



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS.

**EVALUACIÓN DE LOS ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES EN ESTRUCTURAS
EQUIPADAS CON AISLAMIENTO SÍSMICO DEL TIPO DESLIZANTE EN SUELOS
BLANDOS DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
SERGIO ERNESTO OROZCO BAUTE

TUTOR PRINCIPAL
DR. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA
INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, OCTUBRE DE 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente:

Secretario:

1.er Vocal:

2.do Vocal:

3.er Vocal:

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. HÉCTOR GUERRERO BOBADILLA

DEDICATORIA

A mis padres, Ernesto y Ángeles por su apoyo incondicional, quienes son la inspiración y la base de cada una de mis metas logradas.

A mis hermanos, Marco, Yara y Mauricio que de igual forma me han apoyado a lo largo de la vida.

A mi novia Paola, por su constante apoyo y motivación durante mis estudios de maestría.

A mis amigos Davis y Bernardo, por apoyarme cuando más los necesito, por extender su mano en momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Héctor Guerrero Bobadilla, por darme la oportunidad de trabajar con él, brindándome su tiempo, conocimientos y paciencia durante el desarrollo del presente trabajo.

A mis compañeros de maestría, Fernando, Oscar, Luis por su asesoría y retroalimentación brindada durante el desarrollo del presente trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, por darme la oportunidad de estudiar una carrera y permitirme continuar con mi formación profesional.

Al instituto de Ingeniería de la UNAM, por brindarme los recursos necesarios para la publicación de los artículos obtenidos en el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al consejo nacional de ciencia y tecnología CONACYT, por brindarme apoyo económico, través de una beca, durante mis estudios de maestría.

RESUMEN

México es un país de sismicidad alta, lo que ha generado grandes daños en las edificaciones. Por otro lado, los avances científicos alrededor del mundo han permitido generar nuevas tecnologías, las cuales permiten proteger a las estructuras de las demandas sísmicas. Sin embargo, en México, la implementación de estas tecnologías de protección sísmica ha sido poco considerada, y es común el uso de sistemas sismorresistentes convencionales.

Dentro de la gama amplia de sistemas de protección sísmica, los aisladores sísmicos se encuentran en un lugar privilegiado, ya que permiten reducir de manera efectiva los daños excesivos que se presentan en las estructuras, producto de las demandas ocasionadas por el movimiento del terreno. Este tipo de dispositivos buscan desacoplar el período de oscilación la estructura con el del terreno, mediante el alargamiento del periodo, con el fin de reducir las demandas sísmicas y los daños. Sin embargo, es importante evaluar los efectos que causan algunos fenómenos, como los hundimientos diferenciales que pueden presentarse en las estructuras, con la intención de evitar un mal desempeño ante eventos sísmicos severos.

En este trabajo se analiza el impacto de los asentamientos diferenciales en estructuras equipadas con aislamiento sísmico del tipo deslizante, en una serie de estructuras de concreto y acero, ubicadas en la Ciudad de México, en una zona cuyo periodo predominante de vibrar del suelo es de 2 segundos.

Con el fin de poder estudiar de mejor forma estos efectos, el estudio se dividió en dos etapas. En la primera, se realizó el estudio de marcos planos de 3, 6 y 9 niveles de concreto y acero, en los cuales se consideró un modelo convencional (de base rígida) y modelos con base aislada. En la segunda etapa, se realizó el estudio de estructuras tridimensionales sujetas a los asentamientos diferenciales más desfavorables obtenidos en la etapa 1 y además se realizaron análisis dinámicos no lineales con el fin de estudiar la respuesta obtenida y proponer recomendaciones, como límites reglamentarios, para su implementación en la práctica profesional.

ABSTRACT

Mexico is a country of high seismicity. As a consequence, large damage to buildings has been observed after severe earthquakes. Scientific advances around the world have allowed the creation of new technologies, which allow protecting structures from seismic demands. However, in Mexico, the implementation of these seismic protection technologies has been rarely considered, as the use of conventional seismic resistant systems is more common.

Within the wide range of seismic protection systems, seismic isolators are in a privileged place, since they may reduce the excessive damage that occurs in structures, as a result of the demands caused by ground motions. These types of devices aim to decouple the structure's period of vibration to that of the ground by lengthening the period, in order to reduce seismic forces and damage. However, it is important to evaluate the effects caused by some phenomena such as differential settlements, with the intention of avoiding poor performance under severe seismic events.

This research project analyzed the impact of differential settlements in structures equipped with sliding seismic isolators, in a series of concrete and steel structures. These structures are located in Mexico City, in an area whose predominant period of vibration of the ground is 2 seconds.

In order to better understand such effects, this study was divided into two stages. In the first one, the study of 2D, concrete and steel frames of 3, 6 and 9 stories, was carried out. A conventional model (with a fixed base) and models with isolated base (by means of friction pendulum isolators) were considered. In the second stage, the study of three-dimensional structures was carried out. They were subject to the most severe differential settlements obtained in the first stage. Nonlinear dynamic analyzes were conducted in order to study the seismic response of the structures and propose recommendations, such as regulatory limits for its implementation in practice.

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 18 |
| 1.1 | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 18 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 18 |
| 1.2.1 | OBJETIVO GENERAL | 18 |
| 1.2.2 | OBJETIVOS PARTICULARES..... | 19 |
| 1.3 | JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES..... | 19 |
| 1.4 | ORGANIZACIÓN DE LA TESIS..... | 21 |
| 2 | SISTEMAS ESTRUCTURALES AISLADOS..... | 22 |
| 2.1 | CONCEPTO DEL AISLAMIENTO SÍSMICO..... | 22 |
| 2.2 | AISLAMIENTO SÍSMICO EN SUELOS BANDOS..... | 23 |
| 2.2.1 | ESTADO DEL ARTE..... | 24 |
| 3 | SISTEMAS ESTRUCTURALES ESTUDIADOS | 29 |
| 3.1 | CARACTERÍSTICAS GENERALES | 29 |
| 3.2 | CASOS DE ESTUDIO..... | 30 |
| 3.3 | PERIODOS DE LAS ESTRUCTURAS ESTUDIADAS | 32 |
| 3.4 | ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES..... | 34 |
| 3.4.1 | ACERO | 34 |
| 3.4.2 | CONCRETO | 35 |
| 3.5 | COMBINACIONES DE CARGA | 35 |
| 3.6 | REGISTRO SÍSMICO | 39 |
| 3.7 | PROCESAMIENTO DE ACELEROGRAMAS..... | 44 |
| 3.8 | MODELADO MATEMÁTICO..... | 44 |
| 3.8.1 | SUPERESTRUCTURA | 45 |
| 3.8.2 | AISLADORES | 45 |
| 4 | EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA | 47 |
| 4.1 | PARÁMETROS DE EVALUACIÓN..... | 47 |
| 4.1.1 | CARGA VERTICAL EN APOYOS..... | 47 |
| 4.1.2 | ROTACIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO..... | 47 |
| 4.1.3 | DISTORSIÓN LÍMITE DE ENTREPISO..... | 47 |
| 4.1.4 | DESPLAZAMIENTO LÍMITE DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO | 47 |
| 4.2 | RESULTADOS..... | 48 |
| 4.2.1 | RESULTADOS SIMULACIONES 2D EN ACERO..... | 48 |
| 4.2.2 | RESULTADOS SIMULACIONES 2D EN CONCRETO..... | 62 |
| 4.2.3 | RESULTADOS SIMULACIONES 3D EN ACERO..... | 78 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 4.2.4 | RESULTADOS SIMULACIONES 3D EN CONCRETO..... | 82 |
| 4.3 | RESULTADOS ANÁLISIS DINÁMICOS NO LINEALES | 87 |
| 4.3.1 | CASO 0. EDIFICIO DE ACERO DE 9 NIVELES | 87 |
| 4.3.2 | DESPLAZAMIENTOS..... | 87 |
| 4.3.3 | DISTORSIONES | 88 |
| 4.3.4 | SOBRECARGA | 90 |
| 4.3.5 | CASO 0. EDIFICIO DE ACERO DE 9 NIVELES CON DEMANDA SÍSMICA INCREMENTADA EN 50% | 91 |
| 4.3.6 | DESPLAZAMIENTOS..... | 91 |
| 4.3.7 | DISTORSIONES | 92 |
| 4.3.8 | SOBRECARGA | 94 |
| 4.3.9 | ARTICULACIONES PLÁSTICAS | 94 |
| 4.3.10 | CASO 1. EDIFICIO DE ACERO DE 9 NIVELES | 96 |
| 4.3.11 | DESPLAZAMIENTOS..... | 96 |
| 4.3.12 | DISTORSIONES | 98 |
| 4.3.13 | SOBRECARGA | 99 |
| 4.3.14 | ROTACIONES..... | 100 |
| 4.3.15 | CASO 1. EDIFICIO DE ACERO DE 9 NIVELES CONSIDERADO LAS COMPONENTES SÍSMICAS INVERTIDAS | 101 |
| 4.3.16 | DESPLAZAMIENTOS..... | 101 |
| 4.3.17 | DISTORSIONES | 102 |
| 4.3.18 | SOBRECARGA | 104 |
| 4.3.19 | CASO 0. EDIFICIO DE CONCRETO DE 9 NIVELES | 105 |
| 4.3.20 | DESPLAZAMIENTOS..... | 105 |
| 4.3.21 | DISTORSIONES | 106 |
| 4.3.22 | SOBRECARGA | 107 |
| 4.3.23 | ROTACIONES..... | 108 |
| 4.4 | ANÁLISIS DE RESULTADOS | 109 |
| 4.4.1 | RESULTADOS DE SIMULACIONES 2D EN ESTRUCTURAS DE ACERO.... | 109 |
| 4.4.2 | CARGA AXIAL | 109 |
| 4.4.3 | ROTACIONES..... | 110 |
| 4.4.4 | RESULTADOS DE SIMULACIONES 2D EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO 110 | |
| 4.4.5 | CARGA AXIAL | 110 |
| 4.4.6 | ROTACIONES..... | 111 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 4.4.7 | RESULTADOS DE SIMULACIONES 3D EN EDIFICIO DE ACERO..... | 112 |
| 4.4.8 | CARGA AXIAL | 112 |
| 4.4.9 | ROTACIONES..... | 113 |
| 4.4.10 | RESULTADOS DE SIMULACIONES 3D EN EDIFICIO DE CONCRETO... | 113 |
| 4.4.11 | CARGA AXIAL | 113 |
| 4.4.12 | ROTACIONES..... | 114 |
| 4.4.13 | RESULTADOS DE SIMULACIONES DINÁMICAS NO LINEALES..... | 114 |
| 4.4.14 | DESPLAZAMIENTOS..... | 114 |
| 4.4.15 | SOBRECARGA | 115 |
| 4.4.16 | ROTACIONES..... | 115 |
| 5 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 116 |
| 5.1 | CONCLUSIONES | 116 |
| 5.2 | RECOMENDACIONES | 118 |
| | REFERENCIAS..... | 119 |

Lista de figuras

| | |
|--|-----------|
| Figura 1. Fuentes sísmicas que afectan a la ciudad de México (adaptada de Reinoso, 2007). | 20 |
| Figura 2. Esquema sobre la respuesta de una estructura convencional y una estructura aislada. | 23 |
| Figura 3. Espectros de respuesta esquemáticos ilustrando el alargamiento del periodo debido al aislamiento sísmico. | 23 |
| Figura 4. Ejemplos de espectros de respuesta. | 24 |
| Figura 5. Representación esquemática de un aislador sísmico del tipo péndulo de fricción. | 26 |
| Figura 6. Principio del sistema de péndulo de fricción. | 27 |
| Figura 7. diagrama de cuerpo libre del sistema de aislamiento. | 27 |
| Figura 8. Esquemas de las estructuras estudiadas. | 29 |
| Figura 9. Espectro de diseño. | 32 |
| Figura 10. Niveles de asentamiento diferencial en la estructura. | 36 |
| Figura 11. Matriz Factorial Completa para la realización de simulaciones. | 37 |
| Figura 12. Matriz Ortogonal L8. | 37 |
| Figura 13. Acelerogramas de subducción del 1 al 8. | 41 |
| Figura 14. Acelerograma de profundidad intermedia del 1 al 4. | 42 |
| Figura 15. Espectro desplazamientos con amortiguamiento del 5% para la componente 1. | 43 |
| Figura 16. Espectro de desplazamientos con amortiguamiento del 5% para la componente 2. | 43 |
| Figura 17. Registro sísmico procesado correspondiente a sismo de subducción 3. | 44 |
| Figura 18. vista general del modelo matemático empleado. | 46 |
| Figura 19. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 3 niveles, Caso 0. | 48 |
| Figura 20. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 6 niveles, Caso 0. | 49 |
| Figura 21. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0. | 50 |
| Figura 22. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 3 niveles, Caso 1. | 51 |
| Figura 23. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 6 niveles, Caso 1. | 52 |
| Figura 24. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1. | 53 |
| Figura 25. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 3 niveles, Caso 2. | 54 |
| Figura 26. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 6 niveles, Caso 2. | 55 |
| Figura 27. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 2. | 56 |
| Figura 28. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 3 niveles, Caso 1. | 57 |
| Figura 29. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 6 niveles, Caso 1. | 58 |
| Figura 30. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1. | 59 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 31. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 3 niveles, Caso 2..... | 60 |
| Figura 32. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 6 niveles, Caso 2..... | 61 |
| Figura 33. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 2..... | 62 |
| Figura 34. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 3 niveles, Caso 0..... | 63 |
| Figura 35. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 6 niveles, Caso 0..... | 64 |
| Figura 36. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 0..... | 65 |
| Figura 37. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 3 niveles, Caso 1..... | 66 |
| Figura 38. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 6 niveles, Caso 1..... | 67 |
| Figura 39. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 1..... | 68 |
| Figura 40. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 3 niveles, Caso 2..... | 69 |
| Figura 41. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 6 niveles, Caso 2..... | 70 |
| Figura 42. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 2..... | 71 |
| Figura 43. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 3 niveles, Caso 1..... | 72 |
| Figura 44. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 6 niveles, Caso 1..... | 73 |
| Figura 45. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 1..... | 74 |
| Figura 46. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 3 niveles, Caso 2..... | 75 |
| Figura 47. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 6 niveles, Caso 2..... | 76 |
| Figura 48. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 2..... | 77 |
| Figura 49. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0..... | 78 |
| Figura 50. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1..... | 79 |
| Figura 51. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 2..... | 80 |
| Figura 52. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1..... | 80 |
| Figura 53. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 2..... | 81 |

| | |
|---|------------|
| Figura 54. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 0..... | 82 |
| Figura 55. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 1..... | 83 |
| Figura 56. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 2..... | 84 |
| Figura 57. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 1..... | 85 |
| Figura 58. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 2..... | 85 |
| Figura 59. Desplazamientos obtenidos en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0..... | 88 |
| Figura 60. Distorsiones obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0..... | 89 |
| Figura 61. Sobrecargas obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0..... | 90 |
| Figura 62. Desplazamientos obtenidos en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0 amplificando..... | 92 |
| Figura 63. Distorsiones obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0 amplificando..... | 93 |
| Figura 64. Sobrecargas obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0 amplificado..... | 94 |
| Figura 65. Articulaciones plásticas obtenidas en el análisis dinámico no lineal para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0 amplificado sin asentamiento..... | 95 |
| Figura 66. Articulaciones plásticas obtenidas en el análisis dinámico no lineal para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0 amplificado considerado un asentamiento de 11mm..... | 95 |
| Figura 67. Articulaciones plásticas obtenidas en el análisis dinámico no lineal para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0 amplificado considerado un asentamiento de 22mm..... | 96 |
| Figura 68. Desplazamientos obtenidos en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1..... | 97 |
| Figura 69. Distorsiones obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1..... | 98 |
| Figura 70. Sobrecargas obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1..... | 99 |
| Figura 71. Rotaciones obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1..... | 100 |
| Figura 72. Desplazamientos obtenidos en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1 considerando las componentes sísmicas invertidas..... | 102 |
| Figura 73. Distorsiones obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1 considerando las componentes sísmicas invertidas..... | 103 |
| Figura 74. Sobrecargas obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1 considerando las componentes sísmicas invertidas..... | 104 |

| | |
|---|--------------------------------------|
| Figura 75. Desplazamientos obtenidos en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 0..... | 105 |
| Figura 76. Distorsiones obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 0..... | 107 |
| Figura 77. Sobrecargas obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0..... | 107 |
| Figura 78. Análisis dinámico no lineal Caso 2 - 9 Niveles 11mm y Caso 2 - 9 Niveles 22mm. | 109 |
| Figura 79. Resultados estructuras equipadas con aislamiento sísmico bajo el asentamiento normativo..... | 117 |
| Figura 80. Resultados estructuras equipadas con aislamiento sísmico bajo una reducción del asentamiento normativo. | 117 |
| Figura 81. Resultados estructuras sin aislamiento sísmico bajo el asentamiento normativo. | ¡Error! Marcador no definido. |
| Figura 82. Resultados estructuras sin aislamiento sísmico bajo el asentamiento normativo. . | 117 |

Lista de tablas

| | |
|---|-----------|
| Tabla 1. Secciones estructurales empleadas en los modelos matemáticos de acero 2D. | 30 |
| Tabla 2. Secciones estructurales empleadas en los modelos matemáticos de concreto 2D. | 30 |
| Tabla 3. Cargas propuestas para el diseño de la estructura en 3D..... | 31 |
| Tabla 4. Propiedades espectro de respuesta. | 31 |
| Tabla 5. Secciones estructurales calculadas para los modelos matemáticos de acero 3D..... | 32 |
| Tabla 6. Secciones estructurales calculadas para los modelos matemáticos de concreto 3D. ... | 32 |
| Tabla 7. Propiedades físicas del sistema de aislamiento empleado..... | 33 |
| Tabla 8. Periodos fundamentales de las estructuras estudiadas de acero 2D..... | 33 |
| Tabla 9. Periodos fundamentales de las estructuras estudiadas de concreto. | 33 |
| Tabla 10. Periodos fundamentales de las estructuras estudiadas de acero en 2D y 3D..... | 33 |
| Tabla 11. Periodos fundamentales de las estructuras estudiadas de concreto en 2D y 3D..... | 33 |
| Tabla 12. Limites permisible en estructuras de acero. | 34 |
| Tabla 13. Hundimientos simulados en estructuras a base de marcos de acero. | 34 |
| Tabla 14. Limites permisible en estructuras de concreto. | 35 |
| Tabla 15. Hundimientos simulados en estructuras a base de marcos de concreto..... | 35 |
| Tabla 16. Tabla resumen de casos de estudio matriz L8. | 38 |
| Tabla 17. Tabla resumen de la matriz L32. | 38 |
| Tabla 18. Tabla resumen de la matriz L32. | 39 |

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como es sabido, México es un país de sismicidad alta. Durante muchos años, el país ha sufrido eventos sísmicos de gran magnitud, los que ha dejado grandes daños en las edificaciones. Por ello, la implementación de tecnologías de protección sísmica es necesaria. Estas tecnologías ayudan a proteger estructuras nuevas y existentes de daños sísmicos.

Existen múltiples sistemas de protección sísmica, como: amortiguadores histeréticos, disipadores viscosos y aisladores de base. En esta tesis se estudian los aisladores de base. A diferencia del comportamiento que presenta un edificio convencional excitado sísmicamente, el cual disipa energía mediante la deformación lateral generando en múltiples ocasiones grandes daños en las estructuras, un edificio equipado con aislamiento sísmico permanece prácticamente sin deformaciones relativas, lo que reduce daños en sus elementos estructurales. Esto ocurre porque el aislamiento limita la transmisión de la fuerza cortante del suelo a la superestructura.

Sin embargo, se ha comentado, por múltiples investigadores, como: Tena (2020), González y Noguez (1994), que la implementación del aislamiento sísmico en suelos blandos de la ciudad de México es poco eficiente. Ello, a su vez, ha generado una recesión en la investigación e implementación de estas tecnologías a lo largo de todo el país.

Ante lo expuesto anteriormente, y para incentivar el uso de estos dispositivos, es necesario evaluar algunos parámetros dentro de los cuales se destacan los asentamientos diferenciales en estructuras aisladas sísmicamente. Esto con el fin de emitir recomendaciones sobre el uso del aislamiento sísmico en México.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este estudio es evaluar los asentamientos diferenciales de un grupo representativo de edificios estructurados a base de marcos de concreto y acero en dos y tres

dimensiones, equipados con aisladores de base tipo deslizante, ubicados en suelos blandos de la Ciudad de México.

1.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar la sobrecarga en los aisladores sísmicos y columnas, producto de los hundimientos diferenciales, con el fin de establecer recomendaciones para diseño.
- Evaluar las posibles rotaciones y sus implicaciones en los sistemas de aislamiento sísmico provocadas por asentamientos diferenciales.
- Comparar la respuesta sísmica entre edificios equipados con aisladores cuya superestructura fue diseñada para resistir acciones sísmicas, contra aquella de estructuras aisladas diseñadas únicamente por carga gravitacional.
- Fomentar la implementación de sistemas de protección sísmica, de forma particular los aisladores de péndulo de fricción, en la práctica de la ingeniería estructural en México.
- Analizar las ventajas que presentan los sistemas de protección sísmica, en particular los aisladores sísmicos del tipo deslizante, ante estructuras convencionales.

1.3 JUSTIFICACIÓN Y ALCANCES

La justificación de este trabajo se basa en que México está bajo la influencia de múltiples placas tectónicas, las cuales se encuentran interactuando constantemente entre sí. Debido a ello, se experimentan grandes sismos con gran frecuencia en las zonas de profundidad intermedia, subducción y locales (Reinoso, 2007). Ello ha generado grandes daños a lo largo de la historia de nuestro país. En la Figura 1, se ejemplifican las fuentes sísmicas que afectan a la Ciudad de México.





Figura 1. Fuentes sísmicas que afectan a la ciudad de México (adaptada de Reinoso, 2007).

Además, considerando las características de los suelos en la Ciudad de México, se puede determinar que la ciudad es vulnerable ante la acción de los sismos debido a la amplificación de las ondas sísmicas, que se presentan en la zona del lago de la ciudad (Reinoso, 1996). Por tal motivo, se busca la implementación de sistemas de protección que ayuden a reducir los daños que se presentan en las estructuras ante la acción de un sismo.

Sin embargo, es necesario realizar estudios rigurosos sobre la implementación de sistemas como el aislamiento sísmico, ya que se busca mejorar la respuesta de las estructuras. De no analizarse apropiadamente, la implementación de estos sistemas podría producir efectos desfavorables.

Por otra parte, es de gran interés conocer el impacto de la implementación de estos sistemas en estructuras desplantadas en suelos blandos, principalmente cuando se presentan asentamientos diferenciales.

Finalmente, para poder garantizar un adecuado funcionamiento de cualquier dispositivo de protección sísmica, es necesario evaluar su desempeño y las limitaciones que puedan tener.

Este estudio se limita a la evaluación de la respuesta sísmica de marcos de acero y concreto, en 2d y 3d, equipados con aisladores de tipo deslizante, que son sometidos a diferentes niveles de asentamiento diferencial.

1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

El presente trabajo de investigación se encuentra organizado de la siguiente forma:

Capítulo 1. Presenta el planteamiento general del problema. Se describen los objetivos generales y particulares, así como la justificación del trabajo y los alcances de este trabajo de investigación.

Capítulo 2. Se describe el marco teórico. Se describe el concepto de aislamiento sísmico, se presenta el estado del arte sobre los aisladores de tipo deslizante y se presentan las hipótesis bajo las cuales se formula el comportamiento del sistema.

Capítulo 3. Se describen los sistemas estructurales estudiados en el presente trabajo, al igual que sus propiedades principales y los casos de carga analizados. Se describe el modelo utilizado para los diferentes análisis realizados, mencionando sus características y la obtención de los diferentes niveles de asentamientos diferenciales.

Capítulo 4. Se presentan los resultados obtenidos de los análisis dinámicos no lineales (ADNL) y se compara la respuesta obtenida de cada caso contra la respuesta de la estructura sin asentamientos diferenciales. Finalmente, se comparan los resultados entre los distintos casos de estudio.

Capítulo 5. Se ofrecen conclusiones de interés y se emiten recomendaciones.

2 SISTEMAS ESTRUCTURALES AISLADOS

2.1 CONCEPTO DEL AISLAMIENTO SÍSMICO

El principio del aislamiento sísmico es desacoplar el movimiento del terreno del movimiento de la estructura mediante la introducción de dispositivos especiales generalmente ubicados entre la cimentación y la superestructura. Estos dispositivos son normalmente llamados aisladores y son capaces de soportar grandes deformaciones laterales sin dañarse, de manera que, durante un sismo, la estructura montada sobre los aisladores se comporte como un cuerpo rígido y siga el movimiento del sistema de aislamiento con el fin de disminuir las demandas sobre el sistema estructural. Lo contrario ocurre en las estructuras convencionales, mismas que permanecen en pie si su capacidad de deformación lateral es apropiada, aunque se generen daños en los elementos estructurales y no estructurales. En la Figura 2, se muestran las diferencias conceptuales existentes entre estructuras convencionales y las protegidas sísmicamente con aisladores de base. Se puede apreciar que la estructura convencional se deforma (Figura 2^a), mientras que, la estructura aislada se mueve como un cuerpo rígido (Figura 2b).

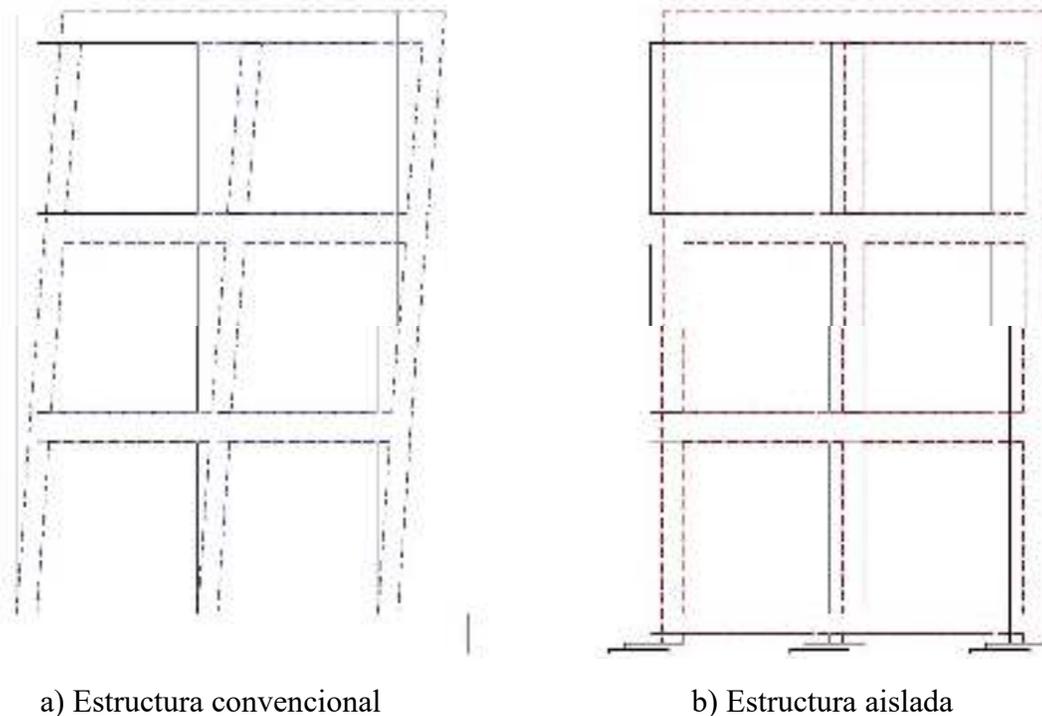


Figura 2. Esquema sobre la respuesta de una estructura convencional y una estructura aislada.

A diferencia de un sistema estructural convencional, en una estructura equipada con aislamiento sísmico, la rigidez que posee el sistema de aislamiento es muy baja en comparación con la rigidez de la estructura. Debido a lo anterior, el periodo fundamental (T) de la estructura aislada es muy largo.

