7  | 3,32E+03                                      | 8,02E+03                       | Sí                           | 2,42                   | 13   |
| X                                   | 12          | 4     | 1,39E+03                                      | 4,78E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 8,92E+03                                      | 4,88E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 13          | 4     | 4,11E+03                                      | 3,63E+03                       | No                           | NA                     | 0  | 1,29E+04                                      | 1,51E+04                       | Sí                           | 1,17                   | 4  |
| X                                   | 14          | 4     | 1,31E+03                                      | 1,72E+03                       | Sí                           | 1,31                   | 6  | 3,84E+03                                      | 7,39E+03                       | Sí                           | 1,93                   | 9  |
| Y                                   | 5           | 4     | 1,87E+04                                      | 1,92E+04                       | Sí                           | 1,03                   | 1  | 4,66E+04                                      | 1,44E+05                       | Sí                           | 3,09                   | 17   |
| Y                                   | 8           | 4     | 2,19E+04                                      | 1,97E+04                       | No                           | NA                     | 0  | 5,56E+04                                      | 1,49E+05                       | Sí                           | 2,69                   | 14   |

**Cuadro 29.** Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del primer nivel en el edificio con sistemas de protección sísmica, durante el Terremoto de Damas.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                                |                              |                        |  | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |  |
|-------------------------------------|-------------|-------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|
|                                     |             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? |
| X                                   | 1           | 1     | 5,80E+02                                      | 3,00E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 4,14E+03                                      | 4,14E+03                       | Sí                           | 1,00                   | 1  |
| X                                   | 2           | 1     | 7,12E+02                                      | 5,26E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,06E+03                                      | 5,10E+03                       | Sí                           | 1,01                   | 1  |
| X                                   | 3           | 1     | 7,15E+02                                      | 5,38E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,09E+03                                      | 5,07E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 4           | 1     | 6,03E+02                                      | 3,50E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 4,29E+03                                      | 5,41E+03                       | Sí                           | 1,26                   | 6  |
| X                                   | 6           | 1     | 9,50E+02                                      | 3,80E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 6,40E+03                                      | 6,69E+03                       | Sí                           | 1,05                   | 2  |
| X                                   | 7           | 1     | 1,03E+03                                      | 3,80E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 6,95E+03                                      | 6,95E+03                       | Sí                           | 1,00                   | 1  |
| X                                   | 9           | 1     | 1,57E+03                                      | 2,96E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,04E+04                                      | 7,11E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 10          | 1     | 1,55E+03                                      | 3,09E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,03E+04                                      | 6,71E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 11          | 1     | 7,59E+03                                      | 7,95E+03                       | Sí                           | 1,05                   | 1  | 1,58E+04                                      | 1,14E+04                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 12          | 1     | 1,56E+03                                      | 2,69E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,03E+04                                      | 7,42E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 13          | 1     | 4,88E+03                                      | 8,81E+03                       | Sí                           | 1,81                   | 18   | 1,56E+04                                      | 2,03E+04                       | Sí                           | 1,30                   | 5  |
| X                                   | 14          | 1     | 1,66E+03                                      | 1,90E+03                       | Sí                           | 1,14                   | 6  | 4,97E+03                                      | 7,86E+03                       | Sí                           | 1,58                   | 5  |
| X                                   | 15          | 1     | 4,47E+02                                      | 1,89E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 3,04E+03                                      | 3,33E+03                       | Sí                           | 1,09                   | 3  |
| X                                   | 16          | 1     | 7,28E+02                                      | 1,99E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,18E+03                                      | 4,40E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 17          | 1     | 7,11E+02                                      | 2,37E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,05E+03                                      | 4,04E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 18          | 1     | 4,23E+02                                      | 3,30E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 2,09E+03                                      | 3,06E+03                       | Sí                           | 1,47                   | 10   |
| X                                   | 19          | 1     | 3,90E+02                                      | 1,88E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 2,64E+03                                      | 5,45E+03                       | Sí                           | 2,06                   | 19   |
| X                                   | 20          | 1     | 5,35E+02                                      | 2,04E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 3,59E+03                                      | 5,92E+03                       | Sí                           | 1,65                   | 12   |
| X                                   | 21          | 1     | 3,01E+02                                      | 1,42E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,92E+03                                      | 4,08E+03                       | Sí                           | 2,12                   | 20   |
| X                                   | 22          | 1     | 2,74E+03                                      | 4,11E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 4,91E+03                                      | 7,13E+03                       | Sí                           | 1,45                   | 7  |
| Y                                   | 5           | 1     | 3,15E+04                                      | 2,29E+04                       | No                           | NA                     | 0  | 8,06E+04                                      | 1,71E+05                       | Sí                           | 2,12                   | 23   |
| Y                                   | 8           | 1     | 3,52E+04                                      | 2,27E+04                       | No                           | NA                     | 0  | 9,03E+04                                      | 2,04E+05                       | Sí                           | 2,26                   | 24   |

**Cuadro 30.** Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del cuarto nivel en el edificio con sistemas de protección sísmica, durante el Terremoto de Damas.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                                |                              |                        |  | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |  |
|-------------------------------------|-------------|-------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|
|                                     |             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? |
| X                                   | 6           | 4     | 8,37E+02                                      | 3,50E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,35E+03                                      | 5,34E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 7           | 4     | 9,15E+02                                      | 3,36E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,69E+03                                      | 5,61E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 9           | 4     | 9,93E+02                                      | 8,21E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 6,66E+03                                      | 5,46E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 10          | 4     | 1,40E+03                                      | 7,02E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 8,97E+03                                      | 5,14E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 11          | 4     | 1,74E+03                                      | 5,04E+03                       | Sí                           | 2,90                   | 28   | 3,32E+03                                      | 9,74E+03                       | Sí                           | 2,93                   | 28   |
| X                                   | 12          | 4     | 1,39E+03                                      | 4,66E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 8,92E+03                                      | 5,49E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 13          | 4     | 4,11E+03                                      | 5,73E+03                       | Sí                           | 1,39                   | 6  | 1,29E+04                                      | 1,86E+04                       | Sí                           | 1,44                   | 8  |
| X                                   | 14          | 4     | 1,31E+03                                      | 1,18E+03                       | No                           | NA                     | 0  | 3,84E+03                                      | 7,81E+03                       | Sí                           | 2,04                   | 19   |
| Y                                   | 5           | 4     | 1,87E+04                                      | 2,15E+04                       | Sí                           | 1,15                   | 3  | 4,66E+04                                      | 1,47E+05                       | Sí                           | 3,15                   | 31   |
| Y                                   | 8           | 4     | 2,19E+04                                      | 2,03E+04                       | No                           | NA                     | 0  | 5,56E+04                                      | 1,65E+05                       | Sí                           | 2,98                   | 30   |