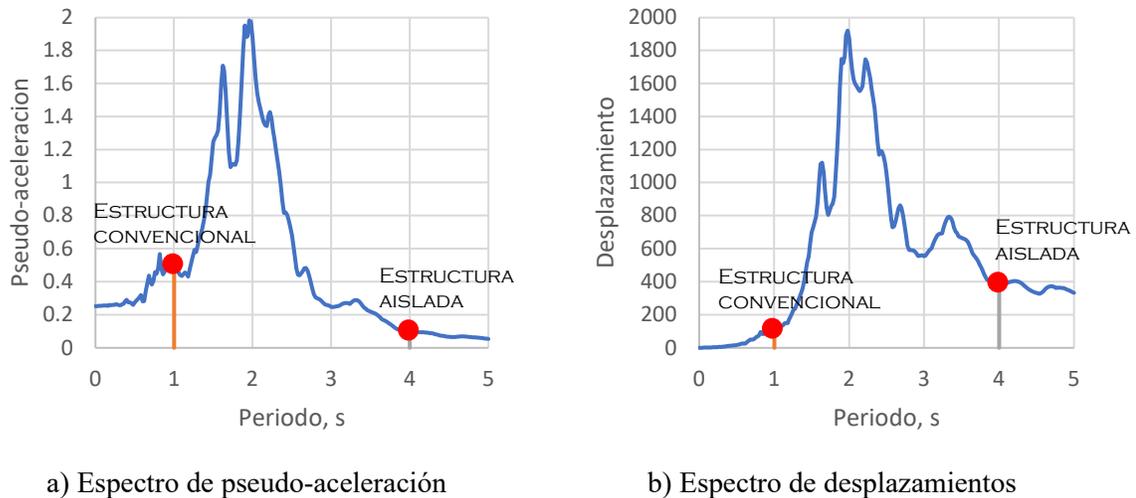


Figura 3. Espectros de respuesta esquemáticos ilustrando el alargamiento del periodo debido al aislamiento sísmico.

En la Figura 3 se muestra de forma general el concepto de aislamiento sísmico. Dado el incremento en el periodo de vibrar de la estructura aislada, la demanda de aceleraciones disminuye considerablemente. Sin embargo, existe un incremento de las demandas de desplazamientos que presenta una estructura aislada respecto a la estructura convencional. No obstante, los desplazamientos que se presentan ocurren en el aislador y no en la superestructura.

2.2 AISLAMIENTO SÍSMICO EN SUELOS BANDOS

En suelos blandos, en donde se pueden encontrar mayores demandas de aceleración (por la amplificación dinámica) y periodos de vibrar de los suelos mayores que los encontrados en suelos firmes, es necesario llevar a la estructura a periodos de vibrar muy largos, con el fin de disminuir de forma significativa la demanda de aceleración. Sin embargo, esto no es sencillo, ya que es necesario realizar diversas revisiones para la implementación del aislamiento sísmico. De lo contrario, se puede llevar a la estructura a la zona de resonancia e incrementar las demandas de aceleración y desplazamientos, lo que implica poner en riesgo

la estructura. En la Figura 4, se muestran, a manera de ejemplo, espectros de pseudo-aceleración y desplazamiento. Se puede observar la zona de resonancia en la cual existen mayores demandas de aceleración al igual que mayores demandas de desplazamiento.

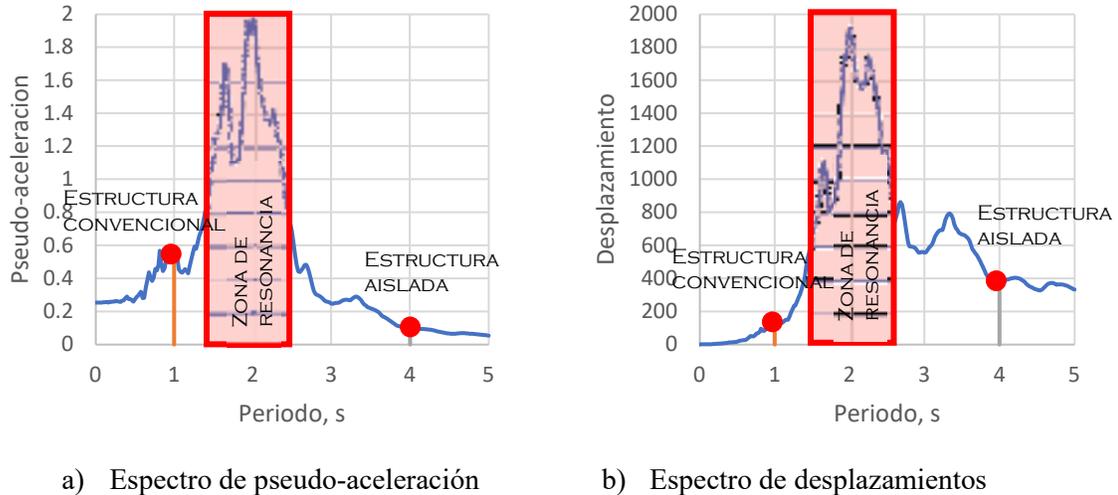


Figura 4. Ejemplos de espectros de respuesta.

A causa de lo anterior, se destaca que existe poca investigación sobre la respuesta de estructuras aisladas desplazadas sobre suelos blandos. Pese a todo, al día de hoy existen dispositivos novedosos como los aisladores del tipo deslizante, que tienen la capacidad de llevar a las estructuras a periodos largos, cercanos (incluso) a los 5 segundos.

2.2.1 ESTADO DEL ARTE

A lo largo de las últimas décadas se han emitido recomendaciones sobre asentamientos diferenciales en estructuras aisladas. Sin embargo, estas recomendaciones, son limitadas, pues no proporcionan mucha información al respecto.

En la Ciudad de México existen algunas aplicaciones del aislamiento sísmico, como lo es el nuevo hospital Salvador Zubirán, el cual fue diseñado con aislamiento sísmico del tipo péndulo de fricción.

Además, aunque no han sido muchos, se han realizado estudios sobre la aplicación de aislamiento sísmico en suelos blandos de la Ciudad de México. González y Noguez (1994) estudiaron la respuesta de un edificio existente de nueve niveles aislado mediante dispositivos de goma con núcleo de plomo, sujeto a la acción de diferentes acelerogramas

representativos de diferentes suelos de la ciudad de México. La estructuración del sistema fue a base de marcos de concreto y una losa plana reticular. El edificio fue desplantado sobre una losa de cimentación apoyada sobre pilotes de punta y se consideraron efectos de interacción suelo estructura. Tena (2007) presentó un estudio sobre la aplicación del aislamiento sísmico en un proyecto de restauración en escuelas para diferentes movimientos sísmicos representativos de diferentes tipos de suelos (firmes y blandos). Evaluó la factibilidad de emplear aislamiento sísmico para nuevas estaciones de la comisión federal de electricidad se planeaban construir en terrenos blandos de la Ciudad de México. Tena (2019), proporciona algunos aspectos a considerar en el diseño de estructuras con aislamiento sísmico en suelos firmes y blandos, se menciona que la aplicación del aislamiento sísmico en terrenos blandos no ofrece grandes ventajas y puede ser contraproducente si implementa sin estudios detallados de sitio y además no se considera la interacción suelo estructura. Por ello se destaca en la consideración, la magnitud de desplazamientos del terreno, la posible respuesta resonante de la estructura, la consideración de las aceleraciones verticales y los hundimientos diferenciales

Adicionalmente, Guerrero et al. (2022) explora el uso del aislador de péndulo de fricción en edificios de mediana y baja altura, de acero, desplantados en la zona del lago de la Ciudad de México. En el cual se evaluó el comportamiento sísmico y se determinó que la probabilidad de colapso estimada para los modelos de tres, seis y nueve niveles, equipados con aisladores de péndulo de fricción, dada una intensidad sísmica, resultó significativamente menor que la estimada para los edificios convencionales.

De las investigaciones en torno al aislamiento sísmico en suelos blandos de la Ciudad de México, se concluye que es necesario realizar más estudios, completos y detallados, de cada proyecto en particular para no incurrir en la posibilidad de que puedan presentarse problemas de inestabilidad dinámica en sistemas aislados. Tanto por potenciales amplificaciones dinámicas, como el cabeceo global o algunos efectos, como asentamientos diferenciales.

El primer aspecto a considerar es modificar el periodo de la estructura. En las estructuras convencionales, es decir las que están conectadas a la cimentación y de la cimentación al suelo, el periodo de la estructura está definido por las propiedades mecánicas y geométricas. En el caso de estructuras aisladas, lo que se busca es llevar a la estructura a un periodo objetivo, para el cual las fuerzas sísmicas no afecten de manera importante. Eso se consigue mediante la definición apropiada de las propiedades de los aisladores.

Existen diferentes tipos de aisladores de tipo deslizante. En este trabajo se estudiaron los de péndulo simple. Los aisladores de péndulo simple se componen de las partes que se muestran en la Figura 5 y que se describen a continuación. En la parte inferior, tienen una placa con superficie cóncava. En la superior tienen una placa que cuenta con una articulación que se desliza sobre la superficie cóncava. Al presentarse un movimiento sísmico, la articulación se desliza y desacopla el movimiento. Existen también los aisladores de péndulo doble, que también tienen una placa cóncava en la parte superior, la cual tiene como ventaja aumentar al doble la capacidad de desplazamiento.

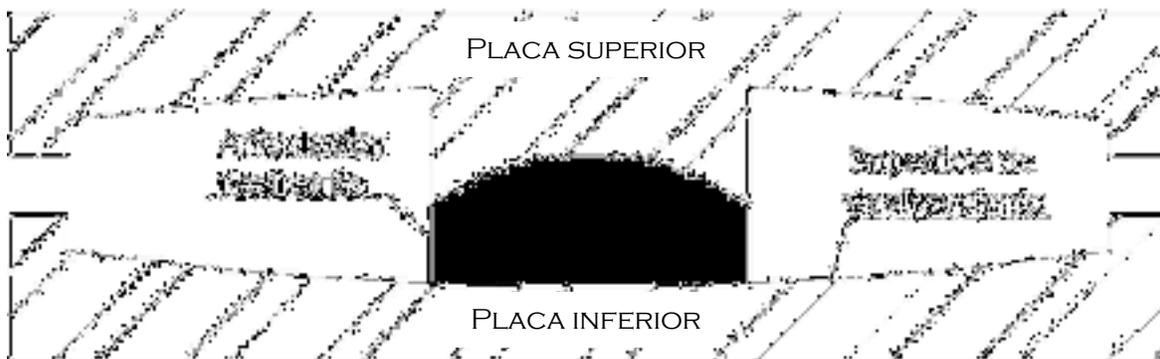


Figura 5. Representación esquemática de un aislador sísmico del tipo péndulo de fricción.

El principio de estos sistemas de aislamiento, se basa en las propiedades de un péndulo simple. Sin fricción.

El periodo de vibrar se puede calcular con la ecuación (2.1):

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (2.1)$$

Donde

L es el radio

g valor de la fuerza de gravedad

En la **Figura 6** se muestra el sistema de fuerzas de un péndulo.

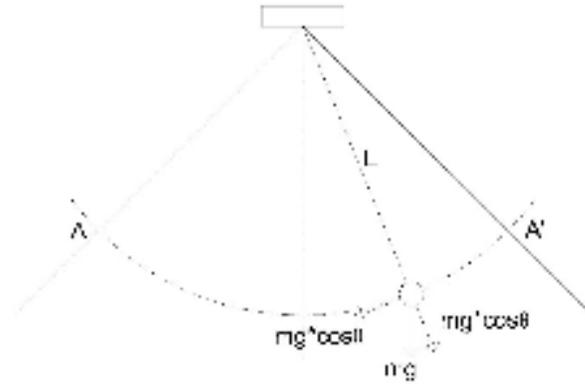


Figura 6. Principio del sistema de péndulo de fricción.

Como se puede observar, la trayectoria que realiza el péndulo es como un semicírculo, Esto se puede interpretar como la concavidad del aislador. Como se puede ver, el periodo fundamental de una estructura aislada con esos dispositivos es independiente de la masa y es controlado únicamente por el radio de curvatura de la superficie cóncava del aislador.

En la Figura 7 se observan las fuerzas que interactúan en el sistema de aislamiento. Se puede observar el peso que está descargando sobre el aislador y el embolo por lo que se pueden observar tres fuerzas que se opondrían al deslizamiento, Fy W, donde F es la fuerza lateral producto de un sismo, W es la carga gravitacional de la estructura, y N es la fuerza normal sobre a superficie cóncava.

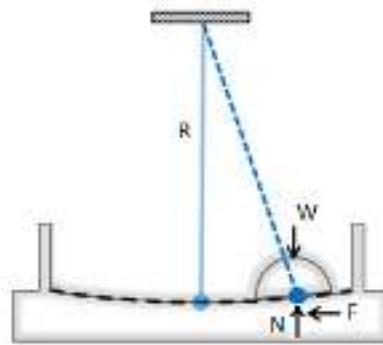


Figura 7. diagrama de cuerpo libre del sistema de aislamiento.

Los aisladores se activan mediante el desplazamiento de la articulación deslizante sobre la superficie cóncava, donde la fricción generada entre el lente y la superficie de deslizamiento ayuda a la disipación de energía.

Es importante mencionar que los sistemas de aislamiento son particularmente efectivos para disminuir las fuerzas de torsión, Lo anterior debido a que el centro de masa de la estructura siempre coincide con el centro de rigidez del sistema aislado.

3 SISTEMAS ESTRUCTURALES ESTUDIADOS

3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

Las estructuras estudiadas en esta investigación fueron diseñadas y estudiadas previamente por Aguilar (2020). La estructuración de los edificios fue a base de marcos de en 2D, de tres, seis y nueve niveles. El primer entrepiso cuenta con una altura de 4 m, mientras que los niveles siguientes tienen una altura de entrepiso de 3 m. La estructura cuenta con seis crujeías separadas 8 m a centros de ejes. Se asume que las estructuras están desplantadas sobre una zona con un periodo de vibrar del suelo cercano a 2 segundos.

Se considera el peso de la estructura en azotea de 461 t y de 576 t para los niveles inferiores. Se estudiaron marcos de acero y concreto. El material empleado en los modelos de acero tenía un esfuerzo de fluencia de $F_y = 3515 \text{ kg/cm}^2$. En la Tabla 2 se presenta el material de los modelos de concreto.

En la Figura 8 se muestra de forma esquemática la configuración de los sistemas estructurales.

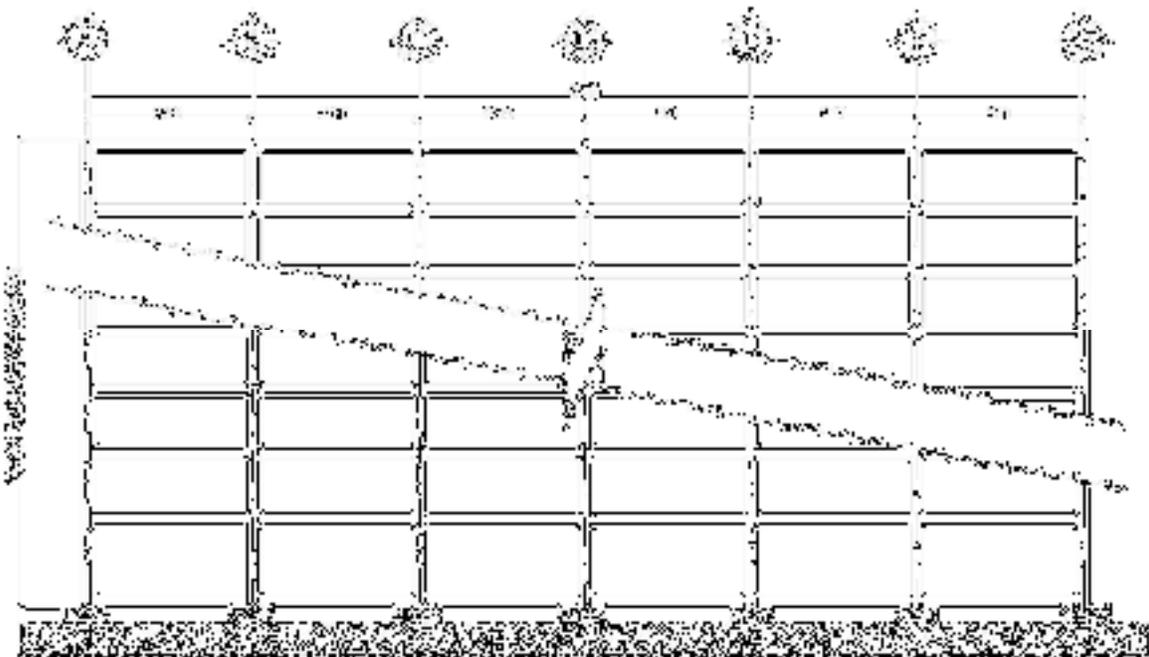


Figura 8. Esquemas de las estructuras estudiadas.

3.2 CASOS DE ESTUDIO

Para realizar el estudio se consideraron los siguientes casos:

- **Caso 0:** Estructura con base rígida diseñada para resistir cargas gravitacionales y fuerzas sísmicas.
- **Caso 1:** Estructura con base aislada diseñada para resistir cargas gravitacionales y fuerzas sísmicas
- **Caso 2:** Estructura con base aislada diseñada únicamente para resistir cargas gravitacionales.

Los casos anteriores fueron propuestos con fines de comparación.

En las siguientes **Tabla 1** y **Tabla 2** se describen las propiedades de los elementos estructurales empleados en cada caso de estudio de los modelos en 2D.

Tabla 1. Secciones estructurales empleadas en los modelos matemáticos de acero 2D.

| Edificio | Nivel | Columnas | | Trabes | |
|-----------|-------|------------|----------|------------|-----------|
| | | Caso 0 y 1 | Caso 2 | Caso 0 y 1 | Caso 2 |
| 3 niveles | 1 | 500 x 25 | 500 x 19 | W 21 x 68 | W 21 x 68 |
| 3 niveles | 2 | 500 x 25 | 500 x 13 | W 21 x 68 | W 21 x 68 |
| 3 niveles | 3 | 500 x 19 | 500 x 13 | W 21 x 62 | W 21 x 62 |
| 6 niveles | 1 - 3 | 600 x 38 | 500 x 16 | W 27 x 94 | W 24 x 68 |
| 6 niveles | 4 - 6 | 600 x 19 | 500 x 13 | W 27 x 84 | W 24 x 68 |
| 9 niveles | 1 - 3 | 900 x 38 | 500 x 25 | W 27 x 129 | W 24 x 68 |
| 9 niveles | 4 - 6 | 900 x 25 | 500 x 16 | W 27 x 102 | W 24 x 68 |
| 9 niveles | 7 - 9 | 800 x 19 | 500 x 13 | W 27 x 84 | W 24 x 68 |

Tabla 2. Secciones estructurales empleadas en los modelos matemáticos de concreto 2D.

| Edificio | Nivel | Columnas | | Trabes | | F'c | |
|-----------|-------|-------------|-----------|------------|---------|------------|--------|
| | | Caso 0 y 1 | Caso 2 | Caso 0 y 1 | Caso 2 | Caso 0 y 1 | Caso 2 |
| 3 niveles | 1 - 2 | 800 x 800 | 450 x 450 | 100 x 40 | 70 x 30 | 300 | 300 |
| 3 niveles | 3 | 800 x 800 | 450 x 450 | 85 x 35 | 65 x 30 | 300 | 300 |
| 6 niveles | 1 - 5 | 1250 x 1250 | 600 x 600 | 100 x 40 | 70 x 30 | 300 | 300 |
| 6 niveles | 6 | 1250 x 1250 | 600 x 600 | 90 x 35 | 65 x 30 | 300 | 300 |
| 9 niveles | 1 - 8 | 1600 x 1600 | 750 x 750 | 120 x 40 | 70 x 30 | 350 | 300 |
| 9 niveles | 9 | 1600 x 1600 | 750 x 750 | 100 x 35 | 65 x 30 | 350 | 300 |

También se estudiaron estructuras tridimensionales. Para su diseño se emplearon las cargas de la **Tabla 3**.

Tabla 3. Cargas propuestas para el diseño de la estructura en 3D.

| Tipo de carga | Carga (kg/m ²) |
|------------------------|----------------------------|
| Carga Muerta | 200 |
| Carga Viva Instantánea | 180 |
| Carga Viva Máxima | 250 |

Las cargas anteriores corresponden a uso de oficinas según las Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones (2017).

Adicionalmente, para el diseño por sismo, se utilizó el programa SASID (2021) disponible en su versión web. La localización de las estructuras se propuso en una zona con un periodo predominante del suelo de 2 segundos, con las siguientes coordenadas.

- Latitud: 19.469345
- Longitud: -99.108115

Bajo las siguientes consideraciones:

- Factor de hiperestaticidad = 0.8
- Factor de importancia = grupo B
- Factor de irregularidad = 1
- Estructura de mampostería = No

Con ello, se obtuvieron los parámetros de diseño de la **Tabla 4**, considerando $Q = 2$.

Tabla 4. Propiedades espectro de respuesta.

| a_0 | c | T_a | T_b | K |
|-------|------|-------|-------|-------|
| 350 | 1490 | 1.3 | 2.3 | 0.149 |

Con esos datos se obtuvo el espectro de diseño de la **Figura 9** para el factor de comportamiento sísmico $Q = 2$

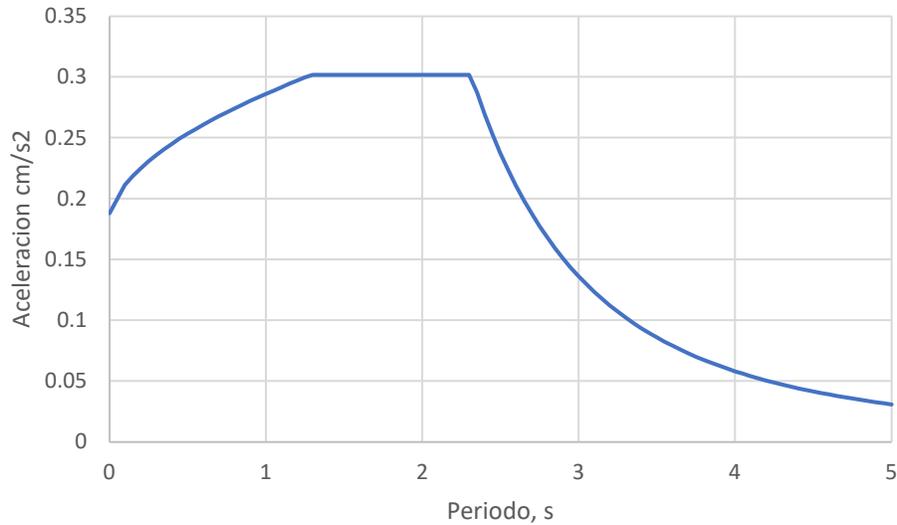


Figura 9. Espectro de diseño.

Bajo las condiciones de carga descritas se realizó el diseño de la estructura en 2D. En las tablas 5 y 6 se presentan las propiedades de los elementos estructurales obtenidos para cada caso de estudio.

Tabla 5. Secciones estructurales calculadas para los modelos matemáticos de acero 3D.

| Edificio | Nivel | Columnas | | Trabes | |
|-----------|-------|------------|----------|------------|-----------|
| | | Caso 0 y 1 | Caso 2 | Caso 0 y 1 | Caso 2 |
| 9 niveles | 1 - 9 | 600 x 19 | 350 x 13 | W 27 x 84 | W 27 x 84 |

Tabla 6. Secciones estructurales calculadas para los modelos matemáticos de concreto 3D.

| Edificio | Nivel | Columnas | | Trabes | |
|-----------|-------|------------|-----------|------------|---------|
| | | Caso 0 y 1 | Caso 2 | Caso 0 y 1 | Caso 2 |
| 9 niveles | 1 - 9 | 900 x 900 | 800 x 800 | 90 x 40 | 90 x 40 |

3.3 PERIODOS DE LAS ESTRUCTURAS ESTUDIADAS

Para las estructuras de base rígida, los periodos quedan definidos en función de la rigidez de las columnas y la masa de la estructura. Para las estructuras equipadas con aisladores sísmico del tipo péndulo de fricción, el periodo de estas es independiente de la masa de la superestructura lo que ofrece la ventaja de definir un periodo objetivo al que se quiere llevar a la estructura mediante la selección del radio de curvatura. Ya que las estructuras son

desplantadas en la zona del lago de la ciudad de México, se definió como periodo objetivo $T_b = 4$ segundos.

En la **Tabla 7** se muestran las propiedades utilizadas en los aisladores sísmicos del tipo péndulo de fricción.

Tabla 7. Propiedades físicas del sistema de aislamiento empleado.

| Tb (S) | R (m) | μ_{max} | μ_{min} | A (sec/cm) |
|--------|-------|-------------|-------------|------------|
| 4.01 | 4 | 0.040 | 0.040 | 1 |

A continuación, se muestran los periodos fundamentales para cada caso de estudio, para estructuras con base rígida, así como para estructuras con base aislada.

Tabla 8. Periodos fundamentales de las estructuras estudiadas de acero 2D.

| Edificio | Base rígida, Ts (s) | | Base aislada, Tb (s) | |
|-----------|---------------------|--------|----------------------|--------|
| | Caso 0 y 1 | Caso 2 | Caso 0 y 1 | Caso 2 |
| 3 niveles | 0.85 | 0.91 | 4.01 | 4.01 |
| 6 niveles | 1.17 | 1.71 | 4.01 | 4.01 |
| 9 niveles | 1.4 | 2.48 | 4.01 | 4.01 |

Tabla 9. Periodos fundamentales de las estructuras estudiadas de concreto.

| Edificio | Base rígida, Ts (s) | | Base aislada, Tb (s) | |
|-----------|---------------------|--------|----------------------|--------|
| | Caso 0 y 1 | Caso 2 | Caso 0 y 1 | Caso 2 |
| 3 niveles | 0.49 | 0.99 | 4.01 | 4.01 |
| 6 niveles | 0.73 | 1.61 | 4.01 | 4.01 |
| 9 niveles | 0.83 | 2.26 | 4.01 | 4.01 |

De forma similar, en las **Tabla 10** y **Tabla 11** se muestran los periodos para las estructuras tridimensionales.

Tabla 10. Periodos fundamentales de las estructuras estudiadas de acero en 2D y 3D.

| Edificio | Ts (s) | | Tb (s) | |
|----------|------------|--------|------------|--------|
| | Caso 0 y 1 | Caso 2 | Caso 0 y 1 | Caso 2 |
| X | 0.96 | 1.26 | 4.01 | 4.01 |
| Y | 1.02 | 1.31 | 4.01 | 4.01 |

Tabla 11. Periodos fundamentales de las estructuras estudiadas de concreto en 2D y 3D.

| Edificio | Ts (s) | Tb (s) |
|----------|--------|--------|
|----------|--------|--------|

| 9 niveles | Caso 0 y 1 | Caso 2 | Caso 0 y 1 | Caso 2 |
|-----------|------------|--------|------------|--------|
| X | 0.69 | 0.71 | 4.01 | 4.01 |
| Y | 0.73 | 0.74 | 4.01 | 4.01 |

Es importante mencionar que las estructuras rígidas presentan un mayor grado de desacoplamiento, mismo que va disminuyendo conforme la flexibilidad del sistema estructural aumenta. Nótese que, al rediseñar las estructuras, únicamente considerando carga gravitacional, la flexibilidad aumenta.

3.4 ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES

3.4.1 ACERO

Para este estudio se tomaron los límites establecidos en las NTC-CADEE (2017). Dichos límites se presentan en la tabla 12.

Tabla 12. Límites permisibles en estructuras de acero.

| Límite | Niveles |
|--------------------------|-------------------|
| 0.006 | Hasta 4 niveles |
| $0.006(1.255 - 0.0636n)$ | De 4 a 14 niveles |
| 0.0018 | 15 niveles o más |

Donde n es igual al número de niveles.

En la **Tabla 13** se describe detalladamente el asentamiento al que se sometió cada estructura, calculadas según se define en la tabla.

Tabla 13. Hundimientos simulados en estructuras a base de marcos de acero.

| Estructuras | 3 niveles | 6 niveles | 9 niveles |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Hundimiento Diferencial Tolerable. | 0.0048 (10 m.) | 0.0042 (19 m.) | 0.0032 (28 m.) |

Además de hacer simulaciones con los valores de la **Tabla 13**, se realizaron simulaciones, considerando un 50% más y un 50% menos de hundimiento diferencial. Esto con el fin de comparar los resultados con esos escenarios.

3.4.2 CONCRETO

Para este estudio se tomaron los límites establecidos en las NTC-CADEE (2017). Dichos límites se presentan en la tabla

Tabla 14. Límites permisibles en estructuras de concreto.

| Límite | Niveles |
|--------------------------|-------------------|
| 0.004 | Hasta 4 niveles |
| $0.004(1.255 - 0.0636n)$ | De 4 a 14 niveles |
| 0.0012 | 15 niveles o más |

Donde n es igual al número de niveles.

En la **Tabla 15** se describe detalladamente el asentamiento al que se sometió cada estructura, calculadas según se define en la tabla.

Tabla 15. Hundimientos simulados en estructuras a base de marcos de concreto.

| Estructuras | 3 niveles | 6 niveles | 9 niveles |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Hundimiento Diferencial Tolerable. | 0.0032 (10 m.) | 0.0028 (19 m.) | 0.0022 (28 m.) |

Además de hacer simulaciones con los valores de la **Tabla 15**, se realizaron simulaciones, considerando un 50% más y un 50% menos de hundimiento diferencial. Esto con el fin de comparar los resultados con esos escenarios.

3.5 COMBINACIONES DE CARGA

Se consideró que los asentamientos diferenciales se pueden presentar de forma aleatoria en la estructura, por lo que es necesario realizar un diseño experimental con el fin de valorar variaciones en la respuesta.

El diseño de experimentos ha probado ser una herramienta muy poderosa en múltiples campos. En este estudio se realizaron una serie de pruebas en las que se hicieron cambios en las variables de entrada para poder observar e identificar las variaciones que se producen en el sistema.

Para el diseño experimental, se empleó el diseño de Taguchi Naranjo F. (2020). En estos diseños se reconocen factores que causan variabilidad. Para el caso de estudio, se realizaron variaciones en columnas que se asentaban de manera aleatoria.

Al implementar diseños experimentales se puede minimizar el número de simulaciones ya que se plantea una matriz con la que se obtienen datos necesarios para explorar un conjunto de variables para obtener la respuesta global del sistema.

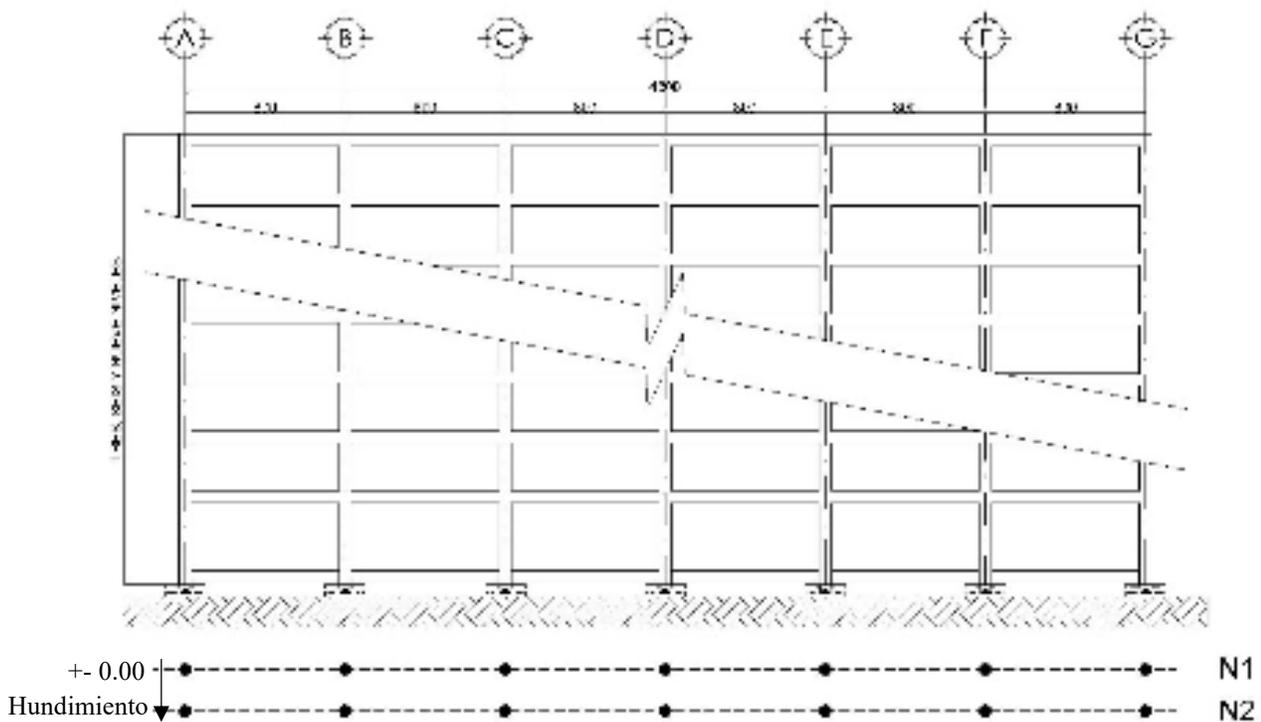


Figura 10. Niveles de asentamiento diferencial en la estructura.

La **Figura 10** muestra los niveles de asentamientos diferenciales simulados en las estructuras, denominados N1 y N2. Como se observa, se plantean escenarios de hundimientos diferenciales. El N1 corresponde al nivel 0.00 y N2 al valor de asentamiento empleado para cada caso de estudio por lo que se obtiene lo siguiente:

$$\text{Numero de analisis} = 2^7 = 128 \text{ casos}$$

Lo anterior se debe a que se tienen 2 niveles de asentamiento y 7 ejes de columnas.

La **Figura 11** se muestra el número de combinaciones a emplear en el estudio sin considerar el diseño experimental. Se tienen 128 combinaciones. En la figura se observa que los ejes de las columnas corresponden del eje A al F. Se consideran dos niveles de asentamiento en las columnas, que corresponden a los valores 1 y 2.

| | | | A1 | | | | | | | | A2 | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | B1 | | | | B2 | | | | B1 | | | | B2 | | | |
| | | | C1 | | C2 | |
| | | | D1 | D2 |
| E1 | F1 | G1 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| | | G2 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| | F2 | G1 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| | | G2 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| E2 | F1 | G1 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| | | G2 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| | F2 | G1 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |
| | | G2 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | |

Figura 11. Matriz Factorial Completa para la realización de simulaciones.

Sin embargo, si se aplica el método de tal forma que la fracción generada ayude únicamente a estimar los efectos principales, las simulaciones restantes se agregan solo de ser requeridas, lo que resulta en la matriz de la **Figura 12**.

| | | | A1 | | | | | | | | A2 | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | B1 | | | | B2 | | | | B1 | | | | B2 | | | |
| | | | C1 | | C2 | |
| | | | D1 | D2 |
| E1 | F1 | G1 | X | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | G2 | | | | | | | | | | | | X | | | | |
| | F2 | G1 | | | | | | | | | | X | | | | | | |
| | | G2 | | | | | | X | | | | | | | | | | |
| E2 | F1 | G1 | | | | | | | X | | | | | | | | | |
| | | G2 | | | | | | | | | X | | | | | | | |
| | F2 | G1 | | | | | | | | | | | X | | | | | |
| | | G2 | | X | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 12. Matriz Ortogonal L8.

Se observa que, de la matriz ortogonal, las combinaciones se reducen significativamente y se obtienen solo ocho combinaciones. En la matriz, cada combinación arroja el asentamiento de la columna, es decir si la columna se asienta o no, por lo que se obtienen las combinaciones de a Tabla 16.

Tabla 16. Tabla resumen de casos de estudio matriz L8.

| | Eje A | Eje B | Eje C | Eje D | Eje E | Eje F | Eje G |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Combinación 1 | N1 |
| Combinación 2 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 |
| Combinación 3 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 |
| Combinación 4 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 |
| Combinación 5 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 |
| Combinación 6 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 |
| Combinación 7 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 |
| Combinación 8 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 |

Al realizar este análisis se obtienen ocho combinaciones, con las cuales, se evalúa la respuesta general del sistema. Sin embargo, el método exige realizar un análisis de medias, considerando los resultados de los modelos empleados, por lo que en algunas combinaciones se presenta una combinación adicional. Esta combinación no se incluyó dentro de la **Tabla 16**.

Además, es importante mencionar que, al reducir el número de combinaciones necesarias para obtener la respuesta general del sistema, se pueden estudiar más escenarios, por lo que se vuelve un estudio más completo.

Por otro lado, para el análisis de las estructuras tridimensionales se utilizó una matriz L32, en la que se tienen las siguientes combinaciones:

$$\text{Numero de analisis} = 2^{28} = 268435456 \text{ casos}$$

Estas combinaciones corresponden a 28 columnas con dos niveles de asentamiento posibles.

Sin embargo, empleando el diseño experimental descrito anterior mente, la cantidad de análisis se reducen a 32. Obteniendo la respuesta de la estructura en los escenarios más desfavorables se puede considerar que se obtiene la respuesta general del campo.

Tabla 17. Tabla resumen de la matriz L32.

| | NODO 1 | NODO 2 | NODO 3 | NODO 4 | NODO 5 | NODO 6 | NODO 7 | NODO 8 | NODO 9 | NODO 10 | NODO 11 | NODO 12 | NODO 13 | NODO 14 |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| COMBINACION 1 | N1 | N1 | N1 | N1 | N1 |
| COMBINACION 2 | N1 | N1 | N1 | N1 | N1 |
| COMBINACION 3 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N2 | N2 | N2 |
| COMBINACION 4 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N2 | N2 | N2 |
| COMBINACION 5 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 |
| COMBINACION 6 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 |
| COMBINACION 7 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 |
| COMBINACION 8 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 |
| COMBINACION 9 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 |
| COMBINACION 10 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 |
| COMBINACION 11 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 |
| COMBINACION 12 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 |
| COMBINACION 13 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 |
| COMBINACION 14 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 |
| COMBINACION 15 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 | N2 |
| COMBINACION 16 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 | N2 |
| COMBINACION 17 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 |
| COMBINACION 18 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 |
| COMBINACION 19 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 |
| COMBINACION 20 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 |
| COMBINACION 21 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 |
| COMBINACION 22 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 |
| COMBINACION 23 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 |
| COMBINACION 24 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 |
| COMBINACION 25 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 |
| COMBINACION 26 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 |
| COMBINACION 27 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 |
| COMBINACION 28 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 |
| COMBINACION 29 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 |
| COMBINACION 30 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 |
| COMBINACION 31 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 |
| COMBINACION 32 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 |

Tabla 18. Tabla resumen de la matriz L32.

| | NODO 15 | NODO 16 | NODO 17 | NODO 18 | NODO 19 | NODO 20 | NODO 21 | NODO 22 | NODO 23 | NODO 24 | NODO 25 | NODO 26 | NODO 27 | NODO 28 |
|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| COMBINACION 1 | N1 |
| COMBINACION 2 | N1 | N2 |
| COMBINACION 3 | N2 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N2 |
| COMBINACION 4 | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 | N1 |
| COMBINACION 5 | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 | N2 |
| COMBINACION 6 | N2 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 |
| COMBINACION 7 | N1 | N1 | N1 | N1 | N1 | N2 | N1 |
| COMBINACION 8 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N2 |
| COMBINACION 9 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 |
| COMBINACION 10 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 |
| COMBINACION 11 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 |
| COMBINACION 12 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 |
| COMBINACION 13 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 |
| COMBINACION 14 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 |
| COMBINACION 15 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 |
| COMBINACION 16 | N2 | N2 | N2 | N1 | N1 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N2 |
| COMBINACION 17 | N2 | N1 |
| COMBINACION 18 | N2 | N2 | N1 | N2 |
| COMBINACION 19 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 |
| COMBINACION 20 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 |
| COMBINACION 21 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 |
| COMBINACION 22 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 |
| COMBINACION 23 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 |
| COMBINACION 24 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 |
| COMBINACION 25 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 |
| COMBINACION 26 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 |
| COMBINACION 27 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 |
| COMBINACION 28 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 |
| COMBINACION 29 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 |
| COMBINACION 30 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 |
| COMBINACION 31 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 |
| COMBINACION 32 | N1 | N2 | N1 | N1 | N2 | N1 | N2 | N2 | N1 | N1 | N2 | N2 | N1 | N2 |

En las tablas 17 y 18 se observan las combinaciones de asentamiento para las 28 columnas para las 32 combinaciones diferentes.

Al emplear este tipo de diseño y reducir el número de combinaciones necesarias se pueden realizar estudios muy completos en un tiempo reducido.

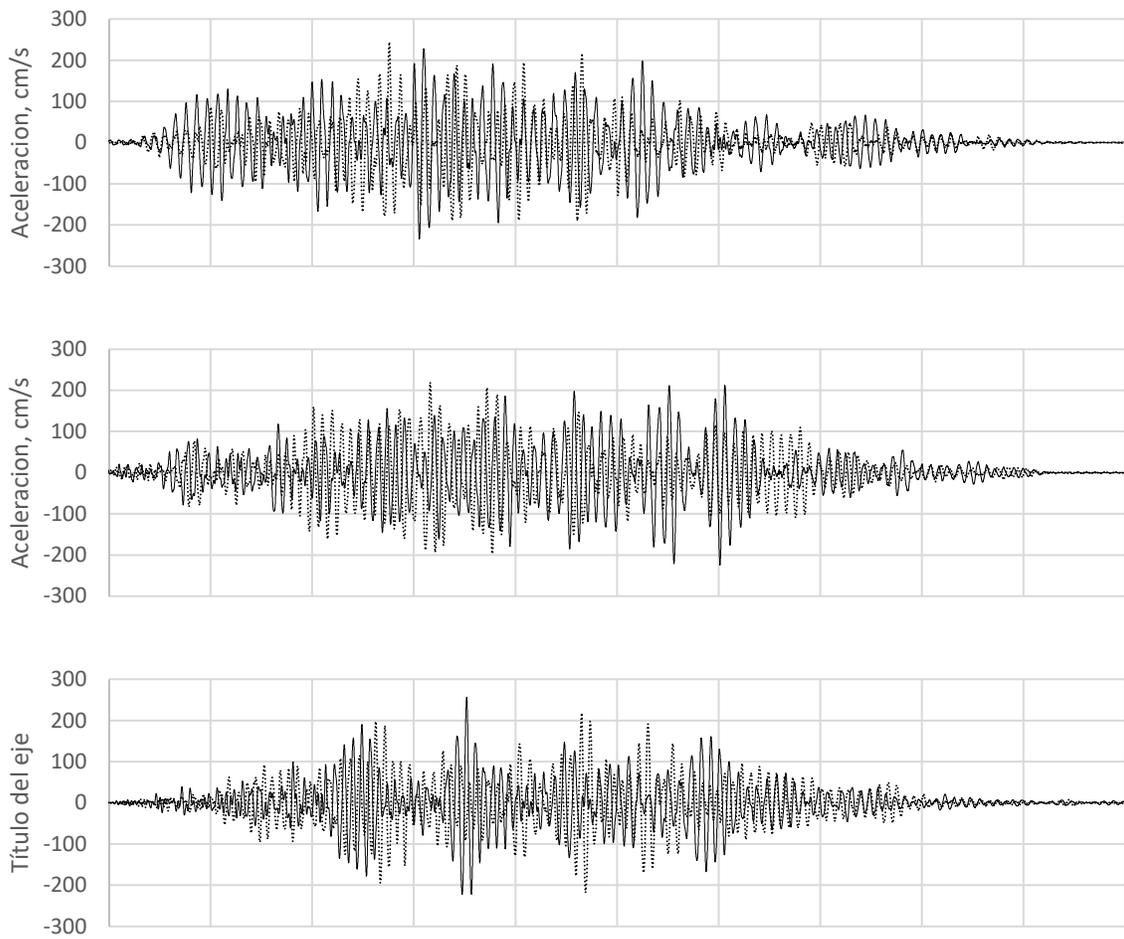
3.6 REGISTRO SÍMICO

Conforme a lo establecido en las NTC-sismo (2017), para realizar un análisis dinámico no lineal, es necesario contar con 12 parejas de acelerogramas para estructuras desplantadas en

suelos con un periodo de vibrar (T_g) mayor o igual a 1 segundo, que es el periodo en cuestión de esta investigación.

Un grupo de acelerogramas artificiales bajo las coordenadas indicadas en el inciso 3.2, fue generado en el programa SASID (2020), en su versión en línea, en los cuales se considera un periodo de retorno de 250 años con un periodo de vibrar del suelo de 2 segundos. Estos movimientos están agrupados por fuentes sísmicas. Ocho parejas de acelerogramas corresponden en a subducción y cuatro a profundidad intermedia.

Las figuras 13 (movimientos de subducción) y 14 (movimientos de profundidad intermedia) muestran los acelerogramas obtenidos de SASID (2020). En cada gráfica, con línea continua gruesa se presenta la aceleración en la componente 1; mientras que la componente 2 se presenta con línea punteada.



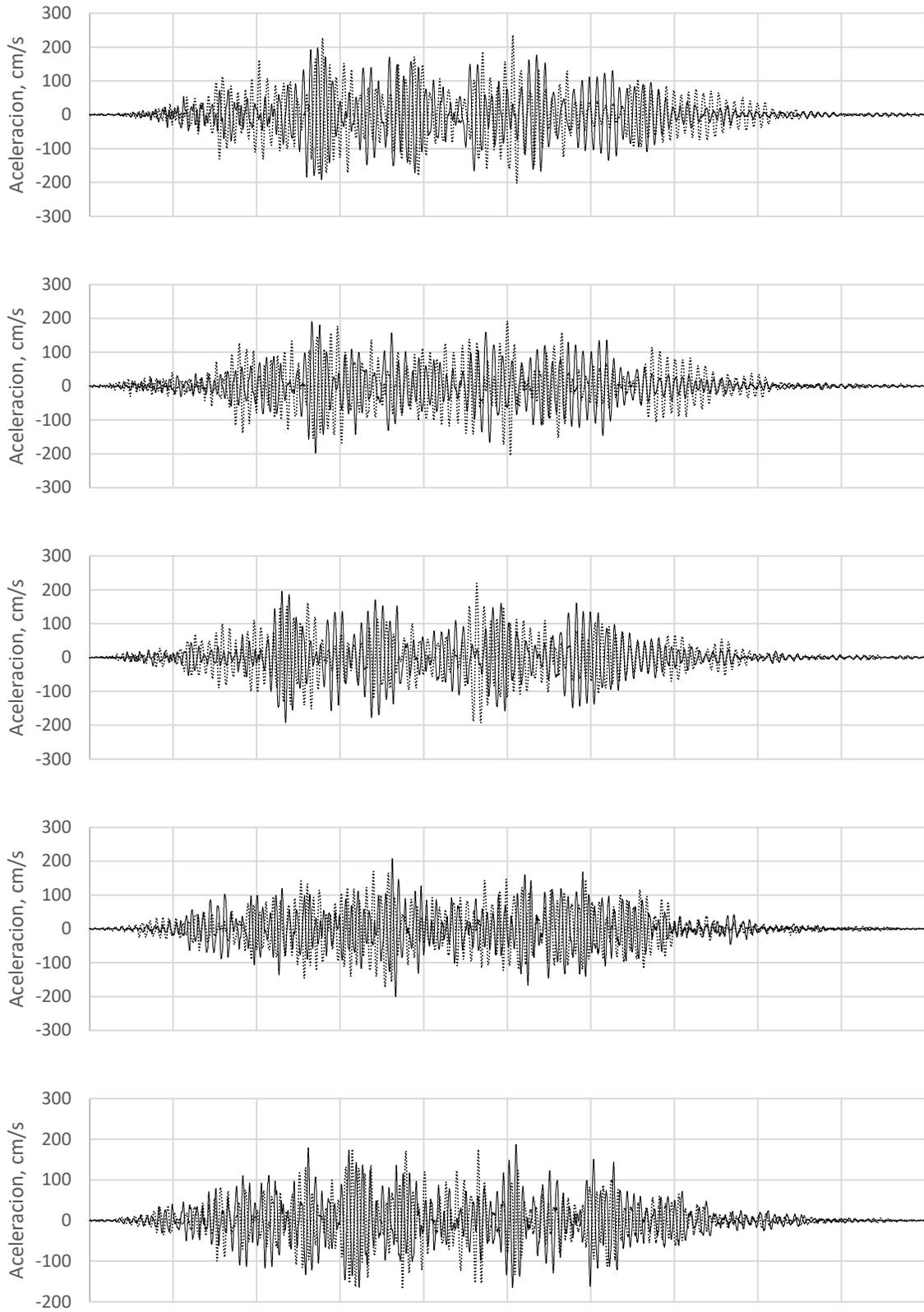


Figura 13. Acelerogramas de subducción del 1 al 8.

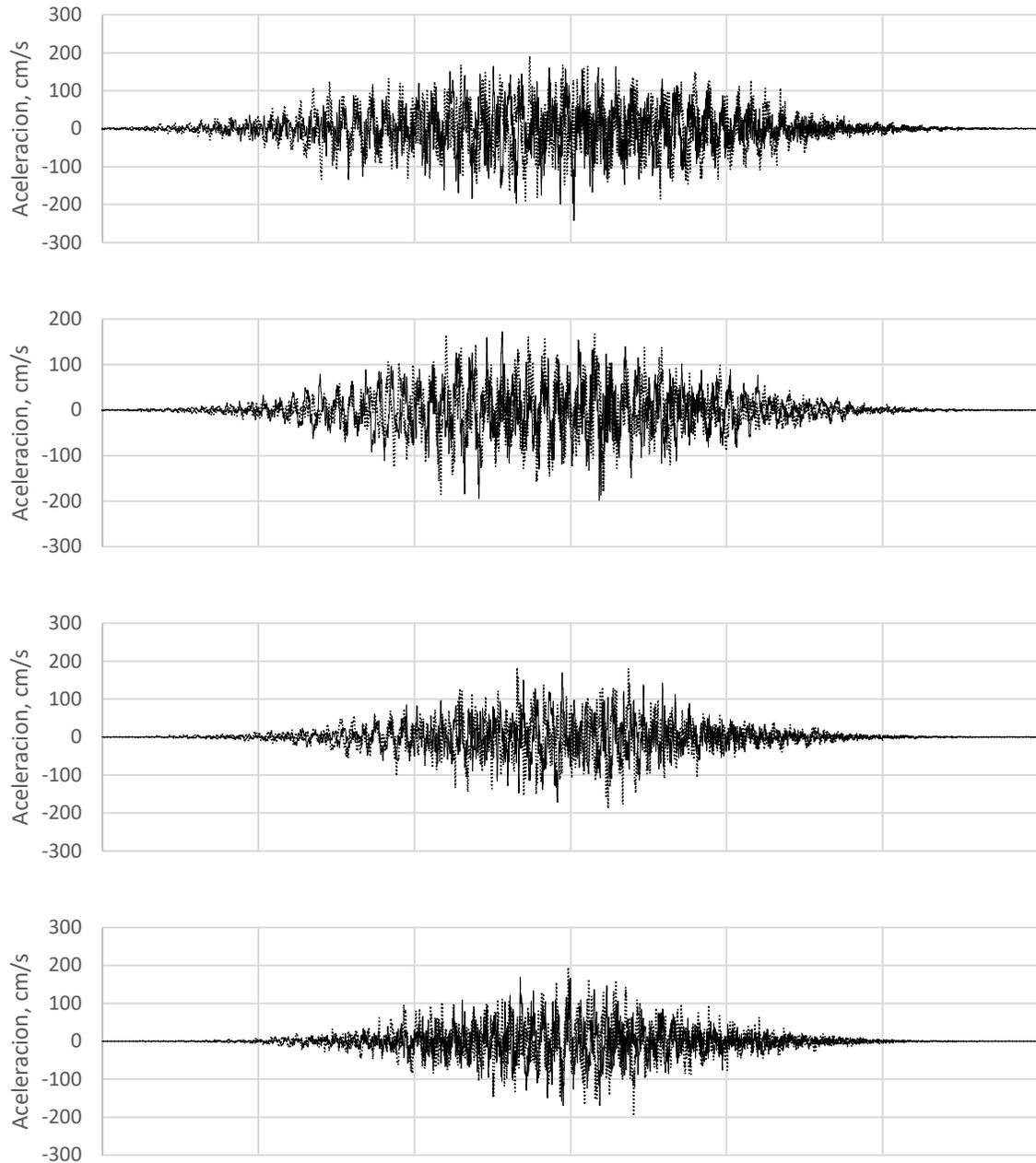


Figura 14. Acelerograma de profundidad intermedia del 1 al 4.

Por simplicidad, en esta tesis sólo se utilizó el acelerograma de subducción no. 3.

A partir de los acelerogramas de las figuras 13 y 14 se calcularon los espectros de desplazamientos considerando un amortiguamiento del 5% del crítico.

Es importante destacar que solo se incluyen los acelerogramas de subducción en la formación de espectros ya que estos resultaron ser los más críticos para la estructura. En las figuras 15 y 16 se muestran los desplazamientos para cada componente.

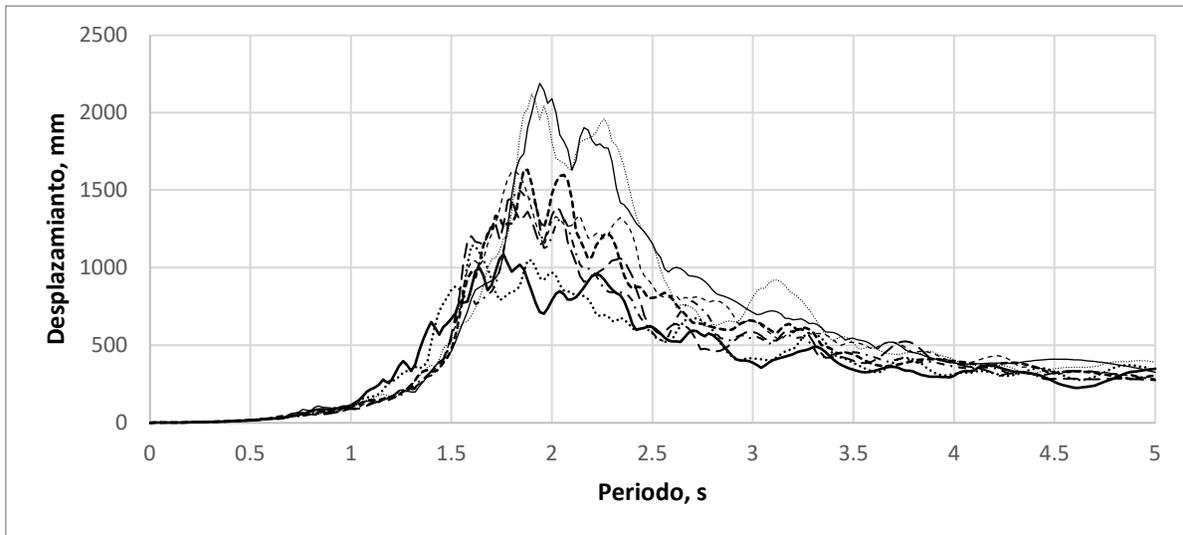


Figura 15. Espectro desplazamientos con amortiguamiento del 5% para la componente 1.

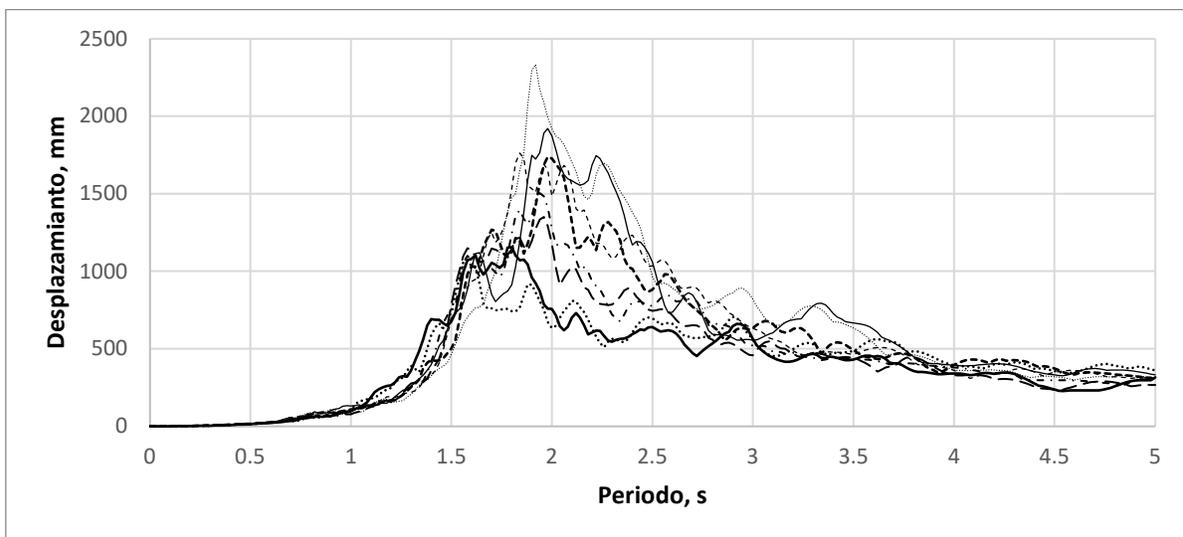


Figura 16. Espectro de desplazamientos con amortiguamiento del 5% para la componente 2.