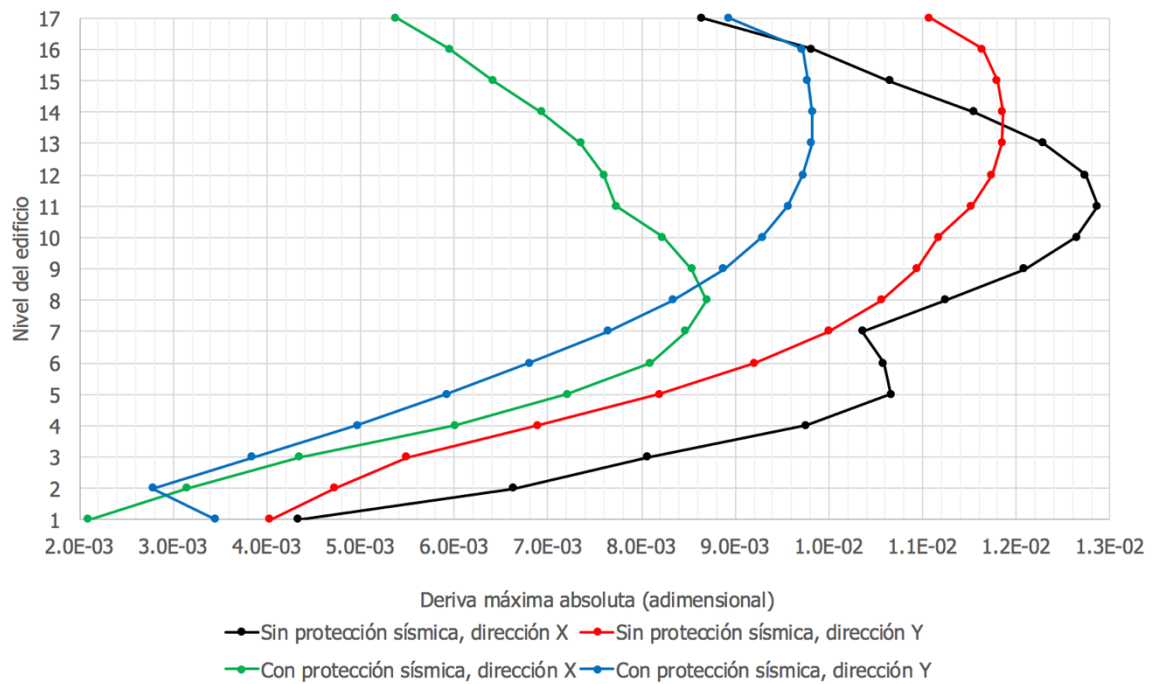
**Cuadro 31.** Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del primer nivel en el edificio con sistemas de protección sísmica, durante el Terremoto de Sámara.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                                |                              |                        |  | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |  |
|-------------------------------------|-------------|-------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|
|                                     |             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? |
| X                                   | 1           | 1     | 5,80E+02                                      | 3,14E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 4,14E+03                                      | 5,20E+03                       | Sí                           | 1,26                   | 2  |
| X                                   | 2           | 1     | 7,12E+02                                      | 5,03E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,06E+03                                      | 4,98E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 3           | 1     | 7,15E+02                                      | 5,12E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,09E+03                                      | 5,11E+03                       | Sí                           | 1,01                   | 1  |
| X                                   | 4           | 1     | 6,03E+02                                      | 3,04E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 4,29E+03                                      | 3,77E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 6           | 1     | 9,50E+02                                      | 3,51E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 6,40E+03                                      | 7,09E+03                       | Sí                           | 1,11                   | 2  |
| X                                   | 7           | 1     | 1,03E+03                                      | 3,50E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 6,95E+03                                      | 6,81E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 9           | 1     | 1,57E+03                                      | 2,81E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,04E+04                                      | 7,25E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 10          | 1     | 1,55E+03                                      | 2,73E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,03E+04                                      | 6,68E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 11          | 1     | 7,59E+03                                      | 6,03E+03                       | No                           | NA                     | 0  | 1,58E+04                                      | 6,23E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 12          | 1     | 1,56E+03                                      | 2,34E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,03E+04                                      | 7,40E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 13          | 1     | 4,88E+03                                      | 4,29E+03                       | No                           | NA                     | 0  | 1,56E+04                                      | 1,62E+04                       | Sí                           | 1,04                   | 1  |
| X                                   | 14          | 1     | 1,66E+03                                      | 2,82E+03                       | Sí                           | 1,70                   | 5  | 4,97E+03                                      | 9,88E+03                       | Sí                           | 1,99                   | 8  |
| X                                   | 15          | 1     | 4,47E+02                                      | 1,92E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 3,04E+03                                      | 2,97E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 16          | 1     | 7,28E+02                                      | 1,90E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,18E+03                                      | 4,48E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 17          | 1     | 7,11E+02                                      | 2,13E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,05E+03                                      | 4,13E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 18          | 1     | 4,23E+02                                      | 2,74E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 2,09E+03                                      | 2,92E+03                       | Sí                           | 1,40                   | 4  |
| X                                   | 19          | 1     | 3,90E+02                                      | 1,81E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 2,64E+03                                      | 5,33E+03                       | Sí                           | 2,02                   | 7  |
| X                                   | 20          | 1     | 5,35E+02                                      | 1,78E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 3,59E+03                                      | 5,92E+03                       | Sí                           | 1,65                   | 4  |
| X                                   | 21          | 1     | 3,01E+02                                      | 1,31E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 1,92E+03                                      | 4,19E+03                       | Sí                           | 2,18                   | 11   |
| X                                   | 22          | 1     | 2,74E+03                                      | 3,41E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 4,91E+03                                      | 7,73E+03                       | Sí                           | 1,57                   | 4  |
| Y                                   | 5           | 1     | 3,15E+04                                      | 2,21E+04                       | No                           | NA                     | 0  | 8,06E+04                                      | 1,75E+05                       | Sí                           | 2,18                   | 5  |
| Y                                   | 8           | 1     | 3,52E+04                                      | 2,30E+04                       | No                           | NA                     | 0  | 9,03E+04                                      | 1,82E+05                       | Sí                           | 2,01                   | 5  |