Dada la extensión del estudio, se realizó la selección de un acelerograma de carga para poder analizar la estructura, se considera el más desfavorable considerando el periodo objetivo de la estructura. Se seleccionó el movimiento de subducción 3, debido a que este presentó las ordenadas espectrales mayores.

3.7 PROCESAMIENTO DE ACELEROGRAMAS

Generalmente, los movimientos sísmicos tienen ruido, lo que ocasiona inconsistencias en los análisis. Por ello que es necesario realizar un procesamiento del registro, Para ello, en este estudio se utilizó el programa PRISM (2020) y se realizaron las siguientes actividades:

1. Se realizó corrección de línea base de primer orden
2. Se hizo un filtrado pasabanda de 4 polos para eliminar las frecuencias menores a 0.1 y mayores a 20 Hz.
3. Se recortó la señal tomando en cuenta un intervalo de la intensidad de arias del 1 al 99%

En la **Figura 17**, se muestra a forma de ejemplo, un registro procesado en para ambas direcciones. Con línea continua gruesa, se presenta la aceleración en la componente X mientras que, con línea punteada, la aceleración en la componente Y .

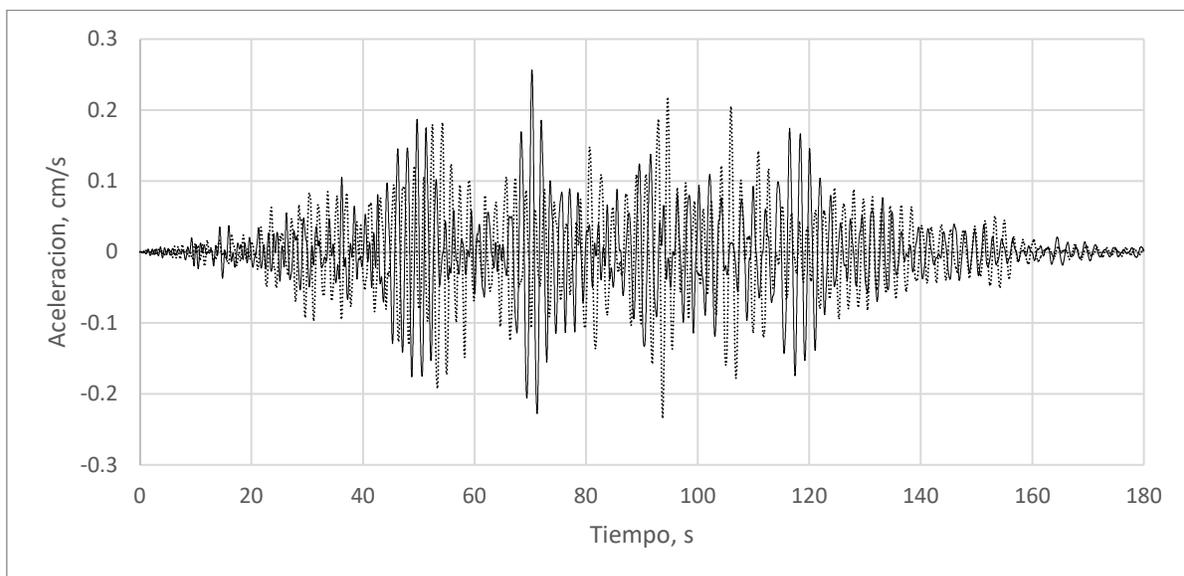


Figura 17. Registro sísmico procesado correspondiente a sismo de subducción 3.

3.8 MODELADO MATEMÁTICO

Para realizar los análisis de este estudio, se empleó el programa ETABS (2020). En las siguientes secciones se describen los aspectos considerados en el modelado.

3.8.1 SUPERESTRUCTURA

Las traveses y columnas fueron modelados mediante elementos barra. El sistema de piso se consideró como diafragma rígido.

Se consideró el comportamiento no lineal de los elementos estructurales por lo que se asignaron articulaciones plásticas en los extremos de las traveses y de las columnas a una distancia relativa del 5 y 95 % de la longitud del elemento. El tipo de articulación se definió controlada por la deformación siguiendo las recomendaciones del ASCE 41-17 (2017).

El amortiguamiento se modeló a través de una matriz de Rayleigh, proporcional a la masa y rigidez, con un valor equivalente al 2% del amortiguamiento crítico para el primer y segundo modo.

3.8.2 AISLADORES

Los aisladores de tipo péndulo de fricción fueron modelados mediante elementos tipo resorte, disponibles en el programa. Se asignó la propiedad direccional fija en la dirección axial del aislador y se modeló la no linealidad en ambas direcciones horizontales. Se definieron los coeficientes de fricción, el radio de curvatura y el parámetro de velocidad descritos en la **Tabla 7**.

La solución de los análisis fue del tipo integración directa no lineal. Para ello, se utilizó el método de Newmark con aceleración constante, con parámetros γ y β iguales a 0.5 y 0.25, respectivamente.

En **Figura 18** se muestra una vista general del modelo matemático realizado.

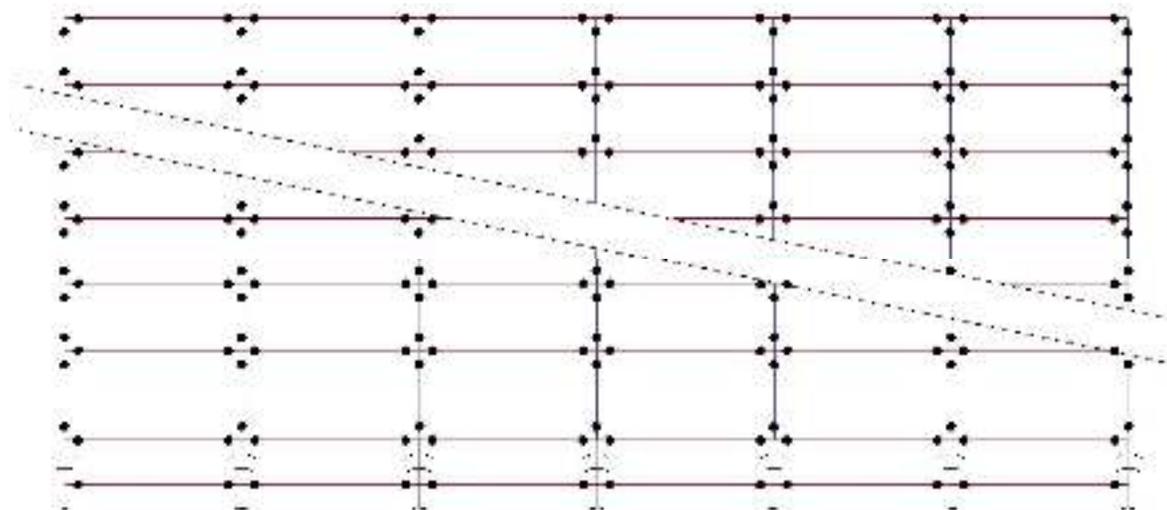


Figura 18. vista general del modelo matemático empleado.

4 EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA

4.1 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN

Los parámetros a evaluar en las estructuras aisladas y de base rígida estudiadas en este trabajo fueron la carga vertical y la rotación sobre el aislador.

En las estructuras tridimensionales adicionalmente, se evaluaron las distorsiones de entrepiso, los desplazamientos y los desplazamientos laterales.

4.1.1 CARGA VERTICAL EN APOYOS

Al ocurrir un asentamiento diferencial existe una redistribución de la carga vertical, la cual se traduce en una variación de las descargas sobre algunos elementos particularmente columnas y, en su caso, aisladores. Es importante resaltar que, en algunas ocasiones, en los diseños de elementos estructurales se manejan relaciones demanda/capacidades cercanas al 90%, por lo que un incremento significativo de los elementos mecánicos podría poner en riesgo a las edificaciones. Los resultados de estos análisis se muestran a partir del inciso 4.2

4.1.2 ROTACIÓN DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO

Cuando se diseña un sistema de aislamiento, se asume que este se ubica en un plano horizontal. Sin embargo, al presentarse un asentamiento diferencial se generan rotaciones e incrementos de carga axial sobre los aisladores, lo que puede dañar el sistema de aislamiento y modificar su comportamiento ante sismos. En esta tesis se evalúan esos efectos y los resultados se muestran a partir del inciso 4.2

4.1.3 DISTORSIÓN LÍMITE DE ENTREPISO

La distorsión obtenida se comparó contra la distorsión máxima permisible, la cual es $\gamma_{\max} = 0.015$ para marcos de concreto y acero de ductilidad baja. Los resultados se muestran a partir del inciso 4.2.

4.1.4 DESPLAZAMIENTO LÍMITE DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO

La falla de un aislador, particularmente de tipo deslizante, está asociada al alcance de su desplazamiento límite.

El desplazamiento último utilizado en esta investigación se supone igual al desplazamiento obtenido del espectro de desplazamiento, considerando un periodo de 4 segundos, amplificado por un factor de seguridad de 1.3, llegando a un valor de 0.50 m.

4.2 RESULTADOS

4.2.1 RESULTADOS SIMULACIONES 2D EN ACERO

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para las diferentes simulaciones.

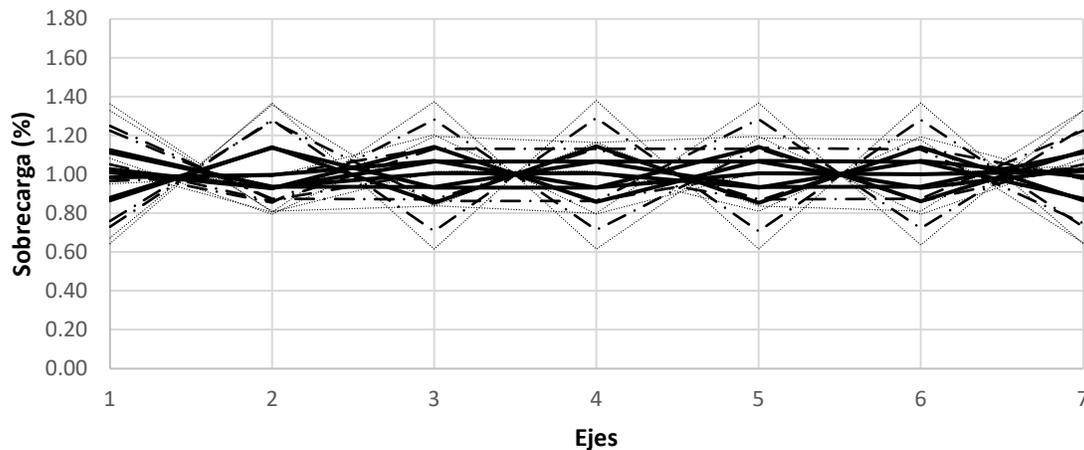


Figura 19. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 3 niveles, Caso 0.

En la **Figura 19**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 3 niveles bajo el caso de estudio 0. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 24 mm, con línea de trazo y

punto para la condición de 48 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 72 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 14, 29 y 38%, respectivamente.

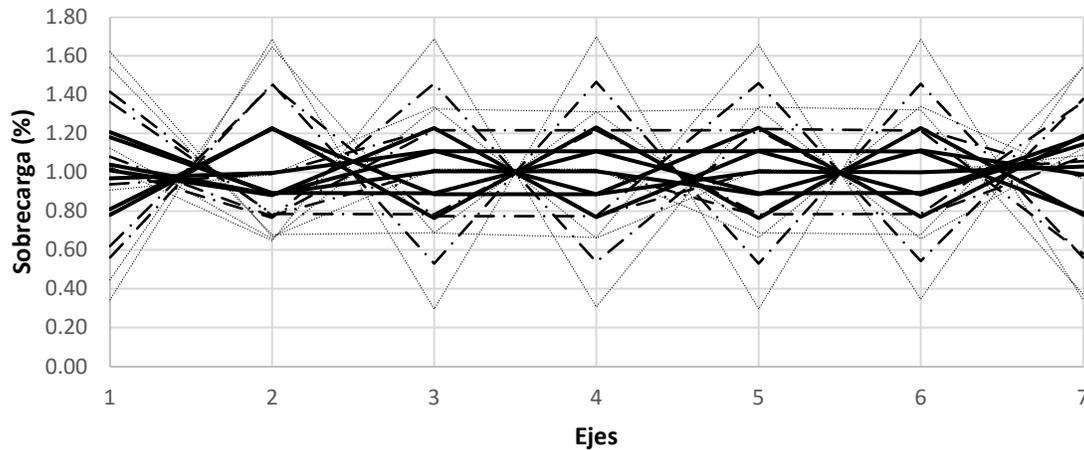


Figura 20. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 6 niveles, Caso 0.

En la **Figura 20**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 6 niveles bajo el caso de estudio 0. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 21 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 42 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 63 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 23, 47 y 70%, respectivamente.

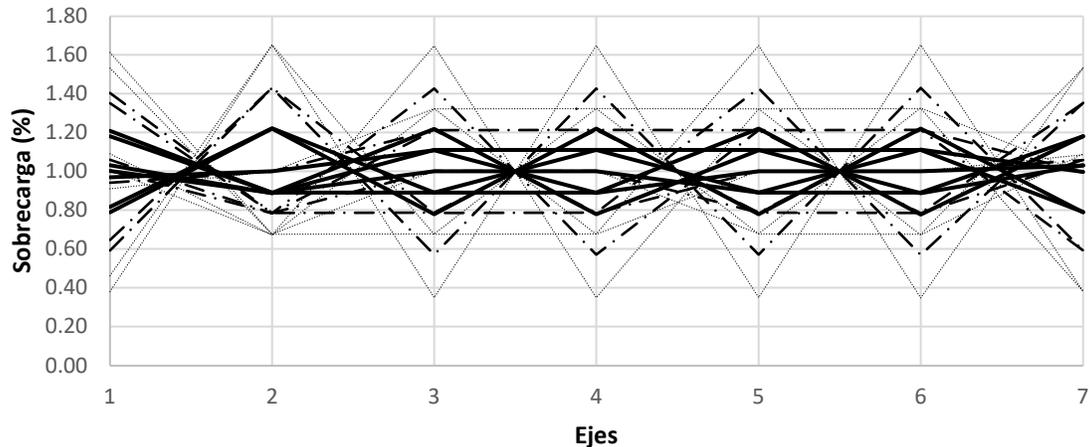


Figura 21. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0.

En la **Figura 21**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 0. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 17 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 33 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 50 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 22, 43 y 65%, respectivamente.

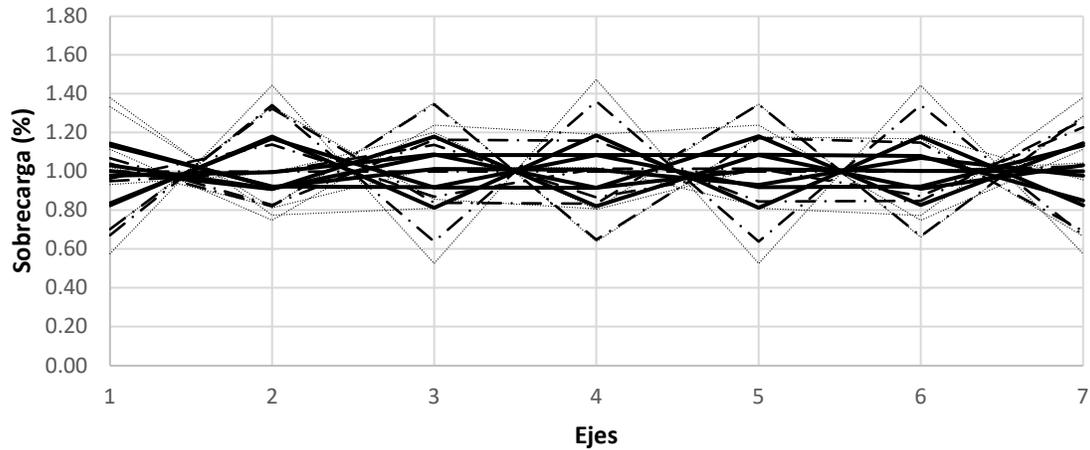


Figura 22. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 3 niveles, Caso 1.

En la **Figura 22**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 3 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 24 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 48 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 72 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 19, 36 y 47%, respectivamente.

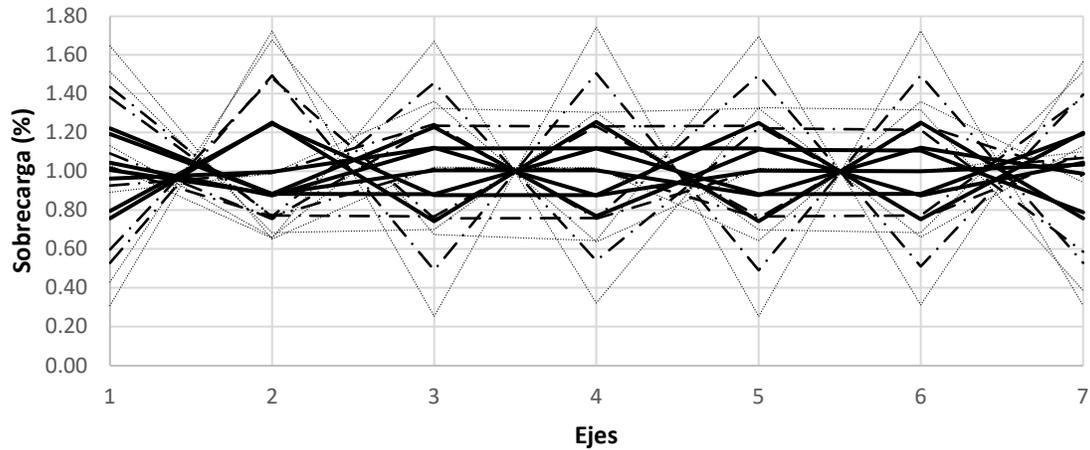


Figura 23. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 6 niveles, Caso 1.

En la **Figura 23**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 6 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 21 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 42 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 63 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 25, 51 y 74%, respectivamente.

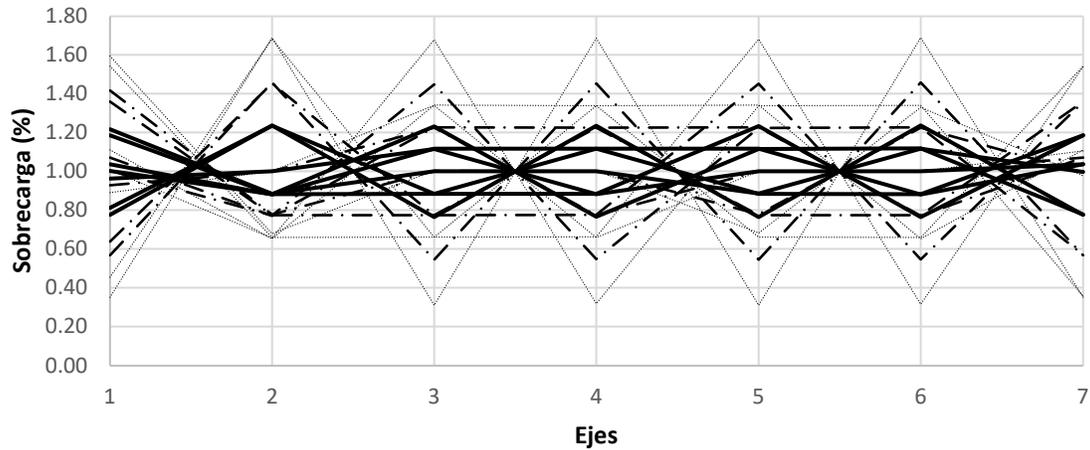


Figura 24. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1.

En la **Figura 24**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 17 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 33 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 50 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 24, 46 y 69%, respectivamente.

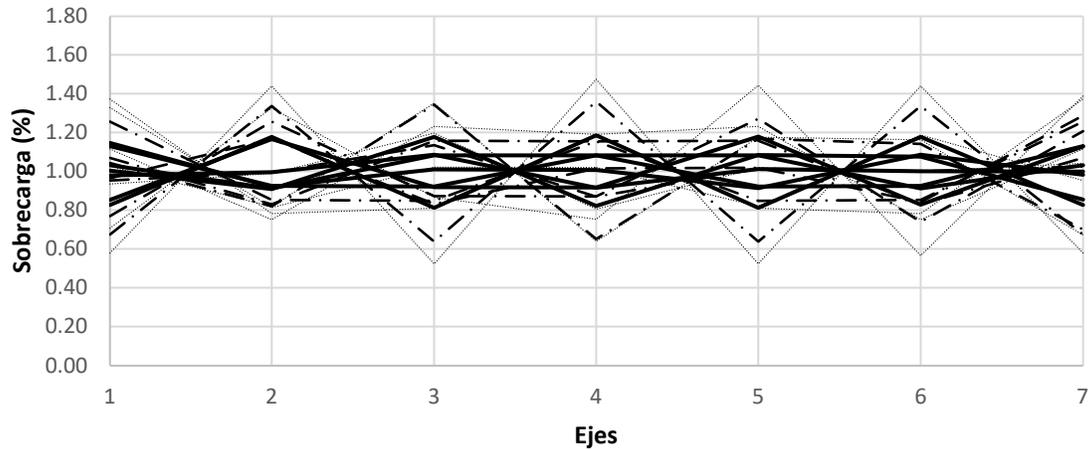


Figura 25. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 3 niveles, Caso 2.

En la **Figura 25**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 3 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 24 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 48 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 72 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 19, 36 y 47%, respectivamente.

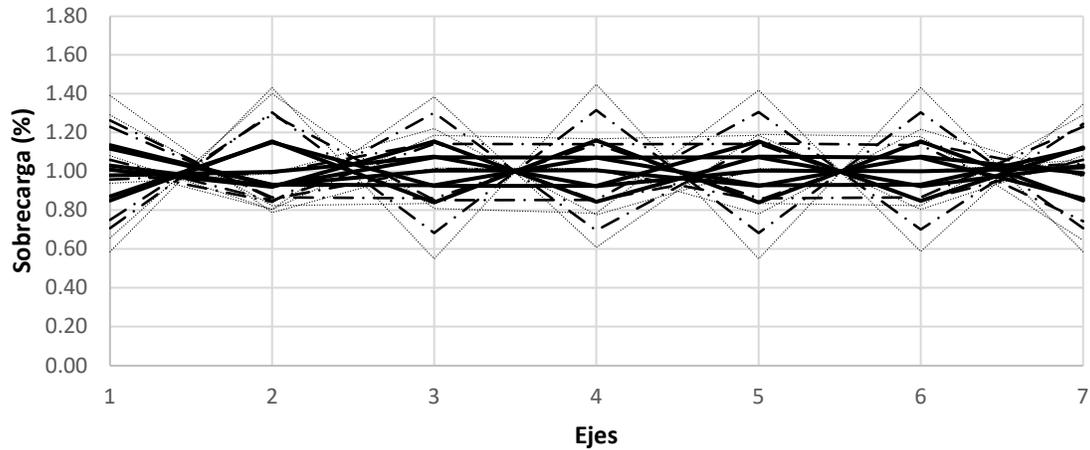


Figura 26. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 6 niveles, Caso 2.

En la **Figura 26**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 6 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 21 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 42 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 63 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 16, 32 y 45%, respectivamente.

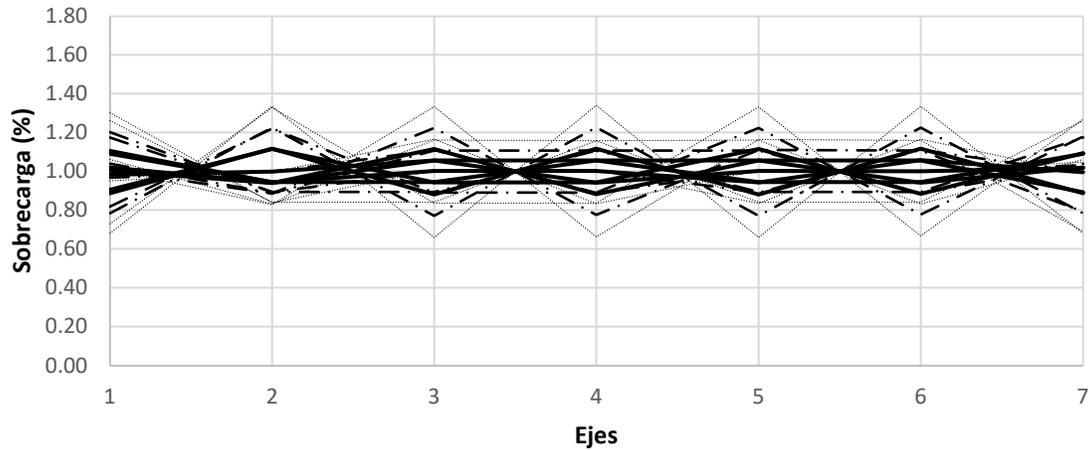


Figura 27. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 2.

En la **Figura 27**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 17 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 33 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 50 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 12, 23 y 34%, respectivamente.

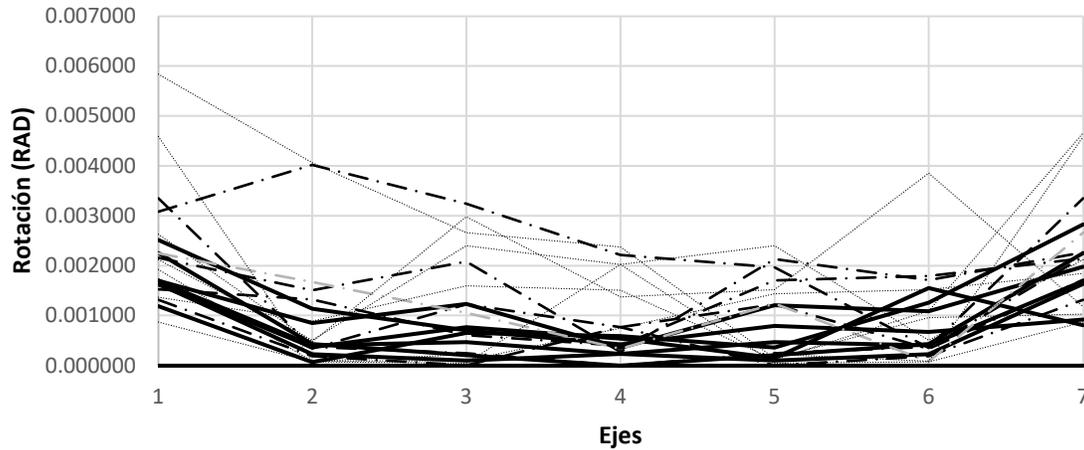


Figura 28. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 3 niveles, Caso 1.

En la **Figura 28**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 3 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 24 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 48 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 72 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.002828, 0.004018 y 0.005840 rad., respectivamente.

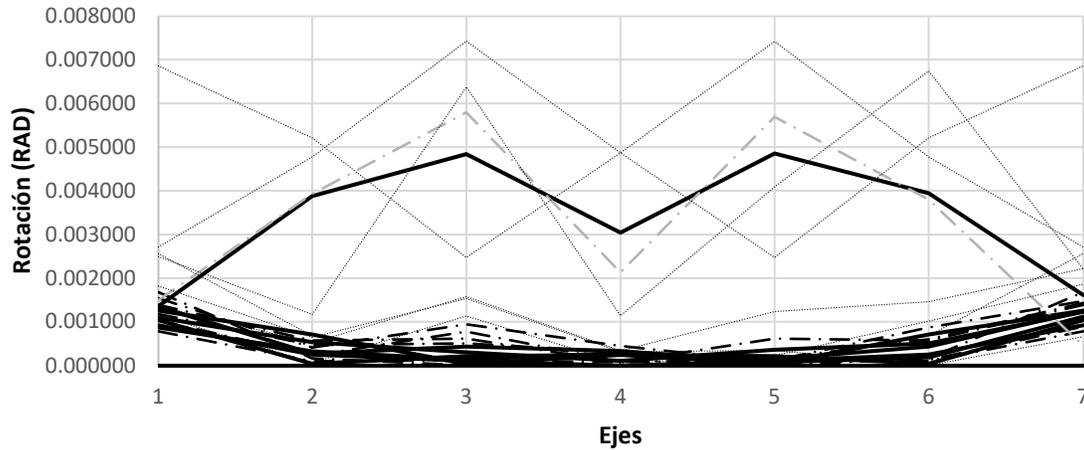


Figura 29. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 6 niveles, Caso 1.

En la **Figura 29**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 6 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 21 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 42 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 63 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.004855, 0.005799 y 0.007425 rad., respectivamente.

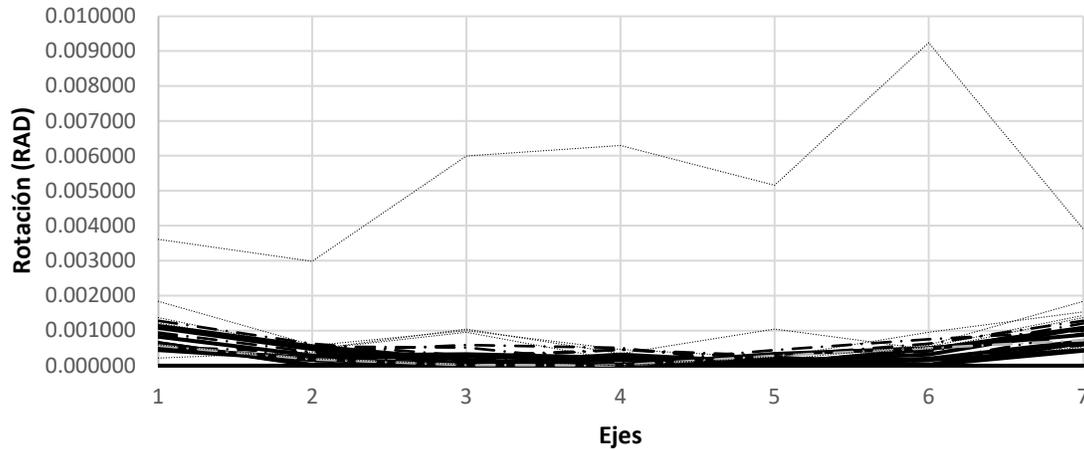


Figura 30. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1.

En la **Figura 30**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 17 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 33 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 50 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.001140, 0.001281 y 0.009238 rad., respectivamente.

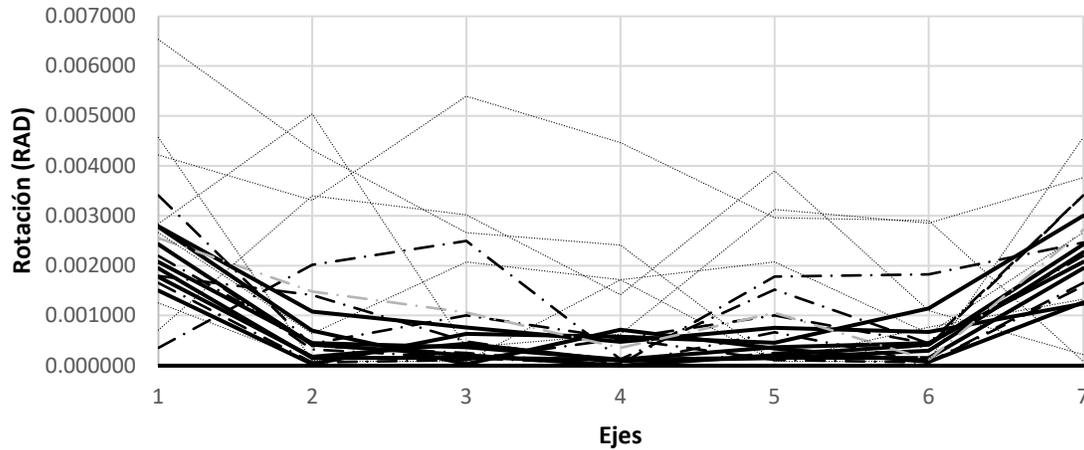


Figura 31. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 3 niveles, Caso 2.

En la **Figura 31**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 3 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 24 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 48 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 72 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.002999, 0.003413 y 0.006531 rad., respectivamente.

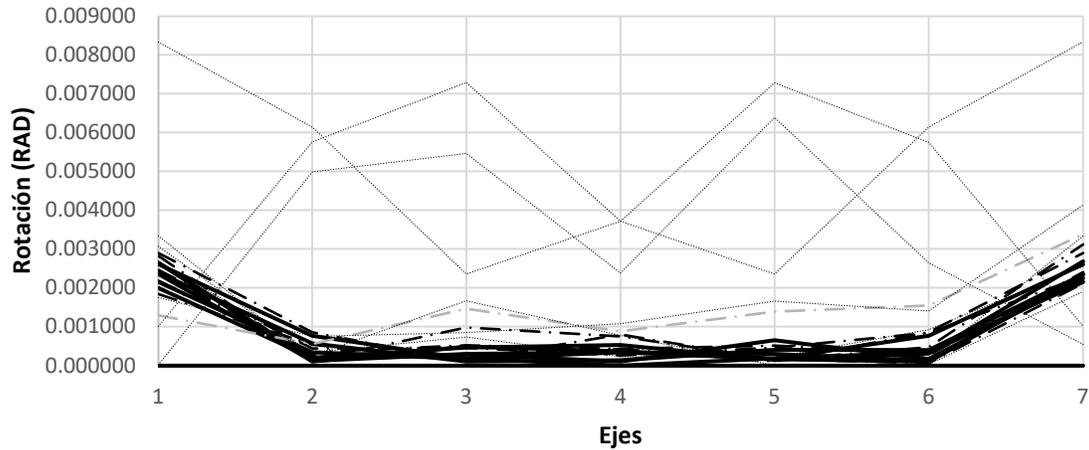


Figura 32. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 6 niveles, Caso 2.

En la **Figura 32**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 6 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 21 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 42 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 63 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.002688, 0.003381 y 0.008338 rad., respectivamente.

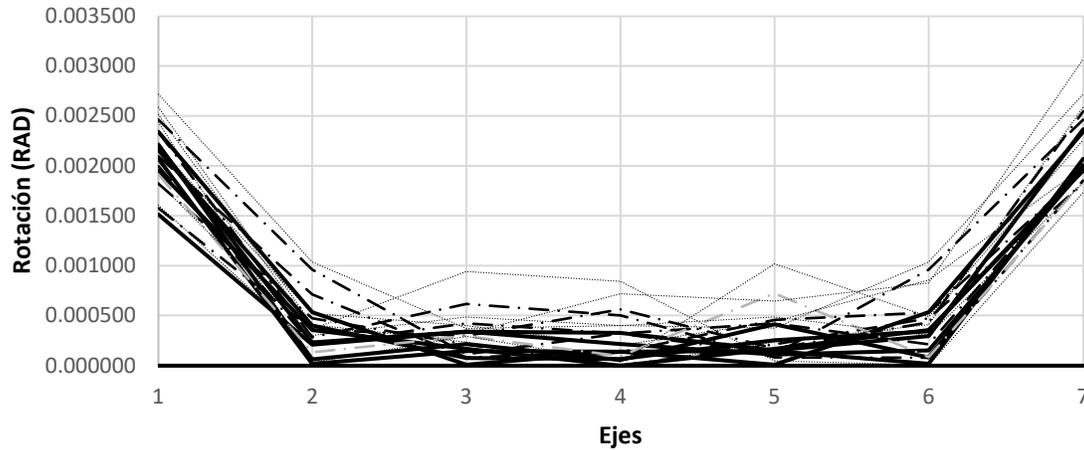


Figura 33. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 2.

En la **Figura 33**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 17 mm. Con línea de trazo y punto para la condición de 33 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 50 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.002367, 0.002545 y 0.003067 rad., respectivamente.

4.2.2 RESULTADOS SIMULACIONES 2D EN CONCRETO

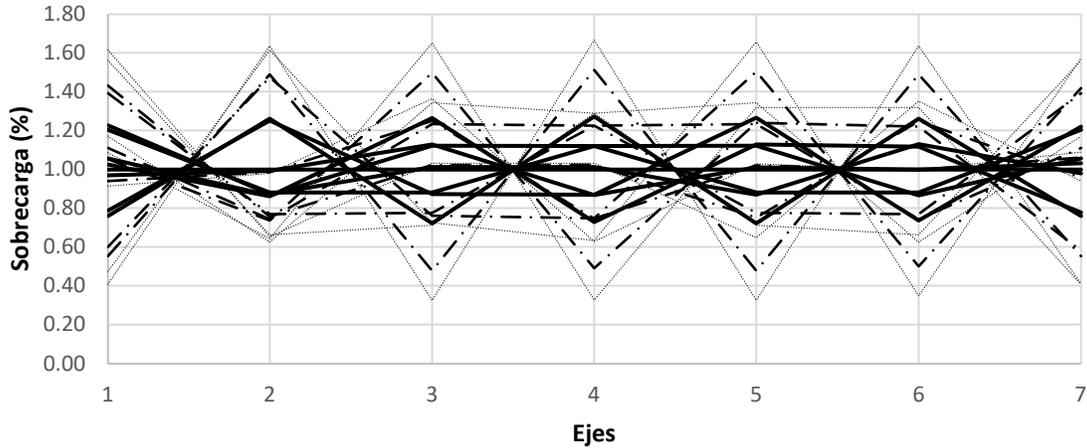


Figura 34. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 3 niveles, Caso 0.

En la **Figura 34**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 3 niveles bajo el caso de estudio 0. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 16 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 32 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 48 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 27, 51 y 67%, respectivamente.

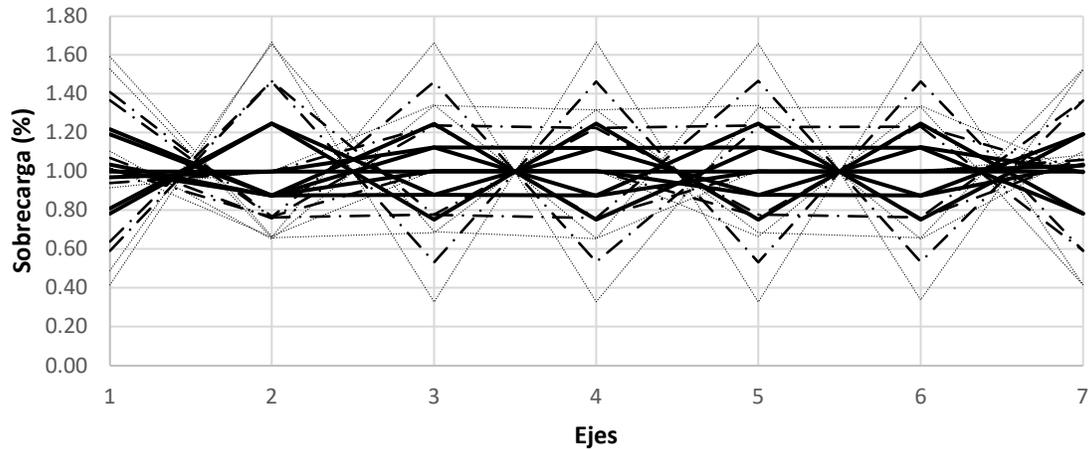


Figura 35. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 6 niveles, Caso 0.

En la **Figura 35**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 6 niveles bajo el caso de estudio 0. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 14 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 28 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 42 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 25, 47 y 67%, respectivamente.

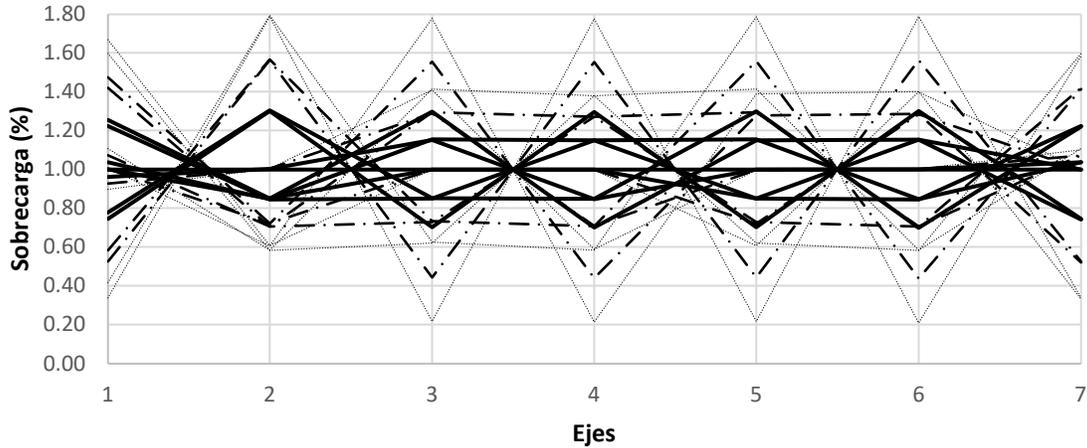


Figura 36. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 0.

En la **Figura 36**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 9 niveles bajo el caso de estudio 0. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 11 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 22 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 33 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 30, 57 y 79%, respectivamente.

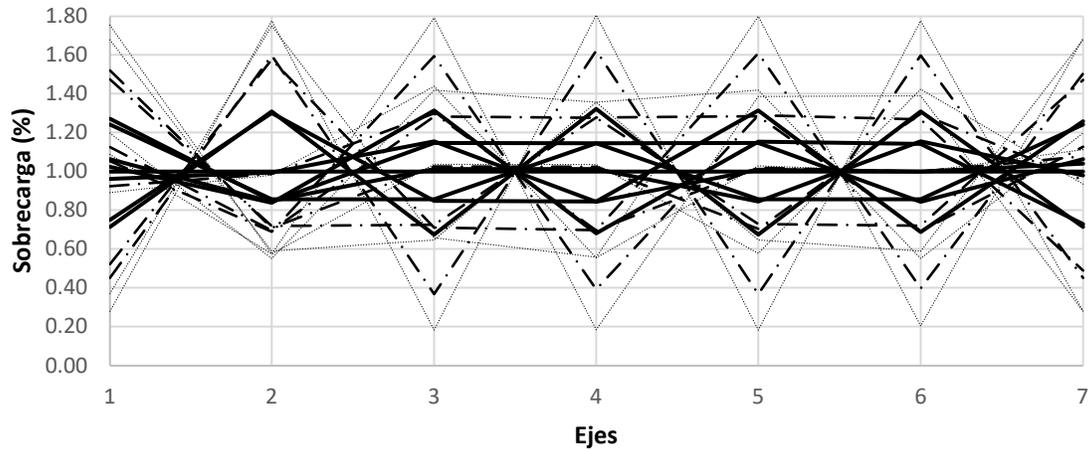


Figura 37. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 3 niveles, Caso 1.

En la **Figura 37**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 3 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 16 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 32 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 48 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 32, 62 y 81%, respectivamente.

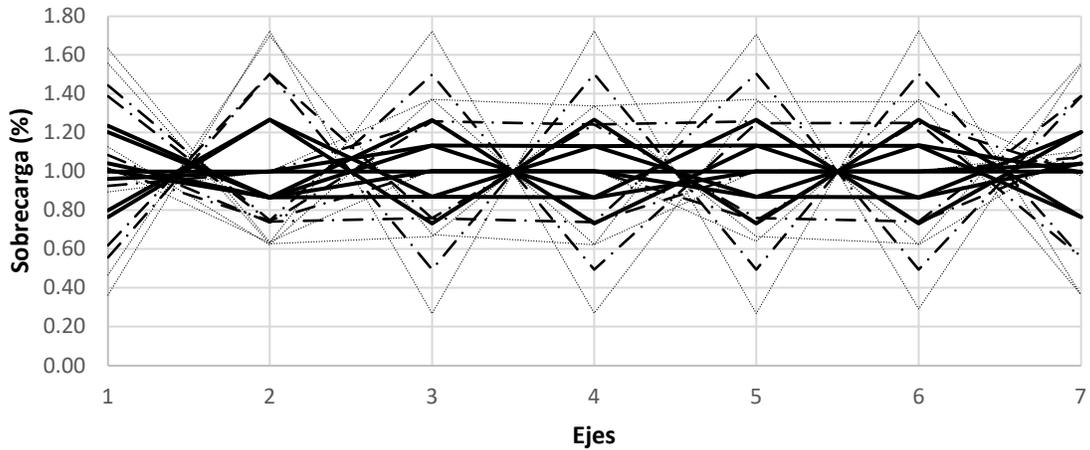


Figura 38. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 6 niveles, Caso 1.

En la **Figura 38**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 6 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 14 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 28 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 42 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 27, 50 y 72%, respectivamente.

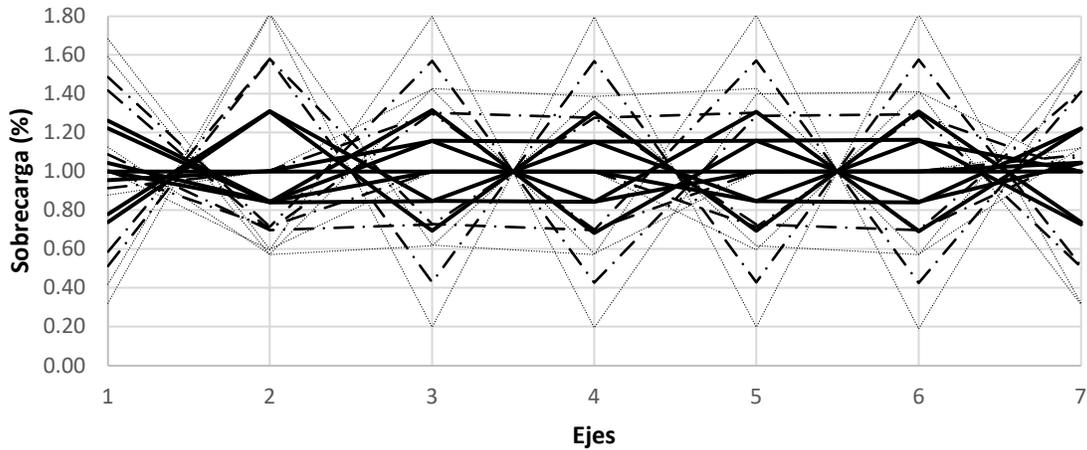


Figura 39. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 1.

En la **Figura 39**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 9 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 11 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 22 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 33 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 32, 58 y 81%, respectivamente.

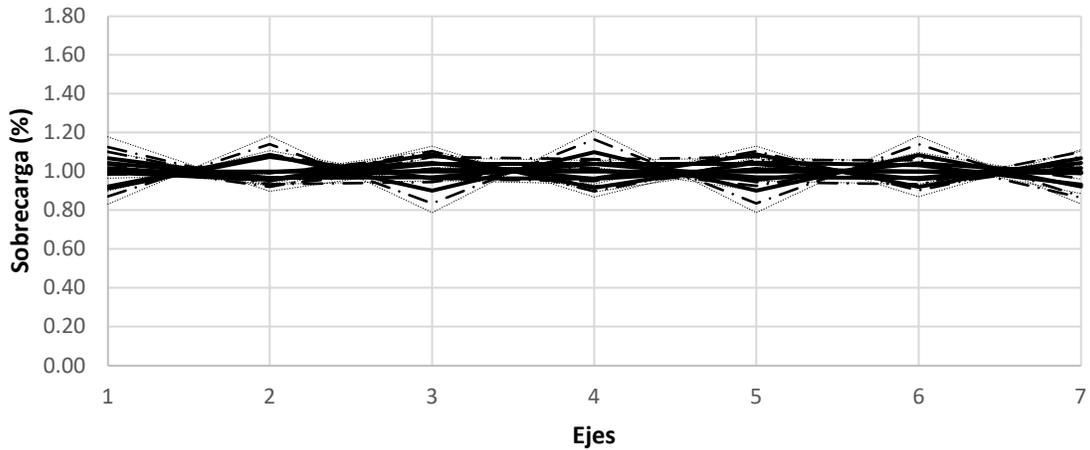


Figura 40. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 3 niveles, Caso 2.

En la **Figura 40**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 3 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 16 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 32 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 48 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 10, 17 y 21%, respectivamente.

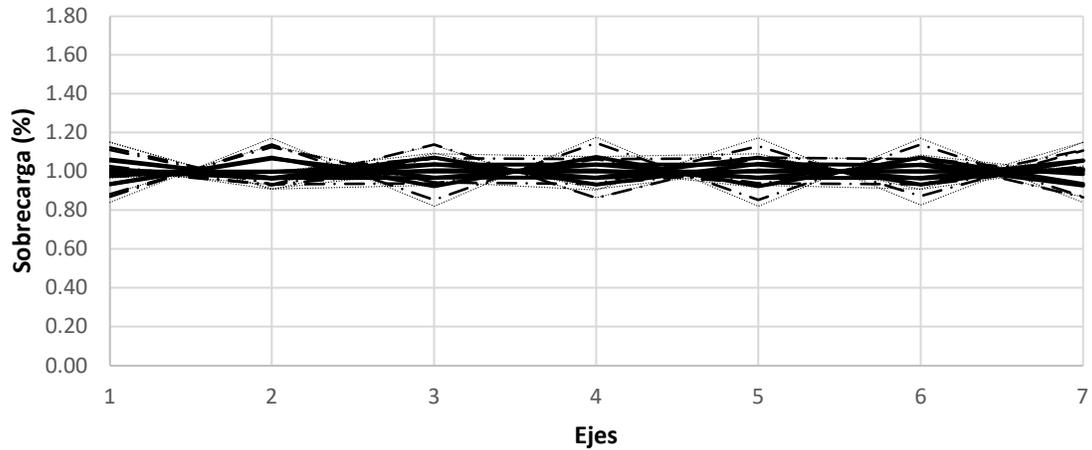


Figura 41. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 6 niveles, Caso 2.

En la **Figura 41**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 6 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 14 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 28 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 42 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 8, 15 y 18%, respectivamente.

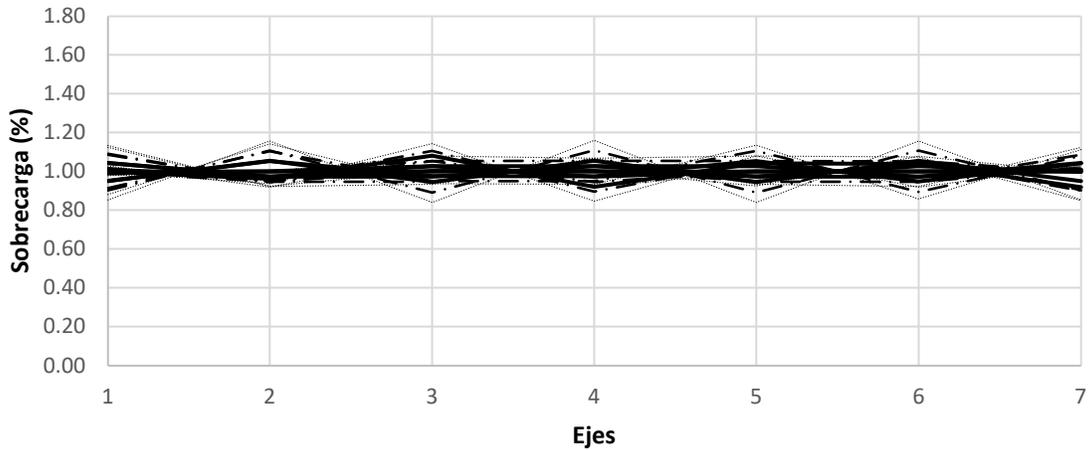


Figura 42. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 2.

En la **Figura 42**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 9 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 11 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 22 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 33 mm. Se observa que se presenta un incremento de carga axial del 8, 11 y 16%, respectivamente.

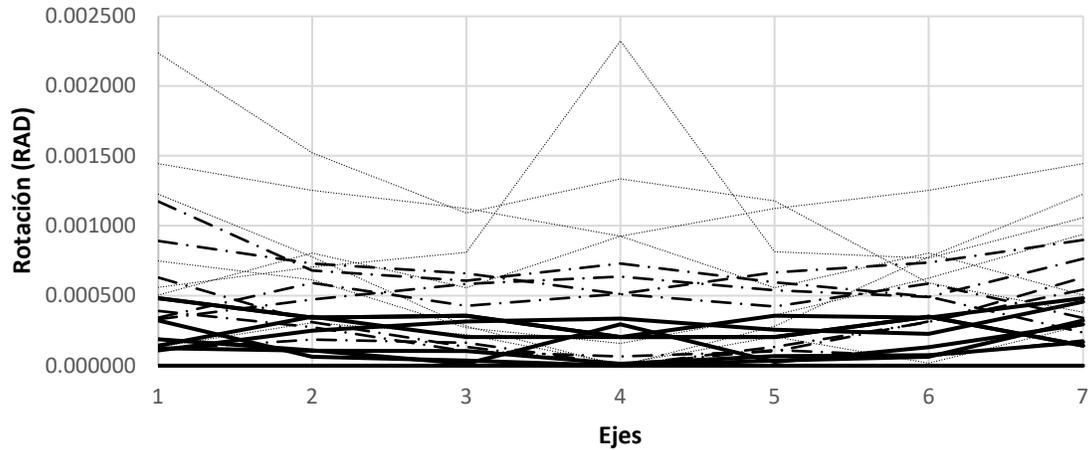


Figura 43. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 3 niveles, Caso 1.

En la **Figura 43**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 3 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 16 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 32 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 48 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.000615, 0.001174 y 0.002324 rad., respectivamente.

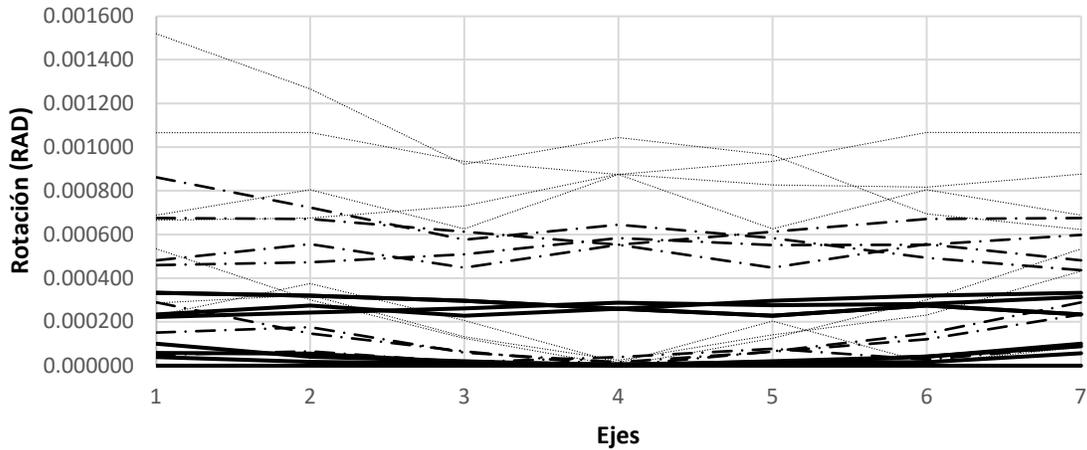


Figura 44. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 6 niveles, Caso 1.

En la **Figura 44**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 6 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 14 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 28 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 42 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.000383, 0.000862 y 0.001519 rad., respectivamente.