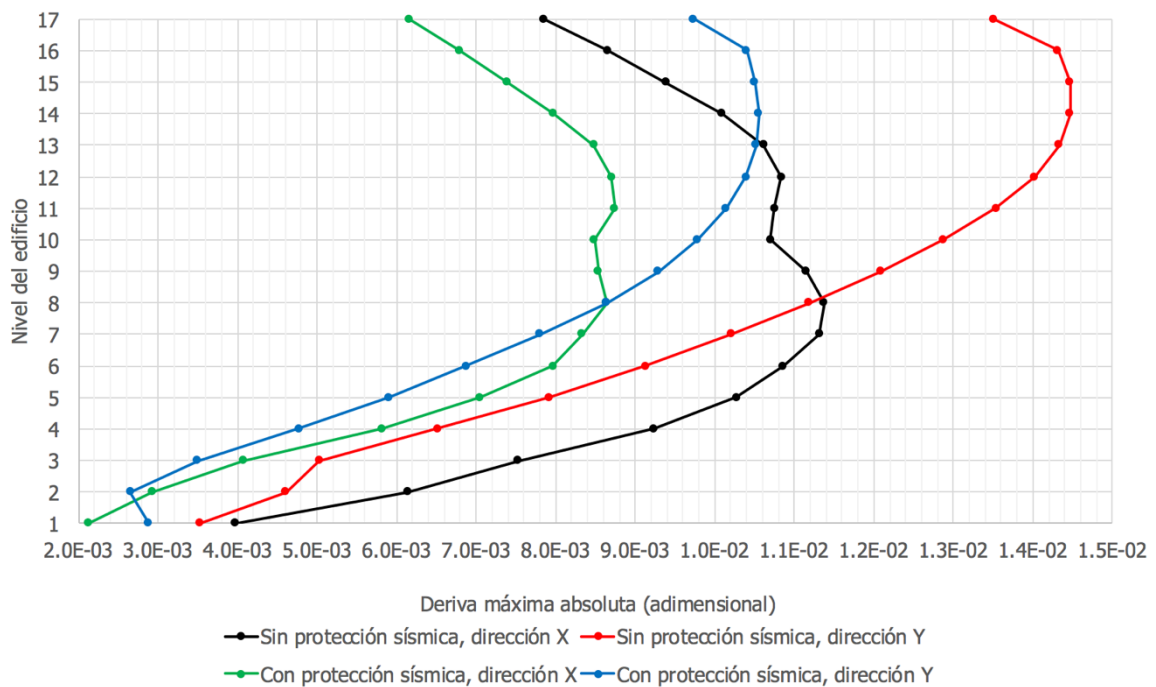
**Cuadro 32.** Resultados del análisis de respuesta en el tiempo de los muros del cuarto nivel en el edificio con sistemas de protección sísmica, durante el Terremoto de Sámara.

| Eje global de resistencia principal | No. de muro | Nivel | Eje débil                                     |                                |                              |                        |  | Eje fuerte                                    |                                |                              |                        |  |
|-------------------------------------|-------------|-------|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|---|--------------------------------|------------------------------|------------------------|--|
|                                     |             |       | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? | Mínima capacidad de fluencia en flexión (KNm) | Máxima demanda a flexión (KNm) | ¿Se sale del rango elástico? | Factor de sobredemanda | ¿Cuántas veces entra en el rango inelástico? |
| X                                   | 6           | 4     | 8,37E+02                                      | 3,62E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,35E+03                                      | 5,51E+03                       | Sí                           | 1,03                   | 1  |
| X                                   | 7           | 4     | 9,15E+02                                      | 3,45E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 5,69E+03                                      | 5,24E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 9           | 4     | 9,93E+02                                      | 7,62E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 6,66E+03                                      | 5,07E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 10          | 4     | 1,40E+03                                      | 6,37E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 8,97E+03                                      | 5,15E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 11          | 4     | 1,74E+03                                      | 2,54E+03                       | Sí                           | 1,46                   | 5  | 3,32E+03                                      | 8,12E+03                       | Sí                           | 2,45                   | 15   |
| X                                   | 12          | 4     | 1,39E+03                                      | 4,61E+01                       | No                           | NA                     | 0  | 8,92E+03                                      | 5,27E+03                       | No                           | NA                     | 0  |
| X                                   | 13          | 4     | 4,11E+03                                      | 3,31E+03                       | No                           | NA                     | 0  | 1,29E+04                                      | 1,52E+04                       | Sí                           | 1,18                   | 3  |
| X                                   | 14          | 4     | 1,31E+03                                      | 2,24E+03                       | Sí                           | 1,71                   | 4  | 3,84E+03                                      | 7,85E+03                       | Sí                           | 2,05                   | 10   |
| Y                                   | 5           | 4     | 1,87E+04                                      | 1,97E+04                       | Sí                           | 1,05                   | 2  | 4,66E+04                                      | 1,56E+05                       | Sí                           | 3,35                   | 7  |
| Y                                   | 8           | 4     | 2,19E+04                                      | 2,06E+04                       | No                           | NA                     | 0  | 5,56E+04                                      | 1,78E+05                       | Sí                           | 3,21                   | 6  |

### 9.3.3 Apéndice C.3: Patrón de derivas máximas

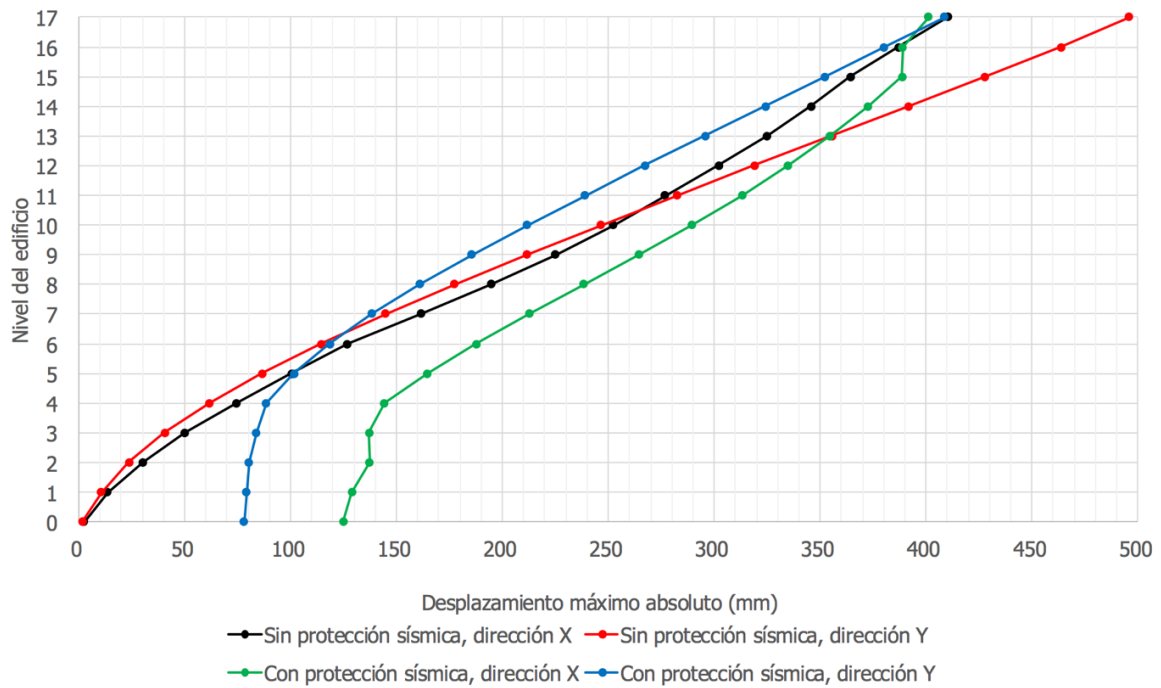


**Figura 90.** Derivas máximas absolutas durante el Terremoto de Damas.

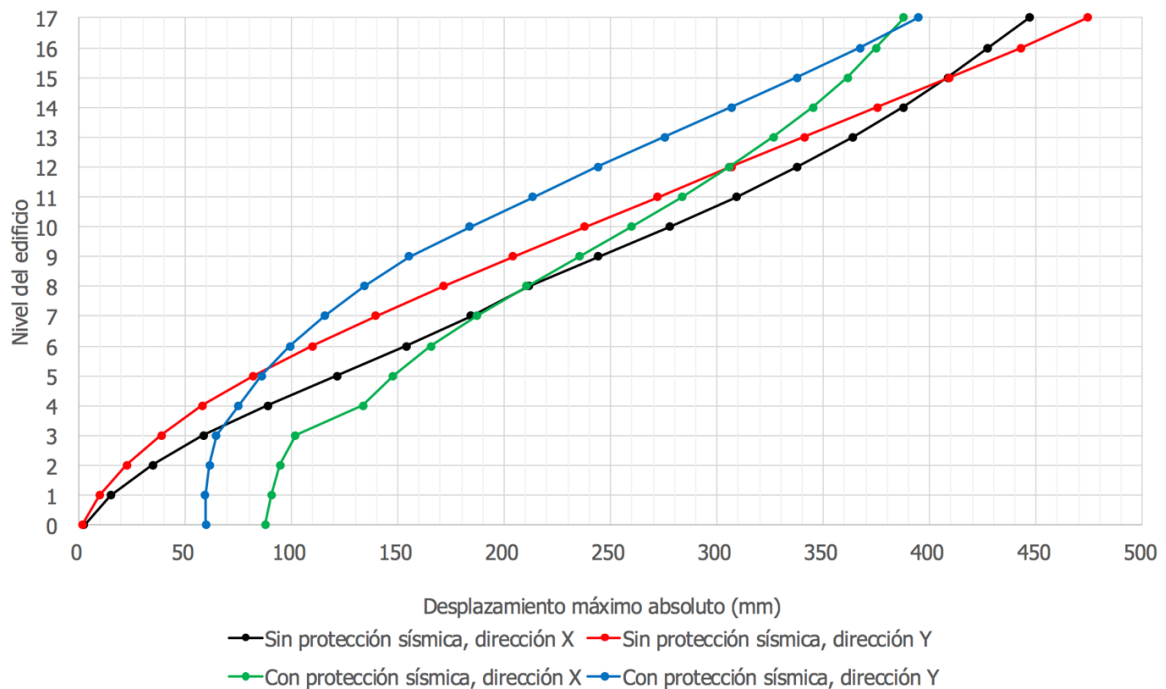


**Figura 91.** Derivas máximas absolutas durante el Terremoto de Sámara.

### 9.3.4 Apéndice C.4: Patrón de desplazamientos máximos

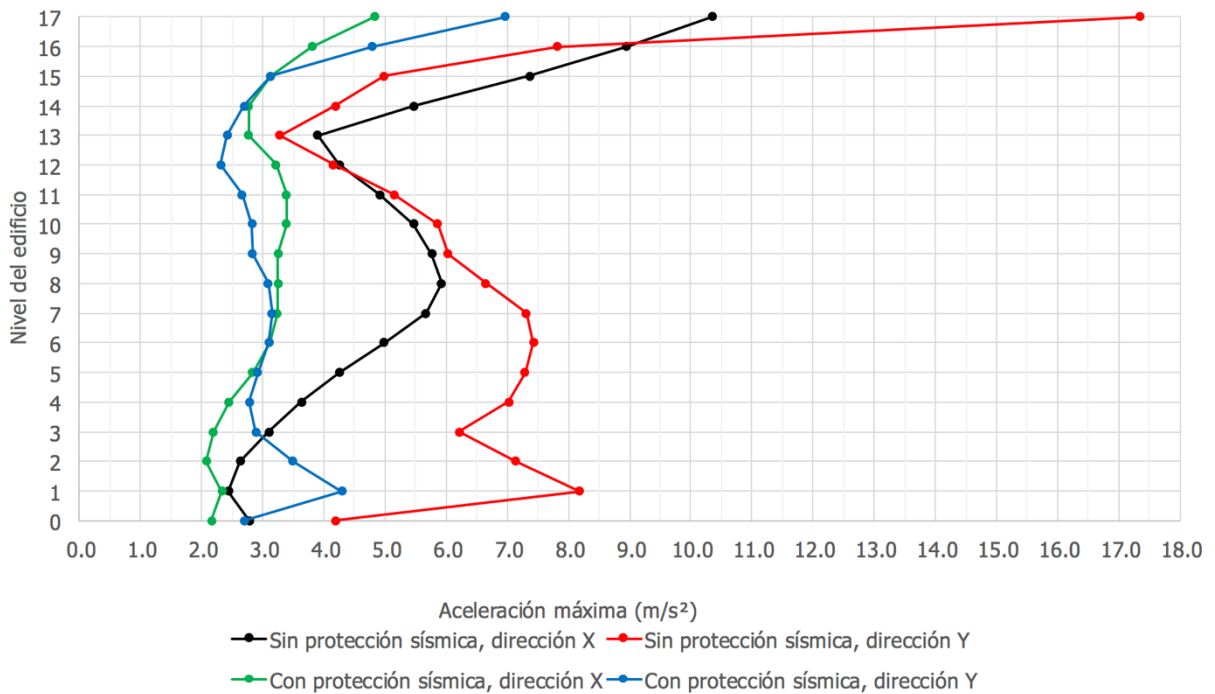


**Figura 92.** Desplazamientos máximos absolutos durante el Terremoto de Damas.

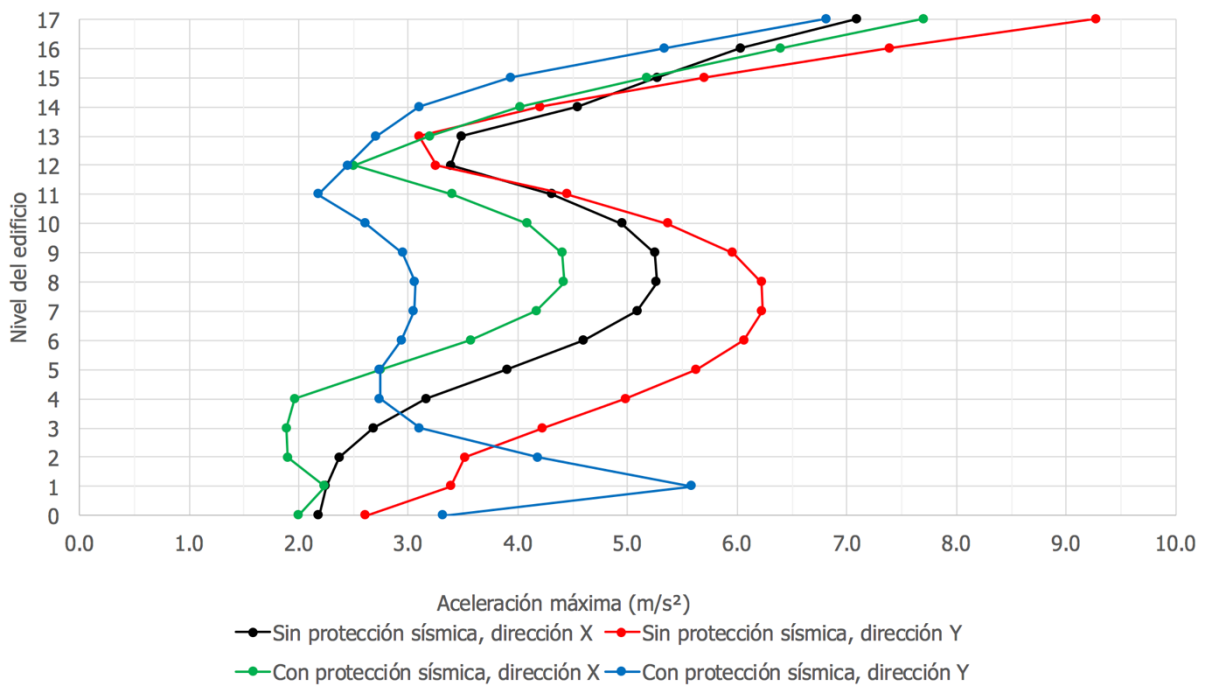


**Figura 93.** Desplazamientos máximos absolutos durante el Terremoto de Sámara.

### 9.3.5 Apéndice C.5: Patrón de aceleraciones máximas



**Figura 94.** Patrón de aceleraciones durante el Terremoto de Damas.



**Figura 95.** Patrón de aceleraciones durante el Terremoto de Sámara.

### 9.3.6 Apéndice C.6: Demanda sobre los sistemas de protección sísmica

**Cuadro 33.** Demanda en los LRB producto del Terremoto de Damas.

| No. de LRB | Capacidad a compresión (KN) | Compresión máxima (KN) | ¿Cumple por compresión? | Capacidad máxima de desplazamiento horizontal (mm) | Demanda máxima de desplazamiento horizontal (mm) | ¿Cumple por desplazamiento? | Capacidad a tensión (KN) | Tensión máxima (KN) | ¿Cumple por tensión? |
|------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|--|--|-----------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------|
| K3         | 2,76,E+04                   | 8,65,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,79,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 8,65,E+03           | No                   |
| K4         | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,78,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K5         | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,91,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K6         | 2,76,E+04                   | 5,83,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,25,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 5,83,E+03           | No                   |
| K7         | 2,76,E+04                   | 2,13,E+04              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,57,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,13,E+04           | No                   |
| K8         | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,61,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K9         | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,91,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K10        | 2,76,E+04                   | 2,65,E+04              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,24,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,65,E+04           | No                   |
| K11        | 2,76,E+04                   | 2,00,E+04              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,36,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,00,E+04           | No                   |
| K12        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,61,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K13        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,91,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K14        | 2,76,E+04                   | 2,12,E+04              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,24,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,12,E+04           | No                   |
| K15        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,34,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K16        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,61,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K17        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,91,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K18        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,24,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K19        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,37,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K23        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,93,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K24        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,63,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K25        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,26,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K26        | 2,76,E+04                   | 2,26,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,61,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,26,E+03           | No                   |
| K27        | 2,76,E+04                   | 2,73,E+02              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,83,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,73,E+02           | No                   |
| K28        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,10,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K29        | 2,76,E+04                   | 4,87,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,41,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 4,87,E+03           | No                   |
| K30        | 2,76,E+04                   | 5,13,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,28,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 5,13,E+03           | No                   |