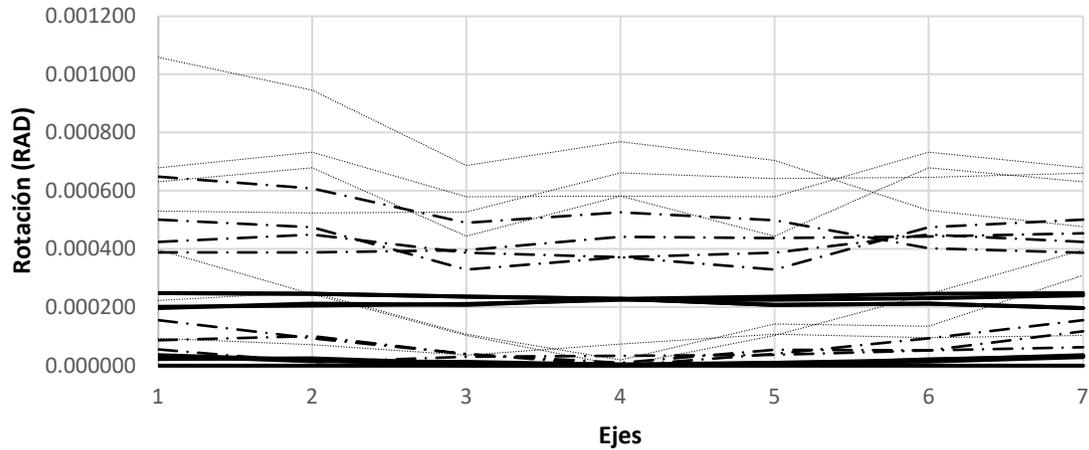


Figura 45. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 1.

En la **Figura 45**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 9 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 11 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 22 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 33 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.000272, 0.000649 y 0.001059 rad., respectivamente.

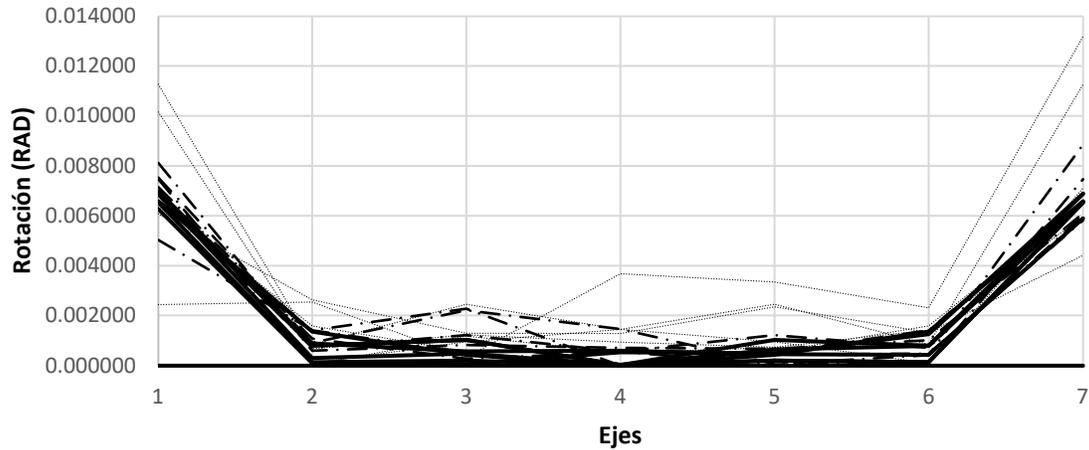


Figura 46. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 3 niveles, Caso 2.

En la **Figura 46**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 3 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 16 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 32 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 48 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.007521, 0.008856 y 0.013191 rad., respectivamente.

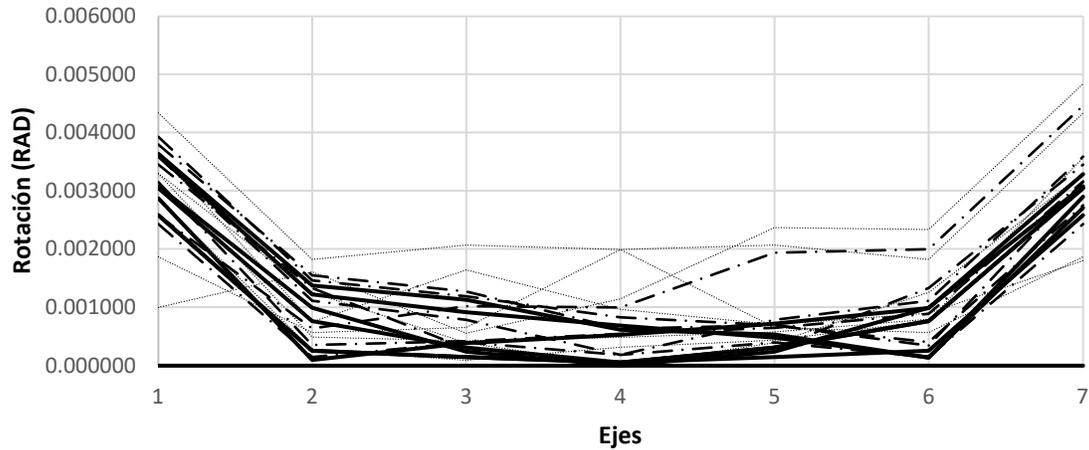


Figura 47. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 6 niveles, Caso 2.

En la **Figura 47**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 6 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 14 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 28 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 42 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.003786, 0.004465 y 0.004840 rad., respectivamente.

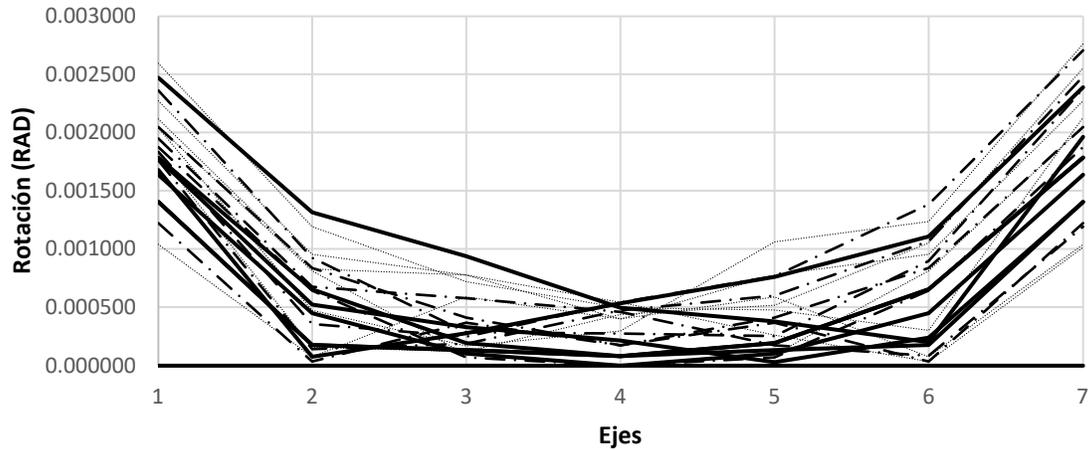


Figura 48. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 2.

En la **Figura 48**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 9 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 11 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 22 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 33 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.002684, 0.002706 y 0.002761 rad., respectivamente.

4.2.3 RESULTADOS SIMULACIONES 3D EN ACERO

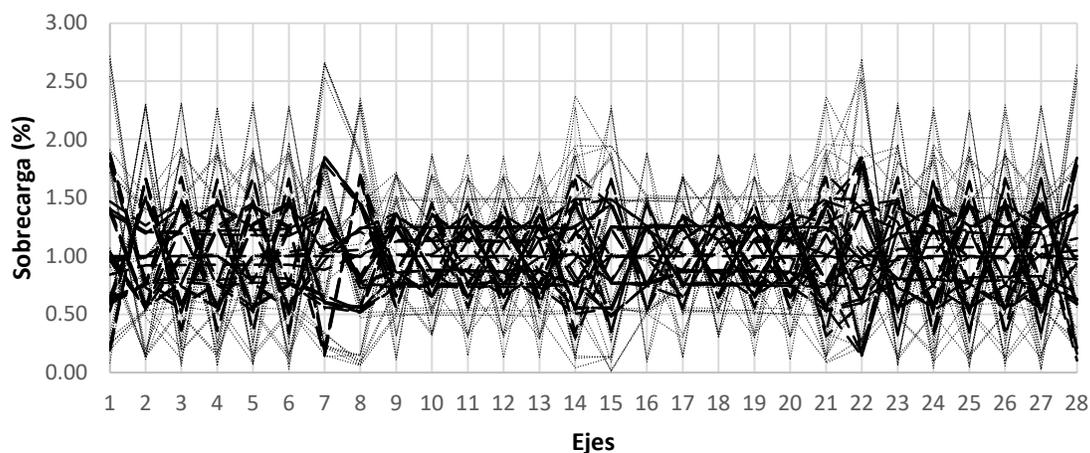


Figura 49. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0.

En la **Figura 49**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 0. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 17 mm. mientras que, con línea punteada, para un asentamiento de 50 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 45 y 87%, respectivamente.

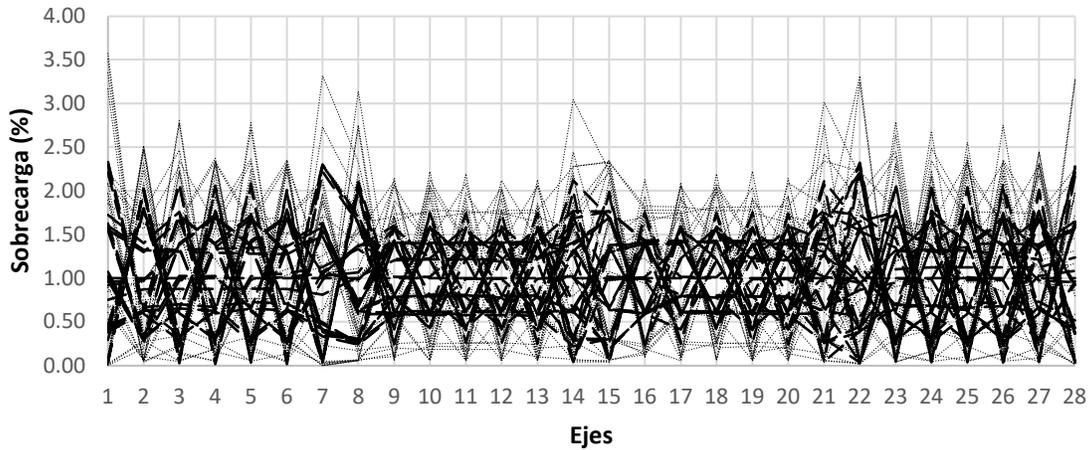


Figura 50. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1.

En la **Figura 50**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 17 mm. mientras que, con línea punteada, para un asentamiento de 50 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 74 y 122%, respectivamente.

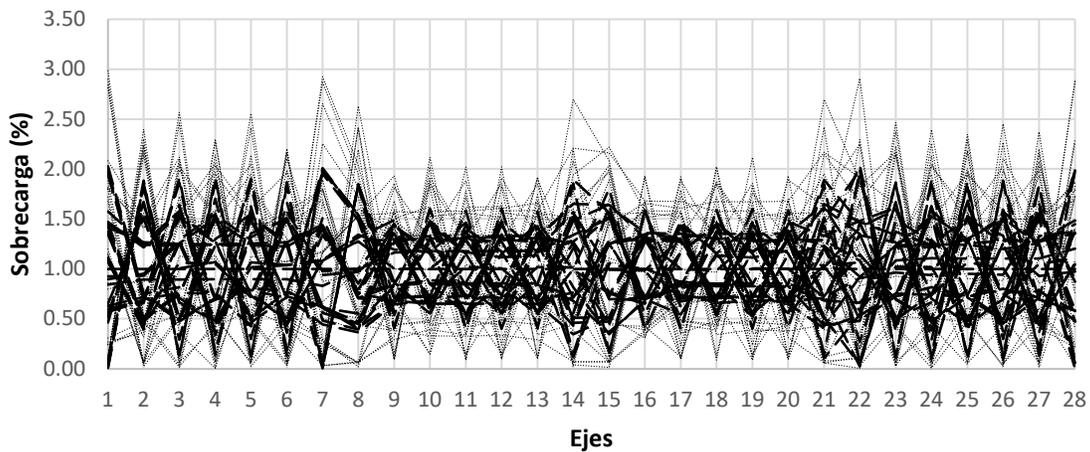


Figura 51. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 2.

En la **Figura 51**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 17 mm. mientras que, con línea punteada, para un asentamiento de 50 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 59 y 111%, respectivamente.

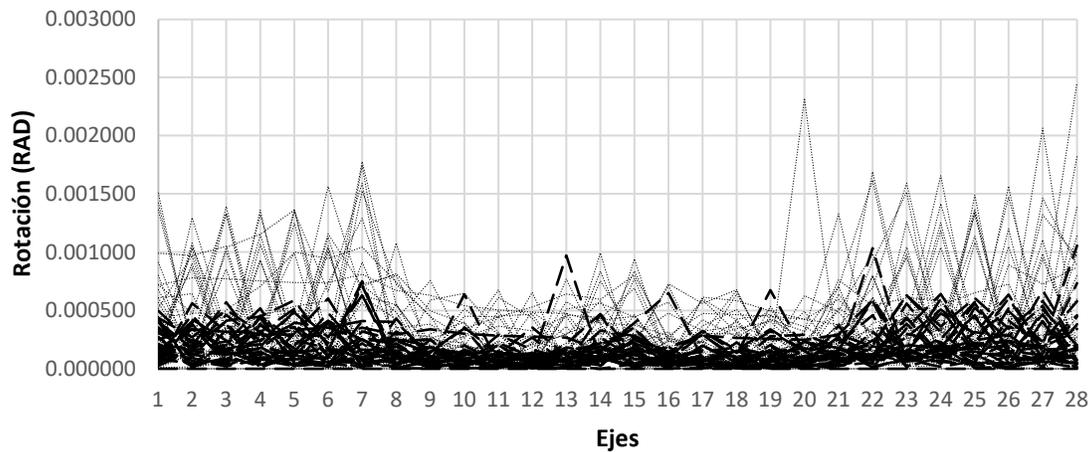


Figura 52. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1.

En la **Figura 52**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo

3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 17 mm. Mientras que, con línea punteada para un asentamiento de 33 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.001204, 0.002458 rad., respectivamente.

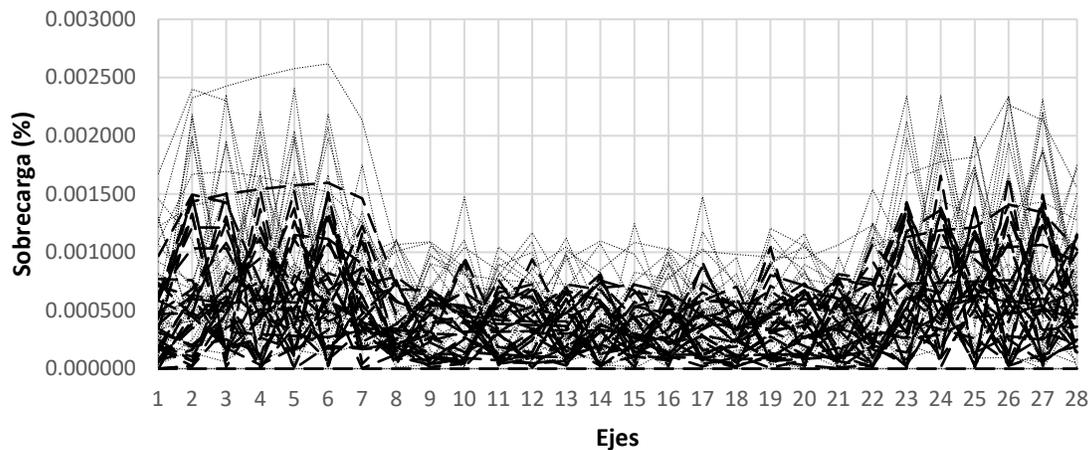


Figura 53. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 2.

En la **Figura 53**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 17 mm. Mientras que, con línea punteada para un asentamiento de 33 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.001657, 0.002750 rad., respectivamente.

4.2.4 RESULTADOS SIMULACIONES 3D EN CONCRETO

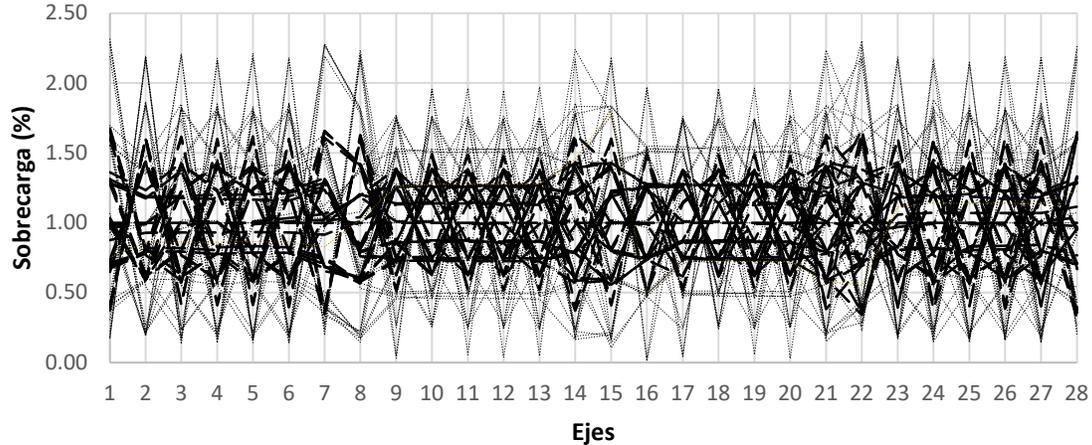


Figura 54. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 0.

En la **Figura 54**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 9 niveles bajo el caso de estudio 0. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 11 mm. mientras que, con línea punteada, para un asentamiento de 22 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 68 y 131%, respectivamente.

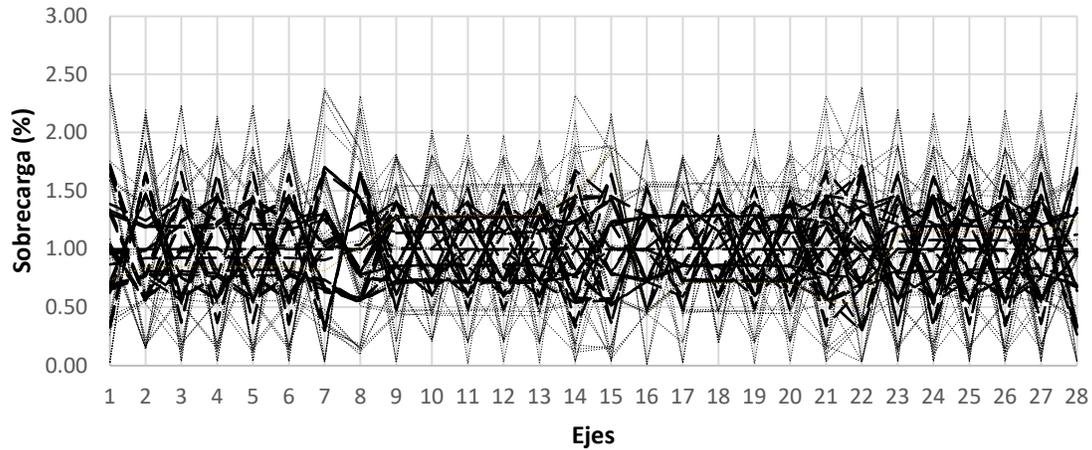


Figura 55. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 1.

En la **Figura 55**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 9 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 11 mm. mientras que, con línea punteada, para un asentamiento de 22 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 72 y 140%, respectivamente.

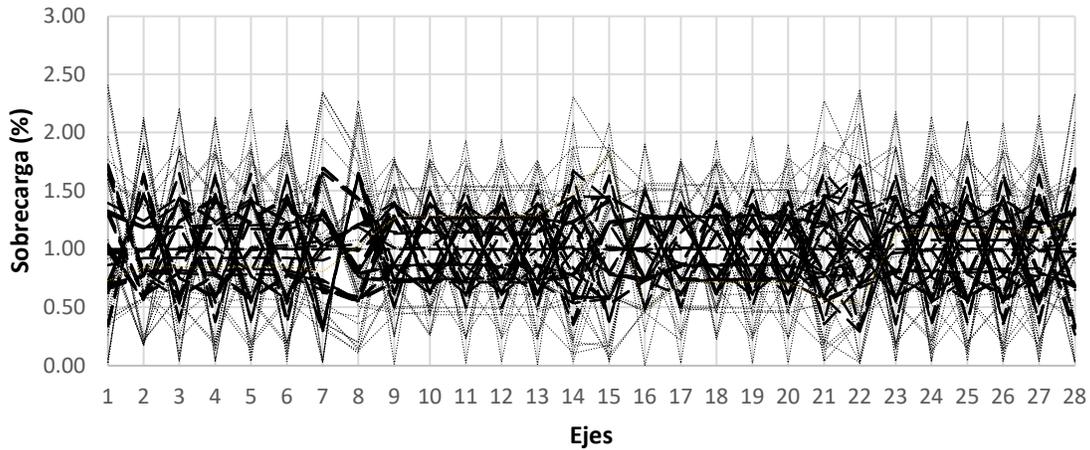


Figura 56. Sobrecarga producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 2.

En la **Figura 56**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 9 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 11 mm. mientras que, con línea punteada, para un asentamiento de 22 mm. Se observa que se presenta un incremento pico de carga axial del 73 y 140%, respectivamente.

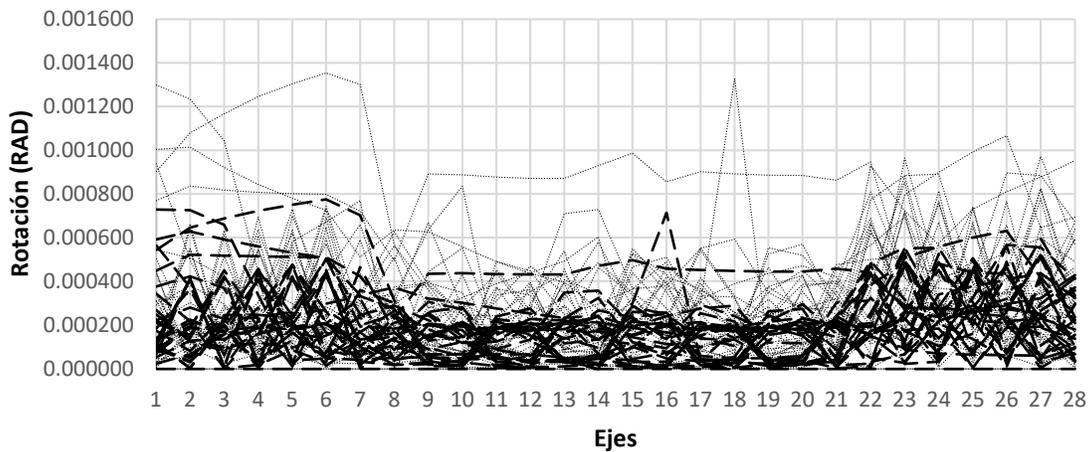


Figura 57. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 1.

En la **Figura 57**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 9 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 11 mm. Mientras que, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.000776 y 0.001354 rad., respectivamente.

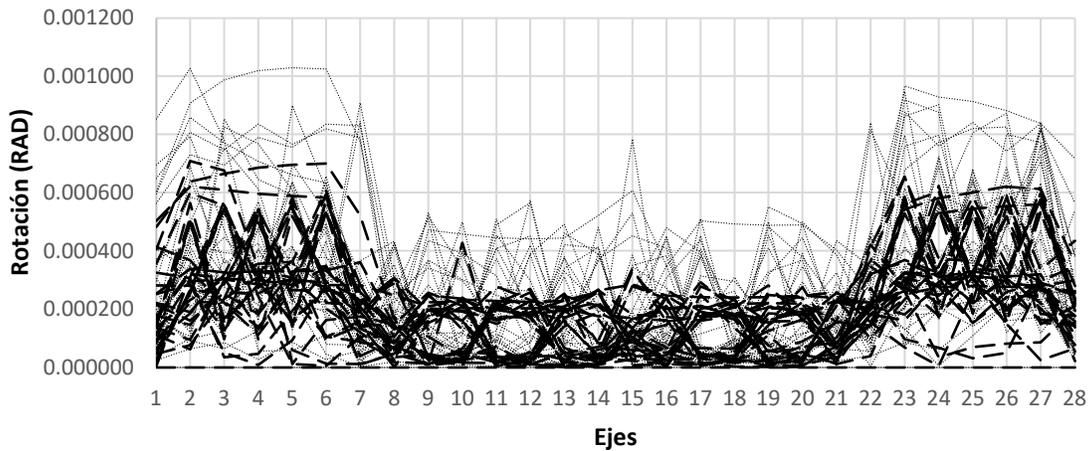


Figura 58. Rotación producida por los asentamientos diferenciales evaluados para el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 2.

En la **Figura 58**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto de 9 niveles bajo el caso de estudio 2. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Adicionalmente se muestran las diferentes combinaciones para cada caso de

estudio, mediante la variación del mismo tipo de línea, estas combinaciones se muestran en el capítulo 3 y son las mínimas necesarias para estudiar la respuesta general del sistema. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 11 mm. Mientras que, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm. Se observa que se presenta una rotación máxima en los aisladores de 0.000779 y 0.001397 rad., respectivamente.

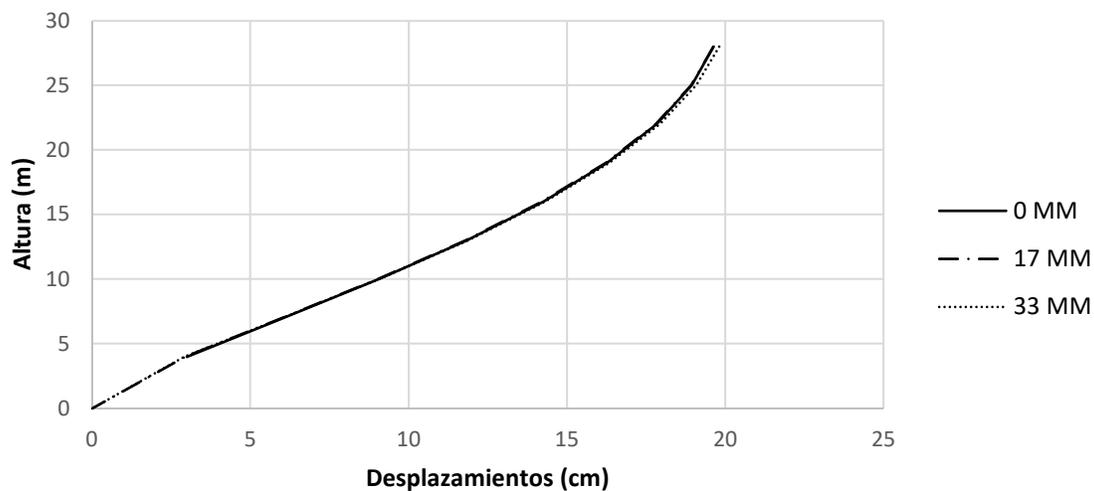
4.3 RESULTADOS ANÁLISIS DINÁMICOS NO LINEALES

Con los resultados de las simulaciones de las estructuras tridimensionales se seleccionaron los casos más desfavorables y estos fueron sometidos a la historia de aceleración correspondiente al Acelerograma de subducción 3, con el propósito de estudiar el comportamiento de la estructura ante demandas sísmicas.

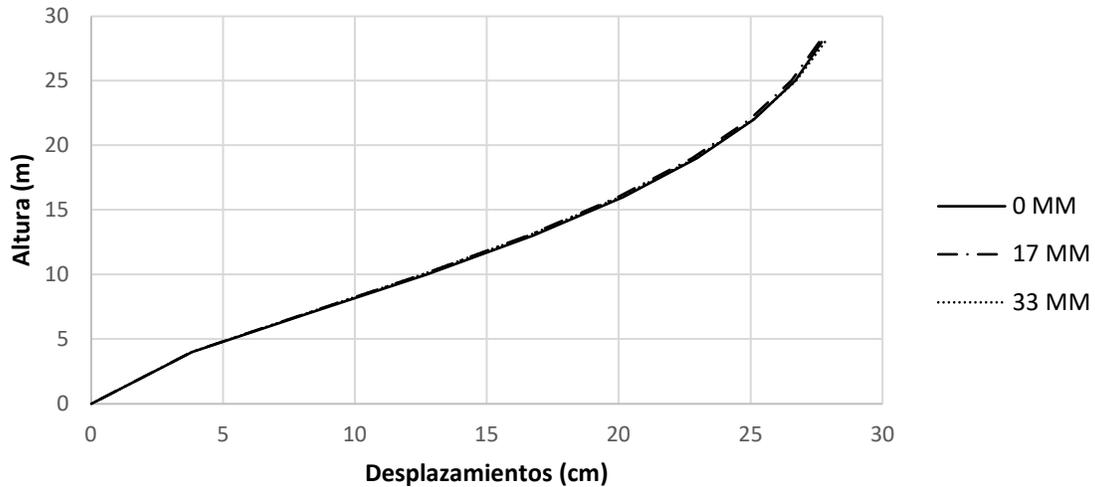
4.3.1 CASO 0. EDIFICIO DE ACERO DE 9 NIVELES

4.3.2 DESPLAZAMIENTOS

En la **Figura 59**, se pueden observar que los perfiles de desplazamientos para cada dirección de análisis. Estas corresponden a los resultados de las simulaciones para los marcos tridimensionales de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 0.