| K31        | 2,76,E+04                   | 6,61,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 1,46,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 6,61,E+03           | No                   |

**Cuadro 34.** Demanda en los LRB producto del Terremoto de Sámara.

| No. de LRB | Capacidad a compresión (KN) | Compresión máxima (KN) | ¿Cumple por compresión? | Capacidad máxima de desplazamiento horizontal (mm) | Demanda máxima de desplazamiento horizontal (mm) | ¿Cumple por desplazamiento? | Capacidad a tensión (KN) | Tensión máxima (KN) | ¿Cumple por tensión? |
|------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|--|--|-----------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------|
| K3         | 2,76,E+04                   | 3,42,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 3,17,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 3,42,E+03           | No                   |
| K4         | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 3,06,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K5         | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,97,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K6         | 2,76,E+04                   | 7,62,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,89,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 7,62,E+03           | No                   |
| K7         | 2,76,E+04                   | 2,32,E+04              | Sí                      | 8,60,E+02  | 3,05,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,32,E+04           | No                   |
| K8         | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,94,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K9         | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,84,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K10        | 2,76,E+04                   | 2,35,E+04              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,76,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,35,E+04           | No                   |
| K11        | 2,76,E+04                   | 1,47,E+04              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,93,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 1,47,E+04           | No                   |
| K12        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,82,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K13        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,72,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K14        | 2,76,E+04                   | 2,19,E+04              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,63,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,19,E+04           | No                   |
| K15        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,77,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K16        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,65,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K17        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,54,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K18        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,45,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K19        | 2,76,E+04                   | 1,70,E+01              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,61,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 1,70,E+01           | No                   |
| K23        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,37,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K24        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,49,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K25        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,27,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K26        | 2,76,E+04                   | 2,17,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,51,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 2,17,E+03           | No                   |
| K27        | 2,76,E+04                   | 8,48,E+02              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,37,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 8,48,E+02           | No                   |
| K28        | 2,76,E+04                   | 0,00,E+00              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,25,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 0,00,E+00           | Sí                   |
| K29        | 2,76,E+04                   | 3,01,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,15,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 3,01,E+03           | No                   |
| K30        | 2,76,E+04                   | 7,00,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 2,69,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 7,00,E+03           | No                   |
| K31        | 2,76,E+04                   | 6,23,E+03              | Sí                      | 8,60,E+02  | 3,00,E+02  | Sí                          | 0,00,E+00                | 6,23,E+03           | No                   |