Perfil de desplazamientos en X.

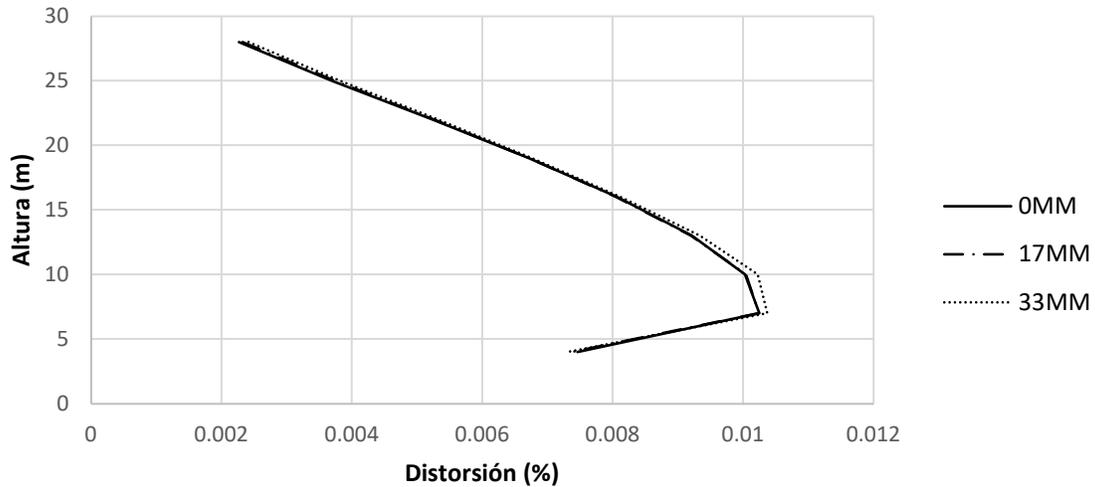


Perfil de desplazamientos en *Y*.

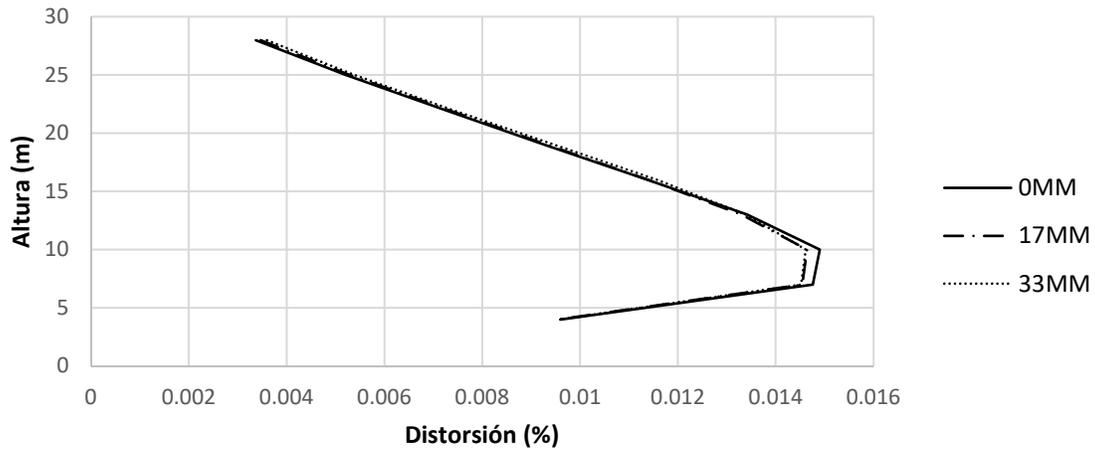
Figura 59. Desplazamientos obtenidos en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0.

En el eje de las ordenadas se muestran los desplazamientos, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la altura del edificio. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual se somete la estructura. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm. Se observa que los perfiles de desplazamientos obtenidos son iguales bajo todos los escenarios de asentamiento obteniéndose un desplazamiento en la dirección *X* de 19.80 cm, mientras que para la dirección *Y* es de 27.80 cm.

4.3.3 DISTORSIONES



Perfil de distorsiones en X .



Perfil de distorsiones en Y .

Figura 60. Distorsiones obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0.

En la **Figura 60**, se pueden observar que los perfiles de distorsiones para cada dirección de análisis. Estas corresponden a los resultados de las simulaciones para los marcos tridimensionales de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 0. En el eje de las ordenadas se muestran las distorsiones, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la altura del edificio. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual se somete la estructura. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm. se observa que la distorsión máxima obtenida es de 0.0103 para la dirección X y de 0.0146 para la dirección Y .

4.3.4 SOBRECARGA

La sobrecarga se obtuvo de la estructura cuando esta alcanza el desplazamiento máximo en cada dirección de análisis.

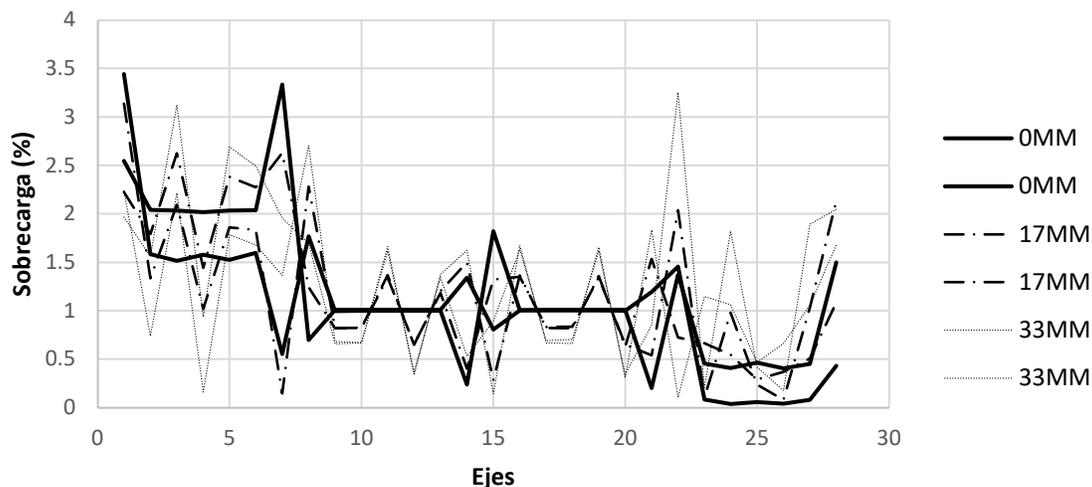


Figura 61. Sobrecargas obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0.

En la **Figura 61**, se muestra la variación de la sobrecarga obtenida de las simulaciones. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura para ambas direcciones del análisis. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento diferencial de 22 mm. Las sobrecargas obtenidas por en los análisis dinámicos, son comparadas contra las sobrecargas obtenidas en los modelos sin asentamiento, se puede observar que la axialización en las columnas puede llegar a alcanzar valores pico cercanos a 250 % de sobrecarga.

Los resultados mostrados en términos de desplazamientos y distorsiones son muy cercanos entre sí, ya que la respuesta de la estructura incursiona en el rango elástico por lo que no existe una modificación en la respuesta de la estructura. Sin embargo, se puede observar que

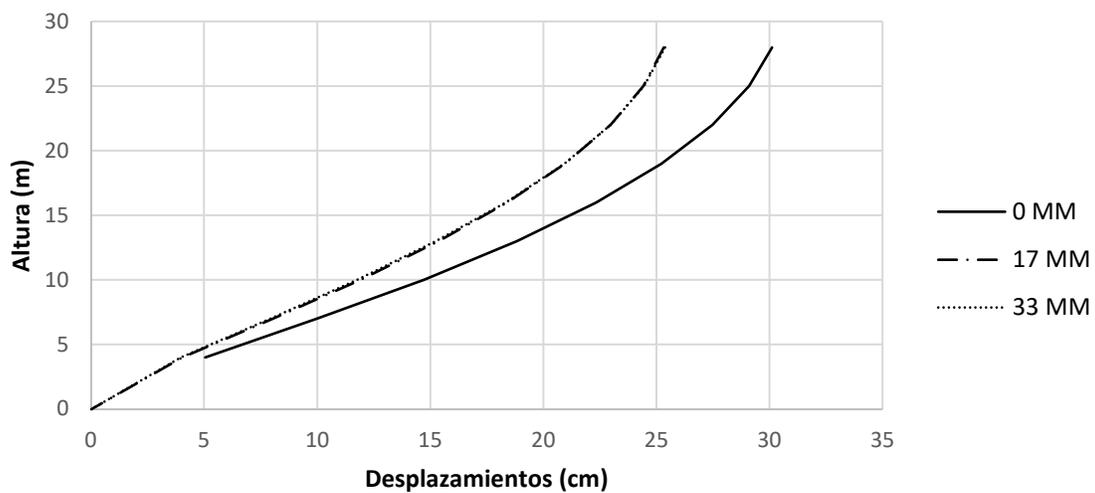
los desplazamientos obtenidos son los esperados ya que en la dirección *Y* son mayores lo cual corresponde a la dirección con menor rigidez.

Con el fin de observar el comportamiento de la estructura, los acelerogramas serán afectados por un factor de 1.5. esto para conseguir que la estructura incurriere en el rango inelástico.

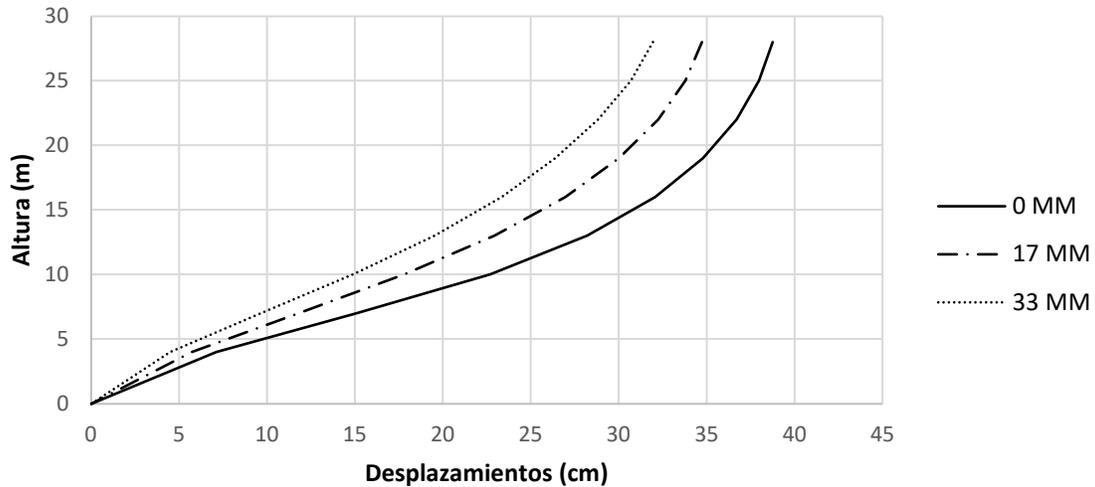
4.3.5 CASO 0. EDIFICIO DE ACERO DE 9 NIVELES CON DEMANDA SÍSMICA INCREMENTADA EN 50%

4.3.6 DESPLAZAMIENTOS

En la **Figura 62** se pueden observar que los perfiles de desplazamientos para cada dirección de análisis. Estas corresponden a los resultados de las simulaciones para los marcos tridimensionales de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 0 con demandas sísmicas incrementadas en 50%.



Perfil de desplazamientos en X.

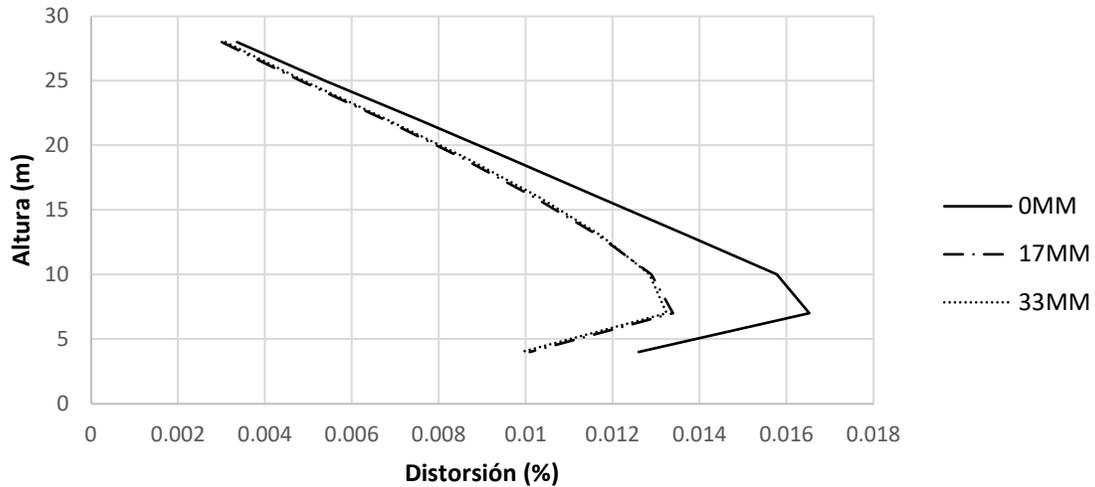


Perfil de desplazamientos en Y.

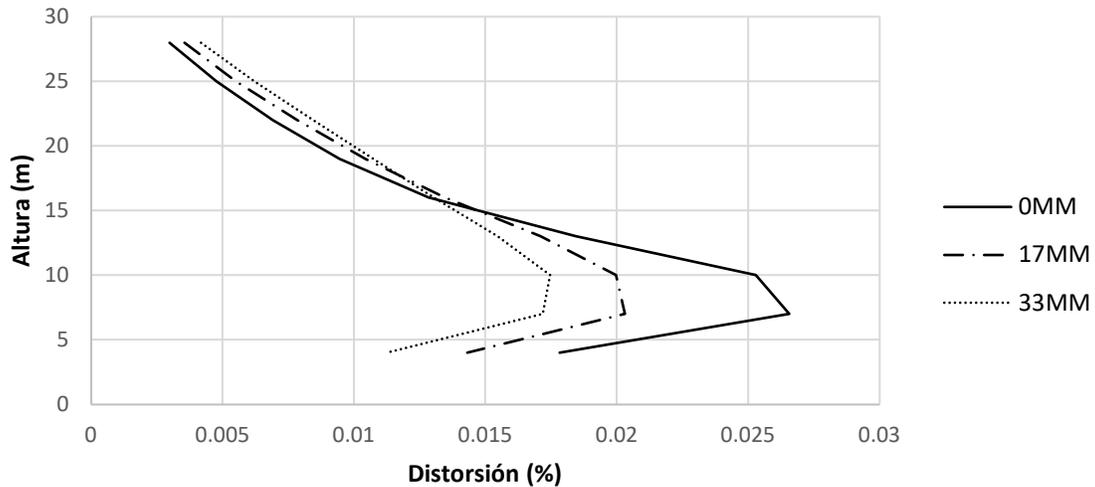
Figura 62. Desplazamientos obtenidos en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0 amplificando.

En el eje de las ordenadas se muestran los desplazamientos, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la altura del edificio. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual se somete la estructura. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm. Con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm. Se muestran los desplazamientos en cada dirección de análisis y se observa que existe un incremento en los valores obtenidos de un 20 % en la dirección X y del 18% en la dirección Y del análisis.

4.3.7 DISTORSIONES



Perfil de distorsiones en X.



Perfil de distorsiones en Y.

Figura 63. Distorsiones obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0 amplificando.

En la **Figura 63**, se pueden observar que los perfiles de distorsiones para cada dirección de análisis. Estas corresponden a los resultados de las simulaciones para los marcos tridimensionales de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 0. En el eje de las ordenadas se muestran las distorsiones, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la altura del edificio. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual se somete la estructura. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un

asentamiento de 22 mm. se observa que la distorsión máxima obtenida es de 0.0165 para la dirección X y de 0.026 para la dirección Y .

4.3.8 SOBRECARGA

La sobrecarga se obtuvo de la estructura cuando esta alcanza el desplazamiento máximo en cada dirección de análisis.

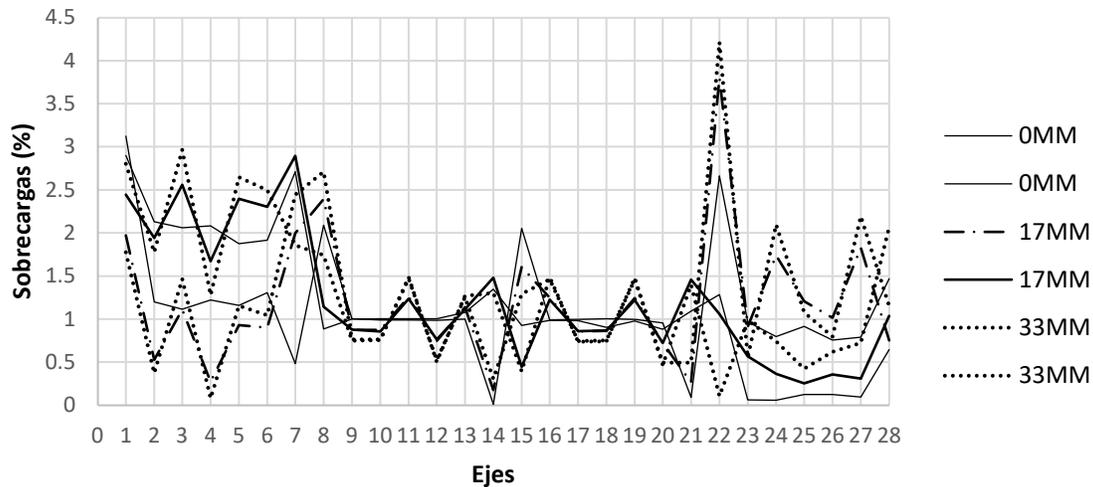


Figura 64. Sobrecargas obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0 amplificado.

En la **Figura 64**, se muestra la variación de la sobrecarga obtenida de las simulaciones. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura para ambas direcciones del análisis. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm. La sobrecarga obtenida en los análisis dinámicos, es comparada contra la obtenida en los modelos sin asentamiento, se puede observar que la axialización en las columnas puede llegar a alcanzar valores picos cercanos a 300 % de sobrecarga.

4.3.9 ARTICULACIONES PLÁSTICAS

Otro parámetro importante a considerar es la formación de articulaciones plásticas. En la **Figura 65** se muestra la formación de articulaciones en el instante en el que ocurre el desplazamiento máximo.

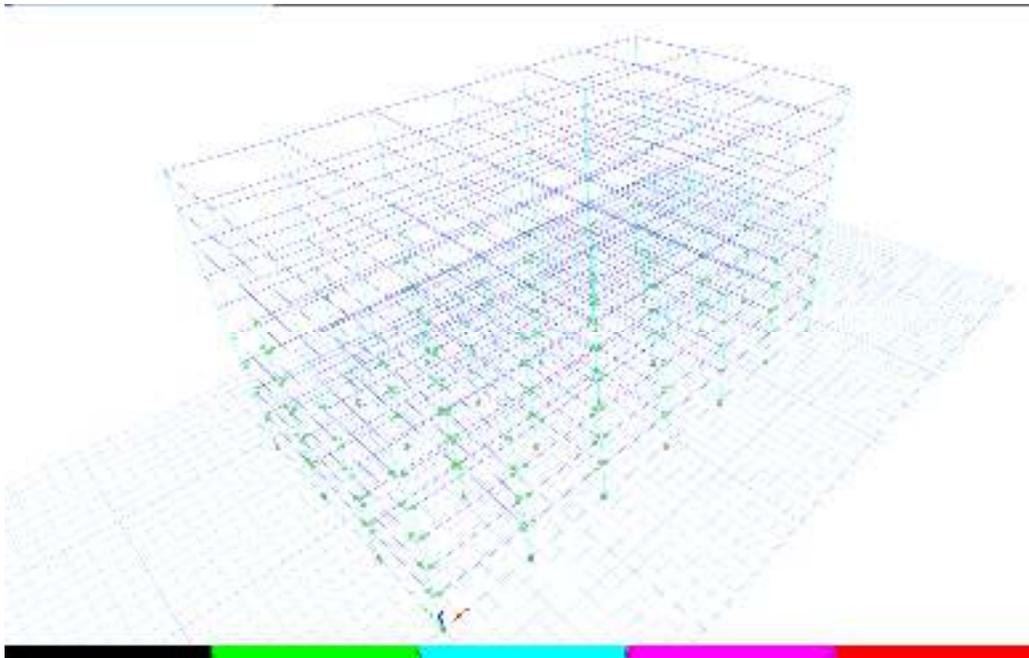


Figura 65. Articulaciones plásticas obtenidas en el análisis dinámico no lineal para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0 amplificado sin asentamiento.

En la **Figura 65** se observa la formación de articulaciones plásticas a lo largo de todos los entrepisos de la estructura de las cuales corresponden a Ocupación inmediata 278, Seguridad de vida 15, Prevención de colapso 0.

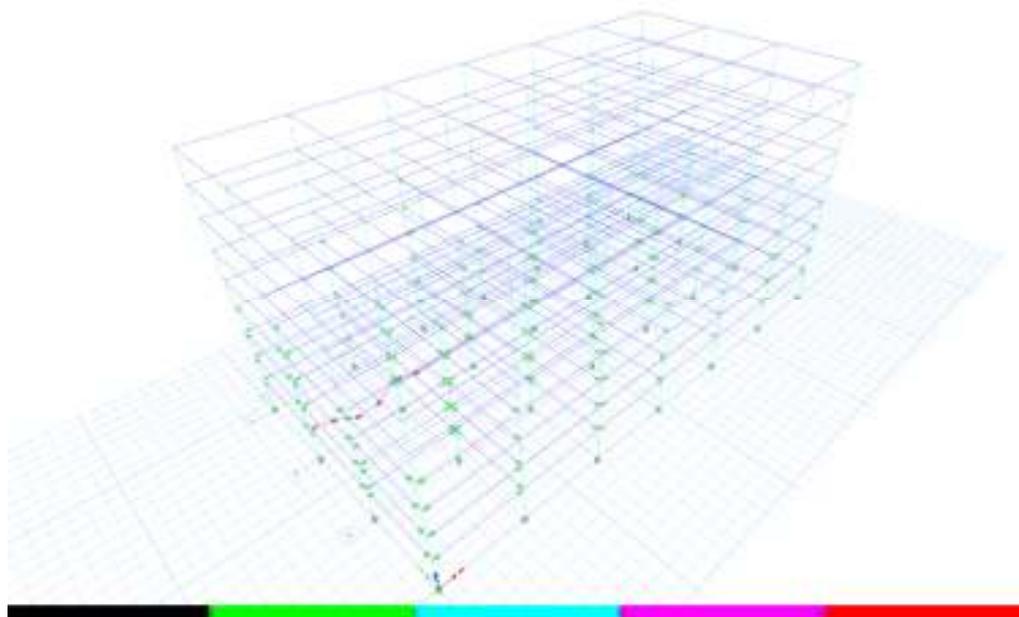


Figura 66. Articulaciones plásticas obtenidas en el análisis dinámico no lineal para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0 amplificado considerado un asentamiento de 11mm.

En la **Figura 66** se observa la formación de algunas articulaciones plásticas en una de las trabes del primer entrepiso Ocupación inmediata 285 Seguridad de vida 27, Prevención de colapso 12.

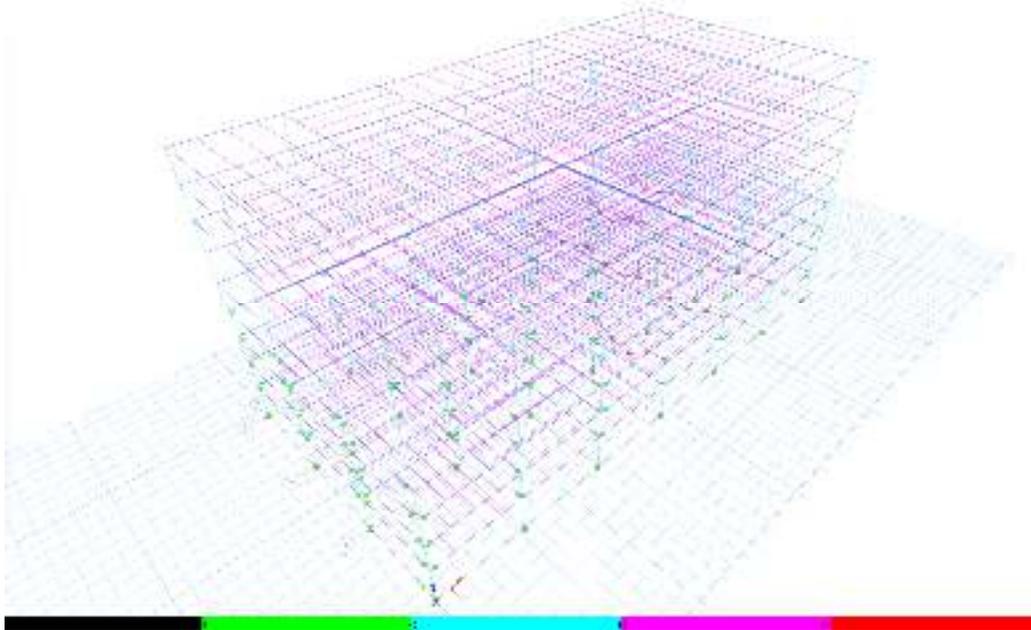


Figura 67. Articulaciones plásticas obtenidas en el análisis dinámico no lineal para el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0 amplificado considerado un asentamiento de 22mm.

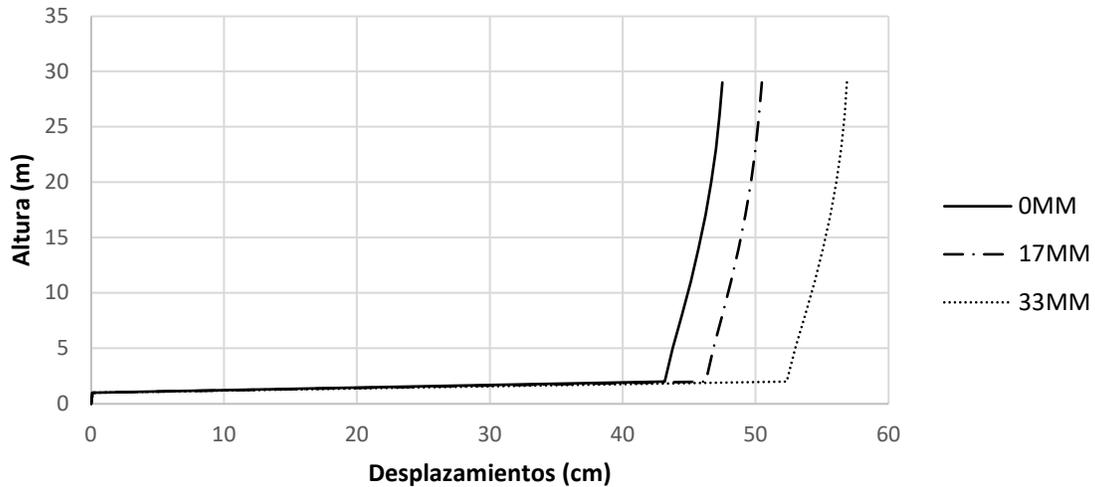
En la **Figura 67** se aprecia que ya se presentan una gran cantidad de articulaciones en diferentes ejes del edificio y en diferentes entrepisos. Ocupación inmediata 312, Seguridad de vida 35, Prevención de colapso 54.

Adicionalmente, se observa que hay un incremento de articulaciones plásticas conforme se presentan mayores asentamientos y estas se presentan conforme a la forma en la cual se asienta el edificio.