**Cuadro 35.** Demanda en los amortiguadores viscosos producto del Terremoto de Damas.

| No. de amortiguador viscoso | Capacidad axial (KN) | Carga axial máxima (KN) | ¿Cumple por carga axial | Capacidad máxima de desplazamiento axial (mm) | Desplazamiento axial máximo (mm) | ¿Cumple por desplazamiento? |
|-----------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|---|----------------------------------|-----------------------------|
| K33                         | 2,00,E+03            | 2,86,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 8,88,E+00                        | Sí                          |
| K36                         | 2,00,E+03            | 3,29,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,08,E+01                        | Sí                          |
| K39                         | 2,00,E+03            | 4,17,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,35,E+01                        | Sí                          |
| K44                         | 2,00,E+03            | 3,89,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,34,E+01                        | Sí                          |
| K47                         | 2,00,E+03            | 4,39,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,50,E+01                        | Sí                          |
| K49                         | 2,00,E+03            | 5,19,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,23,E+01                        | Sí                          |
| K53                         | 2,00,E+03            | 5,16,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,35,E+01                        | Sí                          |
| K55                         | 2,00,E+03            | 5,38,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,44,E+01                        | Sí                          |
| K32                         | 2,00,E+03            | 2,45,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 6,86,E+00                        | Sí                          |
| K35                         | 2,00,E+03            | 2,60,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 7,82,E+00                        | Sí                          |
| K38                         | 2,00,E+03            | 3,16,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 9,76,E+00                        | Sí                          |
| K41                         | 2,00,E+03            | 1,04,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 2,76,E+00                        | Sí                          |
| K43                         | 2,00,E+03            | 1,95,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 6,28,E+00                        | Sí                          |
| K46                         | 2,00,E+03            | 3,53,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,07,E+01                        | Sí                          |
| K48                         | 2,00,E+03            | 4,21,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 8,70,E+00                        | Sí                          |
| K51                         | 2,00,E+03            | 3,02,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 6,30,E+00                        | Sí                          |
| K52                         | 2,00,E+03            | 4,13,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 9,83,E+00                        | Sí                          |
| K54                         | 2,00,E+03            | 4,29,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,05,E+01                        | Sí                          |
| K1                          | 2,00,E+03            | 2,13,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 4,69,E+00                        | Sí                          |
| K2                          | 2,00,E+03            | 4,73,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,47,E+01                        | Sí                          |
| K20                         | 2,00,E+03            | 2,00,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 3,63,E+00                        | Sí                          |
| K21                         | 2,00,E+03            | 1,86,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 3,61,E+00                        | Sí                          |
| K22                         | 2,00,E+03            | 2,09,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 4,51,E+00                        | Sí                          |
| K34                         | 2,00,E+03            | 2,09,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 4,98,E+00                        | Sí                          |
| K37                         | 2,00,E+03            | 2,44,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 5,86,E+00                        | Sí                          |
| K40                         | 2,00,E+03            | 2,91,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 8,47,E+00                        | Sí                          |
| K42                         | 2,00,E+03            | 2,18,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 6,04,E+00                        | Sí                          |
| K45                         | 2,00,E+03            | 2,55,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 5,76,E+00                        | Sí                          |

**Cuadro 36.** Demanda en los amortiguadores viscosos producto del Terremoto de Sámara.

| No. de amortiguador viscoso | Capacidad axial (KN) | Carga axial máxima (KN) | ¿Cumple por carga axial | Capacidad máxima de desplazamiento axial (mm) | Desplazamiento axial máximo (mm) | ¿Cumple por desplazamiento? |
|-----------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|---|----------------------------------|-----------------------------|
| K33                         | 2,00,E+03            | 2,44,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,00,E+01                        | Sí                          |
| K36                         | 2,00,E+03            | 2,78,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,21,E+01                        | Sí                          |
| K39                         | 2,00,E+03            | 3,43,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,36,E+01                        | Sí                          |
| K44                         | 2,00,E+03            | 2,90,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,21,E+01                        | Sí                          |
| K47                         | 2,00,E+03            | 4,28,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,40,E+01                        | Sí                          |
| K49                         | 2,00,E+03            | 4,73,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,47,E+01                        | Sí                          |
| K53                         | 2,00,E+03            | 4,23,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,45,E+01                        | Sí                          |
| K55                         | 2,00,E+03            | 4,35,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,44,E+01                        | Sí                          |
| K32                         | 2,00,E+03            | 1,87,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 8,12,E+00                        | Sí                          |
| K35                         | 2,00,E+03            | 2,06,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 9,23,E+00                        | Sí                          |
| K38                         | 2,00,E+03            | 2,53,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 9,88,E+00                        | Sí                          |
| K41                         | 2,00,E+03            | 7,11,E+01               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 2,18,E+00                        | Sí                          |
| K43                         | 2,00,E+03            | 1,42,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 5,17,E+00                        | Sí                          |
| K46                         | 2,00,E+03            | 3,10,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 9,74,E+00                        | Sí                          |
| K48                         | 2,00,E+03            | 3,84,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,05,E+01                        | Sí                          |
| K51                         | 2,00,E+03            | 2,75,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 7,27,E+00                        | Sí                          |
| K52                         | 2,00,E+03            | 3,30,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,08,E+01                        | Sí                          |
| K54                         | 2,00,E+03            | 3,32,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 1,03,E+01                        | Sí                          |
| K1                          | 2,00,E+03            | 1,66,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 5,02,E+00                        | Sí                          |
| K2                          | 2,00,E+03            | 1,73,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 4,91,E+00                        | Sí                          |
| K20                         | 2,00,E+03            | 1,83,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 4,50,E+00                        | Sí                          |
| K21                         | 2,00,E+03            | 1,65,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 4,12,E+00                        | Sí                          |
| K22                         | 2,00,E+03            | 1,95,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 5,39,E+00                        | Sí                          |
| K34                         | 2,00,E+03            | 1,92,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 5,93,E+00                        | Sí                          |
| K37                         | 2,00,E+03            | 1,72,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 5,34,E+00                        | Sí                          |
| K40                         | 2,00,E+03            | 2,07,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 6,88,E+00                        | Sí                          |
| K42                         | 2,00,E+03            | 1,56,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 4,64,E+00                        | Sí                          |
| K45                         | 2,00,E+03            | 2,20,E+02               | Sí                      | 7,50,E+01                                     | 5,67,E+00                        | Sí                          |

### 9.3.7 Apéndice C.7: Parámetros mínimos de diseño del LRB según normativas consultadas

Por las limitaciones que se mencionaron a la hora de presentar las ecuaciones de revisión del sistema de aislamiento sísmico, sólo se calcula la capacidad de desplazamiento horizontal mínimo que el sistema de aislamiento debería de soportar durante el sismo máximo.

- Aproximación de período de la estructura aislada:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Mmin} g}} = 2\pi \sqrt{\frac{160\,944\,000}{26 * 5 * 9810}} = 2,23 \text{ s}$$

Como el período calculado anteriormente es menor al período del edificio de base convencional, se toma  $T_M = 4,04 \text{ s}$ , que corresponde al período fundamental de la estructura aislada.

- Aceleración máxima espectral con  $T=1 \text{ s}$ , para considerar el sismo máximo (factor de importancia  $I=1,25$ ) y el espectro de diseño para la zona sísmica, el tipo de suelo y ductilidad y sobrerresistencia unitaria.

$$S_{M1} = IFED a_{ef} = 1,25(2,4)(0,36) = 1,08g$$

- Desplazamiento máximo de la estructura durante el sismo máximo, sabiendo que los LRB aportan aproximadamente 10% de amortiguamiento.

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4\pi^2 B_M} = \frac{9810 * 1,08 * 4,04}{4\pi^2 (1,2)} = 904,43 \text{ mm}$$

- Desplazamiento máximo en el sismo máximo (corrección):

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_M}\right)^2}} = \frac{904,43}{\sqrt{1 + \left(\frac{2,32}{4,04}\right)^2}} = 784,3 \text{ mm}$$

- Centro de rigidez en el nivel de aislamiento:

- $X_{CR}=14,73 \text{ m}$
- $Y_{CR}=17,26 \text{ m}$

- Centro de masa en el nivel de aislamiento:
  - $X_{CM}=14,94$  m
  - $Y_{CM}=18,56$  m
- Excentricidades en el nivel de aislamiento:
  - $e_x=0,21$  m
  - $e_y=1,30$  m
- Desplazamiento total máximo con sismo en sentido Y (LRB más alejado del centro de rigidez):

$$D_{TM} = D'_M \left[ 1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] = 784,3 \left[ 1 + 17,26 \frac{12(210 + 0,05 * 29070)}{29070^2 + 36490^2} \right] = 784,4 \text{ mm}$$

- Desplazamiento total máximo con sismo en sentido X (LRB más alejado del centro de rigidez):

$$D_{TM} = D'_M \left[ 1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] = 784,3 \left[ 1 + 14,94 \frac{12(1300 + 0,05 * 36490)}{29070^2 + 36490^2} \right] = 784,5 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el LRB debería de ser diseñado para tener una capacidad de desplazamiento máximo como mínimo de:

$$\Delta_{max_{min}} = 0,8D_{TM,max} = 0,8(784,5) = 627,6 \text{ mm}$$



## 10 Anexos

### 10.1 Anexo A: Catálogo de LRB de DIS

El catálogo de LRB de Dynamic Isolation Systems (DIS) brinda las siguientes propiedades mecánicas de los dispositivos para una condición de sismo máximo.

**Cuadro 37.** Propiedades mecánicas de los LRB de DIS.

| Diámetro del LRB $D_i$ (mm) | Propiedades de diseño                 |                                  |                                       | Desplazamiento máximo $D_{max}^7$ (mm) | Capacidad axial máxima $P_{max}$ (KN) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|
|                             | Rigidez post-fluencia $K_d^8$ (KN/mm) | Fuerza característica $Q_d$ (KN) | Rigidez a la compresión $K_v$ (KN/mm) |  |                                       |
| 305                         | 0,2-0,9                               | 0-65                             | >50                                   | 150                                    | 450                                   |
| 355                         | 0,2-1,2                               | 0-65                             | >100                                  | 150                                    | 700                                   |
| 405                         | 0,3-1,6                               | 0-110                            | >100                                  | 200                                    | 900                                   |
| 455                         | 0,3-2,0                               | 0-110                            | >100                                  | 250                                    | 1 150                                 |
| 520                         | 0,4-2,3                               | 0-180                            | >200                                  | 300                                    | 1 350                                 |
| 570                         | 0,5-2,8                               | 0-180                            | >500                                  | 360                                    | 1 800                                 |
| 650                         | 0,5-3,5                               | 0-220                            | >700                                  | 410                                    | 2 700                                 |
| 700                         | 0,5-4,2                               | 0-220                            | >800                                  | 460                                    | 3 100                                 |
| 750                         | 0,7-4,7                               | 0-265                            | >900                                  | 460                                    | 3 600                                 |
| 800                         | 0,7-5,3                               | 0-265                            | >1 000                                | 510                                    | 4 000                                 |
| 850                         | 0,7-6,1                               | 0-355                            | >1 200                                | 560                                    | 4 900                                 |
| 900                         | 0,7-6,1                               | 0-355                            | >1 400                                | 560                                    | 5 800                                 |
| 950                         | 0,7-6,1                               | 0-490                            | >1 800                                | 610                                    | 6 700                                 |
| 1 000                       | 0,8-6,3                               | 0-490                            | >1 900                                | 660                                    | 7 600                                 |
| 1 050                       | 0,9-6,3                               | 0-580                            | >2 100                                | 710                                    | 8 500                                 |
| 1 160                       | 1,1-6,5                               | 0-665                            | >2 800                                | 760                                    | 13 800                                |
| 1 260                       | 1,2-6,7                               | 0-755                            | >3 700                                | 810                                    | 20 500                                |
| 1 360                       | 1,4-7,0                               | 0-890                            | >5 100                                | 860                                    | 27 600                                |
| 1 450                       | 1,6-7,2                               | 0-1 025                          | >5 300                                | 910                                    | 33 400                                |
| 1 550                       | 1,8-7,4                               | 0-1 025                          | >6 500                                | 910                                    | 40 000                                |

Fuente: DIS, 2007.

Modificado por Eskenazi, 2018.

<sup>7</sup> Conocido como  $d_{db}$  en esta investigación.

<sup>8</sup> Conocido como  $K_2$  en esta investigación. El fabricante establece que este valor es un décimo de la rigidez elástica de los aisladores.

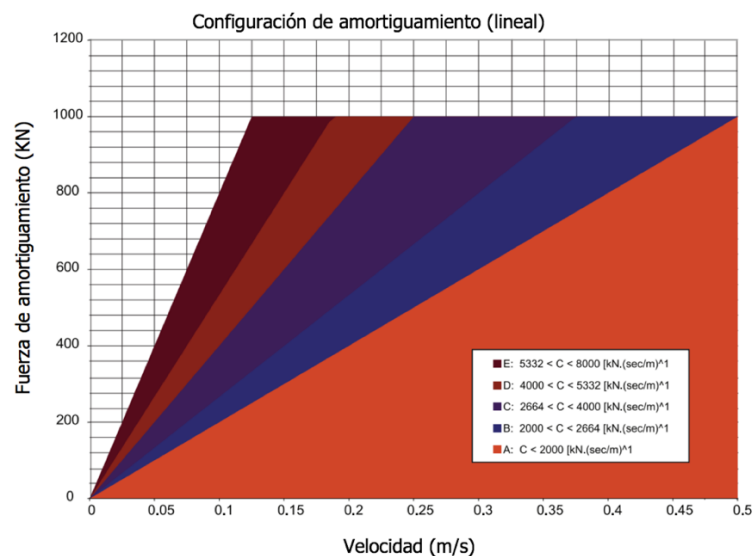
## 10.2 Anexo B: Catálogo de amortiguadores viscosos de ITT Infrastructure

**Cuadro 38.** Propiedades mecánicas de algunos amortiguadores viscosos de ITT Infrastructure.

| Modelo         | Máxima fuerza de amortiguamiento (KN) | Máxima deformación axial (mm) | Peso unitario (kg) |
|----------------|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| FVD-H-500-150  | 500                                   | 75                            | 80                 |
| FVD-H-750-150  | 750                                   | 75                            | 125                |
| FVD-H-1000-150 | 1000                                  | 75                            | 173                |
| FVD-H-1500-150 | 1500                                  | 75                            | 274                |
| FVD-H-2000-150 | 2000                                  | 75                            | 385                |

Fuente: ITT Infrastructure, 2007.

Modificado por Eskenazi, 2018.



**Figura 96.** Relación fuerza-velocidad de los amortiguadores viscosos de ITT Infrastructure.

Fuente: ITT Infrastructure, 2007.

Modificado por Eskenazi, 2018.