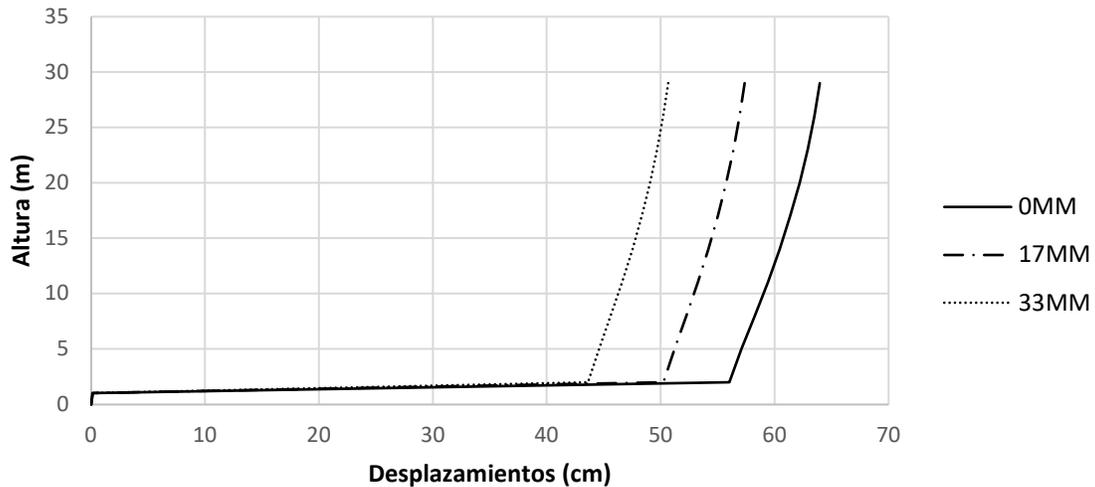
4.3.10 CASO 1. EDIFICIO DE ACERO DE 9 NIVELES

4.3.11 DESPLAZAMIENTOS

En la **Figura 68**, se pueden observar que los perfiles de desplazamientos para cada dirección de análisis. Estas corresponden a los resultados de las simulaciones para los marcos tridimensionales de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 1.



Perfil de desplazamientos en X.



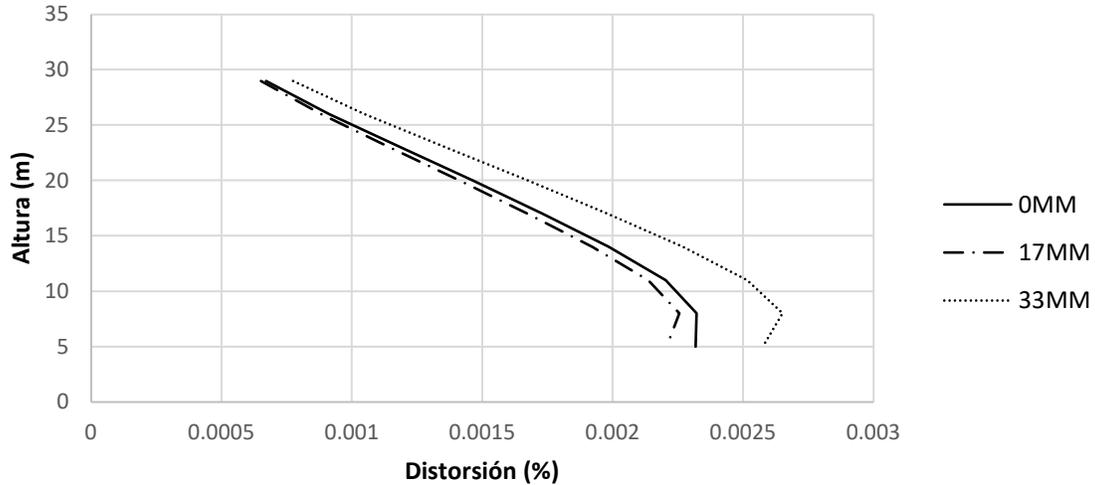
Perfil de desplazamientos en Y.

Figura 68. Desplazamientos obtenidos en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1.

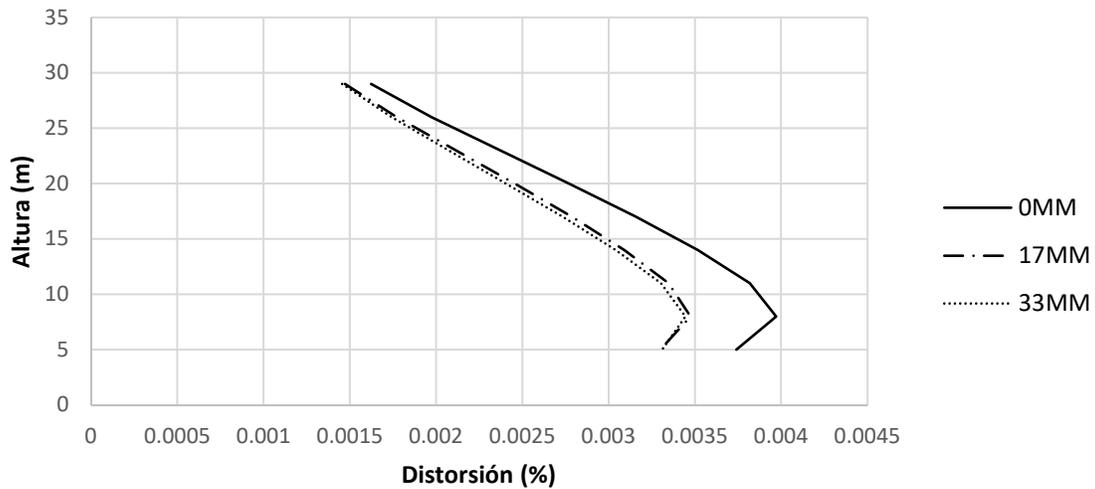
En el eje de las ordenadas se muestran los desplazamientos, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la altura del edificio. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual se somete la estructura. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm. Con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm. Se muestran los desplazamientos en cada dirección de análisis y se observa que existe un incremento en los valores obtenidos de en la dirección X con un 20%, sin embargo, en la dirección

perpendicular, se presenta una reducción en la deformación de la estructura del orden del 28%.

4.3.12 DISTORSIONES



Perfil de distorsiones en X.



Perfil de distorsiones en Y.

Figura 69. Distorsiones obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1.

En la **Figura 69**, se pueden observar que los perfiles de distorsiones para cada dirección de análisis. Estas corresponden a los resultados de las simulaciones para los marcos tridimensionales de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 1. En el eje de las ordenadas se muestran las distorsiones, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la altura del edificio. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los

diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual se somete la estructura. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm. Con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm. Resulta de interés observar que las distorsiones que se presentan en la estructura, aumentan en los primeros niveles de la estructura y en los niveles superiores, las distorsiones son muy similares entre sí. las distorsiones que se presentan en las estructuras sufren un aumento en la dirección X del 20% mientras que en Y se presenta una disminución del 18%.

4.3.13 SOBRECARGA

La sobrecarga se obtuvo de la estructura cuando esta alcanza el desplazamiento máximo en cada dirección de análisis.

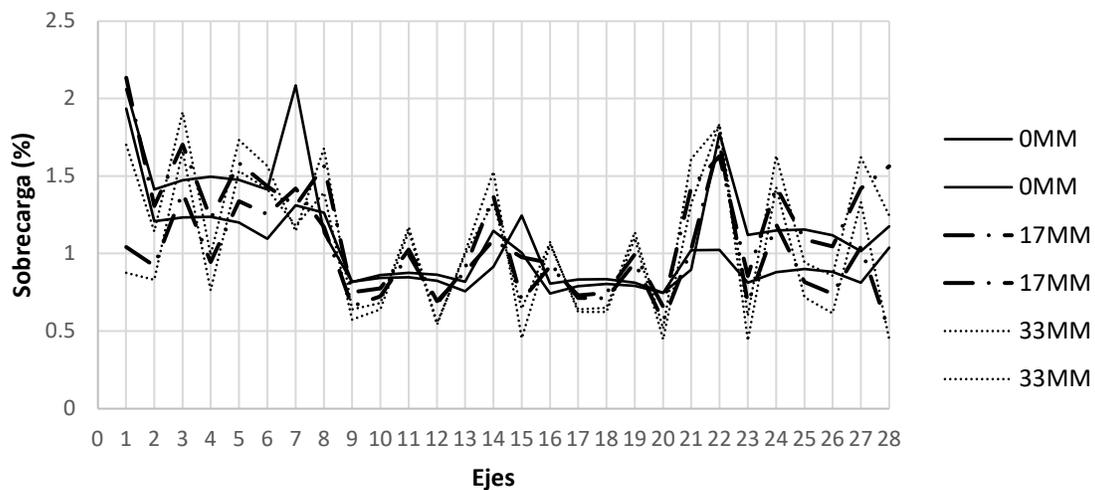
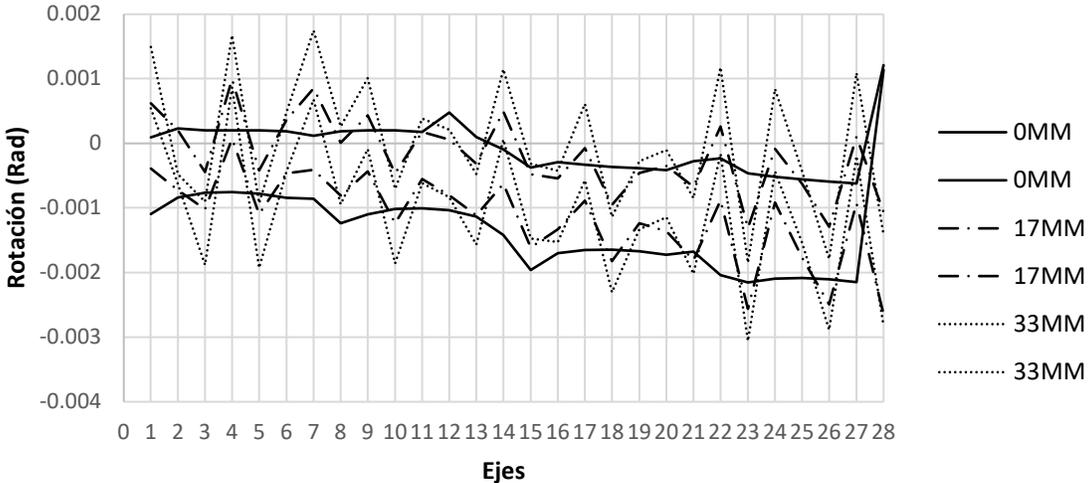


Figura 70. Sobrecargas obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1.

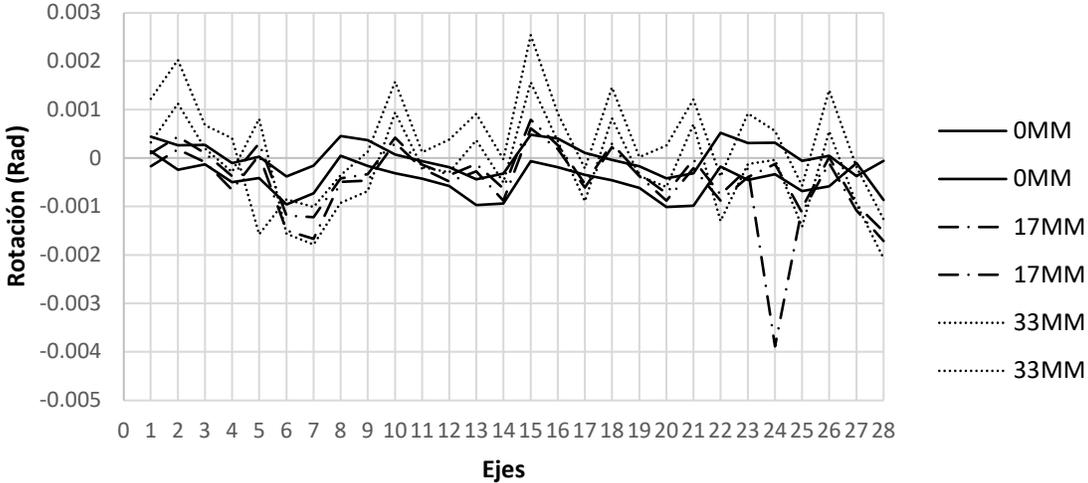
En la **Figura 70**, se muestra la variación de la sobrecarga obtenida de las simulaciones. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura para ambas direcciones del análisis. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm. Las sobrecargas obtenidas por en los análisis dinámicos, son

comparada contra la obtenida en los modelos sin asentamiento, en la figura anterior, se presentan gráficamente los resultados en los cuales se puede observar que la sobrecarga en las columnas puede llegar a alcanzar valores cercanos a 100%.

4.3.14 ROTACIONES



Rotaciones en el aislador en dirección X



Rotaciones en el aislador en dirección Y.

Figura 71. Rotaciones obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1

En la **Figura 71**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador

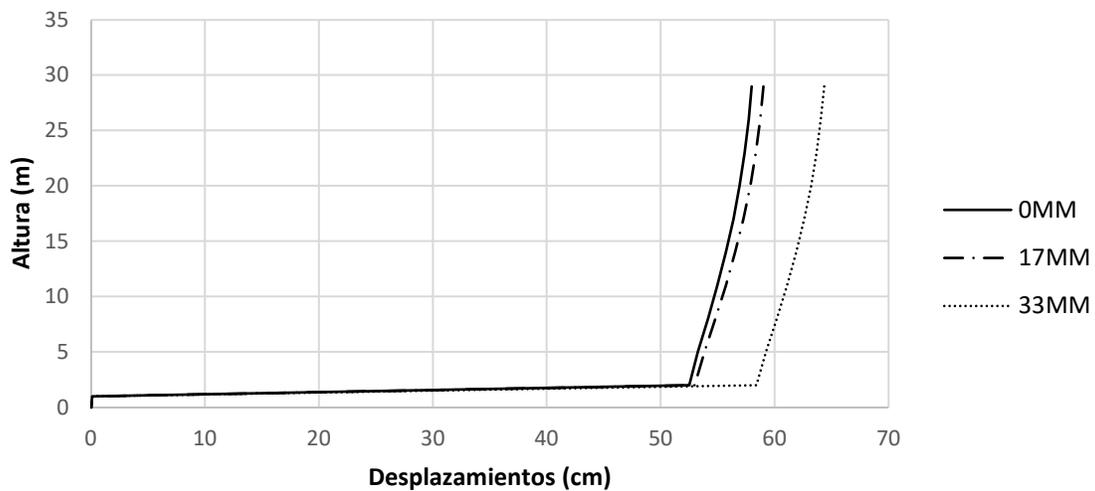
de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm. En la dirección *X*, se puede apreciar que las rotaciones puedan alcanzar valores de 0.001447 rad, mientras que en la dirección *Y*, estas alcanzan valores de 0.002537.

4.3.15 CASO 1. EDIFICIO DE ACERO DE 9 NIVELES CONSIDERADO LAS COMPONENTES SÍSMICAS INVERTIDAS

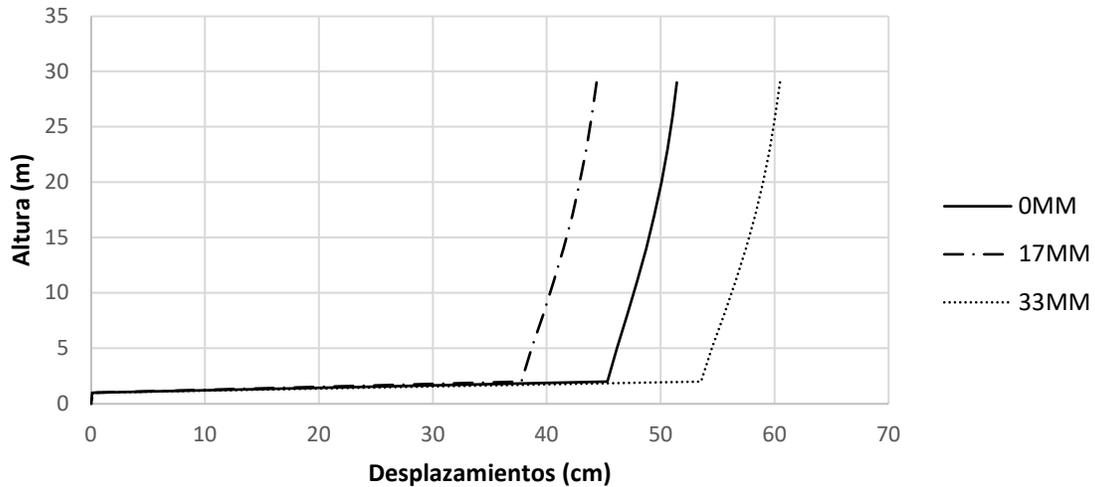
Al igual que en el caso 0, se realiza de forma complementaria la corrida de los modelos anteriores invirtiendo las componentes sísmicas con el fin de observar los resultados.

En la **Figura 72**, se pueden observar que los perfiles de desplazamientos para cada dirección de análisis. Estas corresponden a los resultados de las simulaciones para los marcos tridimensionales de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 1.

4.3.16 DESPLAZAMIENTOS



Perfil de desplazamientos en *X*.

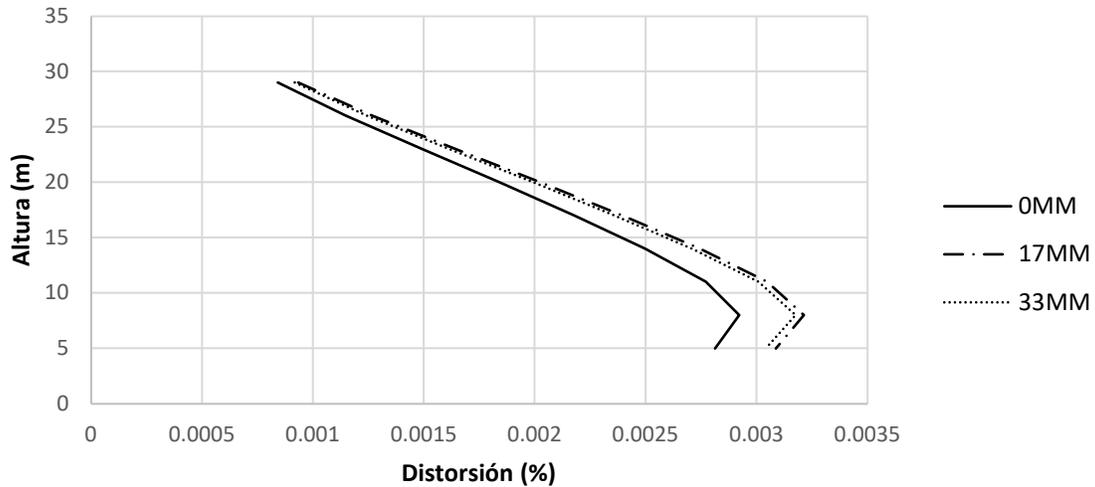


Perfil de desplazamientos en Y.

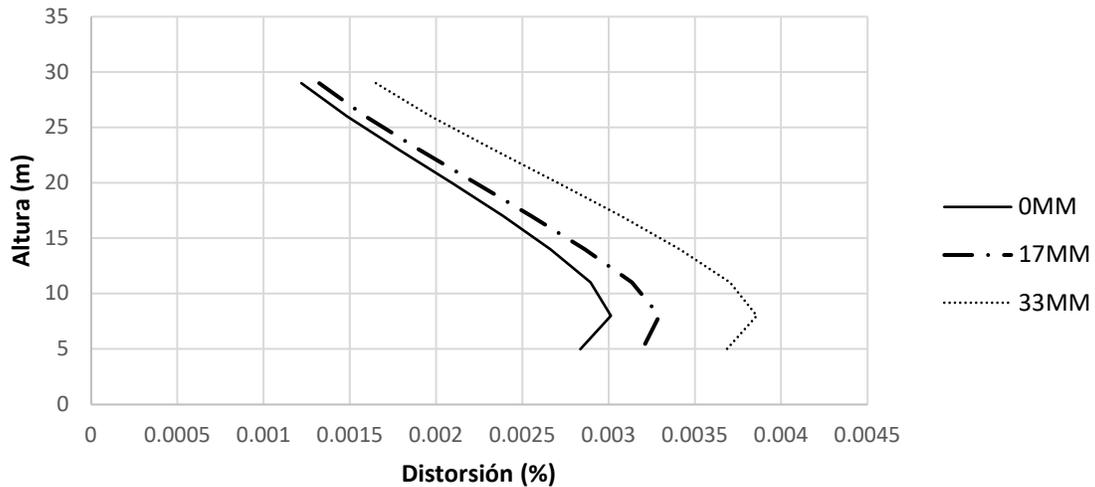
Figura 72. Desplazamientos obtenidos en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1 considerando las componentes sísmicas invertidas.

En el eje de las ordenadas se muestran los desplazamientos, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la altura del edificio. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual se somete la estructura. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm. Con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm. Se puede observar que, al invertir las componentes, los perfiles en ambas direcciones aumentan para los diferentes niveles de asentamiento, siendo del 12 y 36% para la dirección X y Y respectivamente. Además se observa que los desplazamientos para el caso de carga de 17 mm de asentamiento, en todas las corridas permanece cercano, a los resultados obtenidos para 0 mm, o incluso los perfiles pueden ser menores sin embargo obedecen la forma en la que se asienta la estructura.

4.3.17 DISTORSIONES



Perfil de distorsiones en X.



Perfil de distorsiones en Y.

Figura 73. Distorsiones obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1 considerando las componentes sísmicas invertidas.

En la **Figura 73**, se pueden observar que los perfiles de distorsiones para cada dirección de análisis. Estas corresponden a los resultados de las simulaciones para los marcos tridimensionales de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 1 considerando las componentes sísmicas invertidas. En el eje de las ordenadas se muestran las distorsiones, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la altura del edificio. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual se somete la estructura. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm, con línea de trazo y punto para la

condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm., se puede observar que las distorsiones que se presentan en las estructuras sufren un aumento en la dirección *X* y *Y* del 6 y 26% respectivamente. Mientras que las corridas con 17 mm de asentamiento, arrojan perfiles de distorsiones los cuales oscilan entre los resultados de 0 mm y 33 mm.

4.3.18 SOBRECARGA

La sobrecarga se obtuvo de la estructura cuando esta alcanza el desplazamiento máximo en cada dirección de análisis.

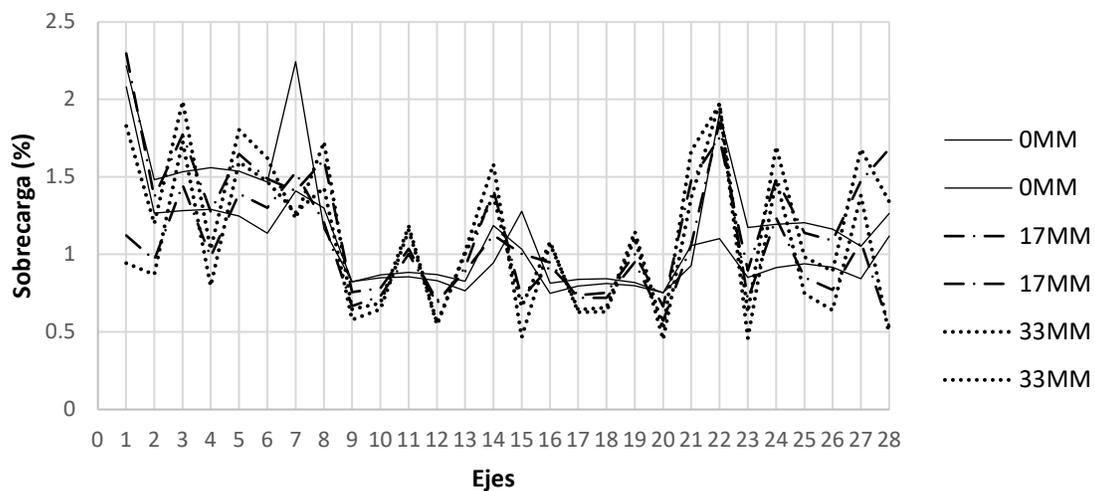


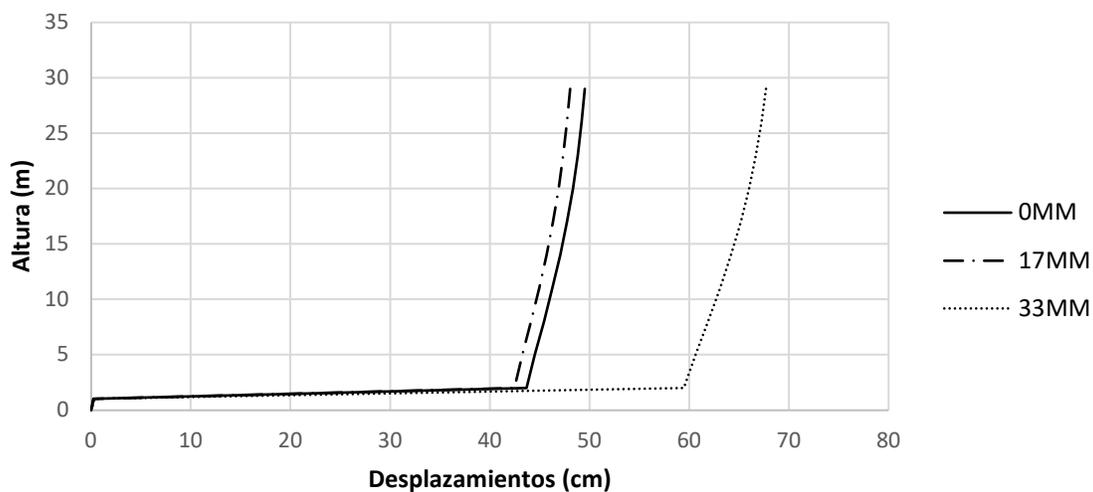
Figura 74. Sobrecargas obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 1 considerando las componentes sísmicas invertidas.

En la **Figura 74**, se muestra la variación de la sobrecarga obtenida de las simulaciones. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura para ambas direcciones del análisis. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm, con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm. La sobrecarga obtenida en el análisis dinámico, es comparada contra las reacciones obtenidas en las corridas anteriores y se puede apreciar que los resultados son muy semejantes a los resultados obtenidos en el análisis sin las componentes invertidas y la sobrecarga que se presenta en las columnas es de 129%.

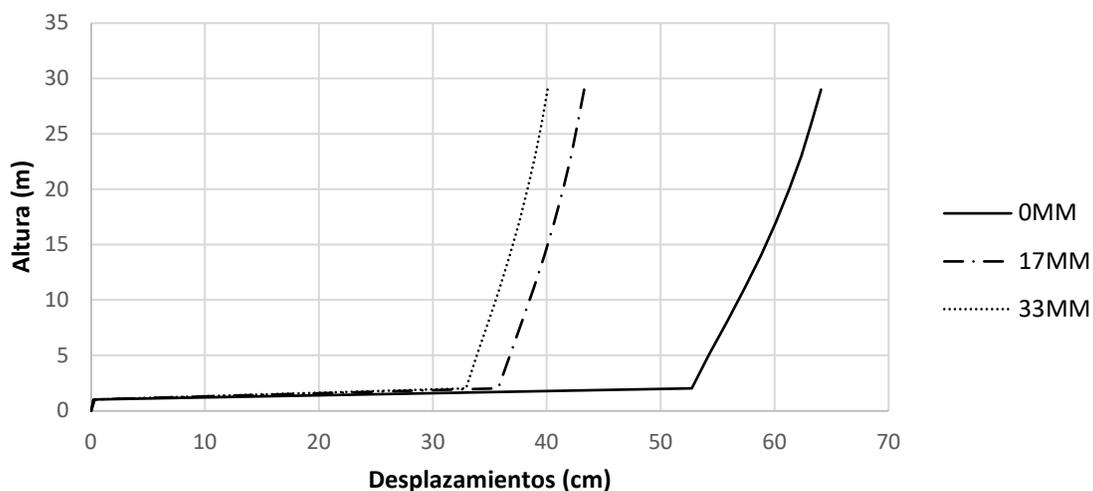
4.3.19 CASO 0. EDIFICIO DE CONCRETO DE 9 NIVELES

4.3.20 DESPLAZAMIENTOS

En la **Figura 75**, se pueden observar que los perfiles de desplazamientos para cada dirección de análisis. Estas corresponden a los resultados de las simulaciones para los marcos tridimensionales de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 0.



Perfil de desplazamientos en X.

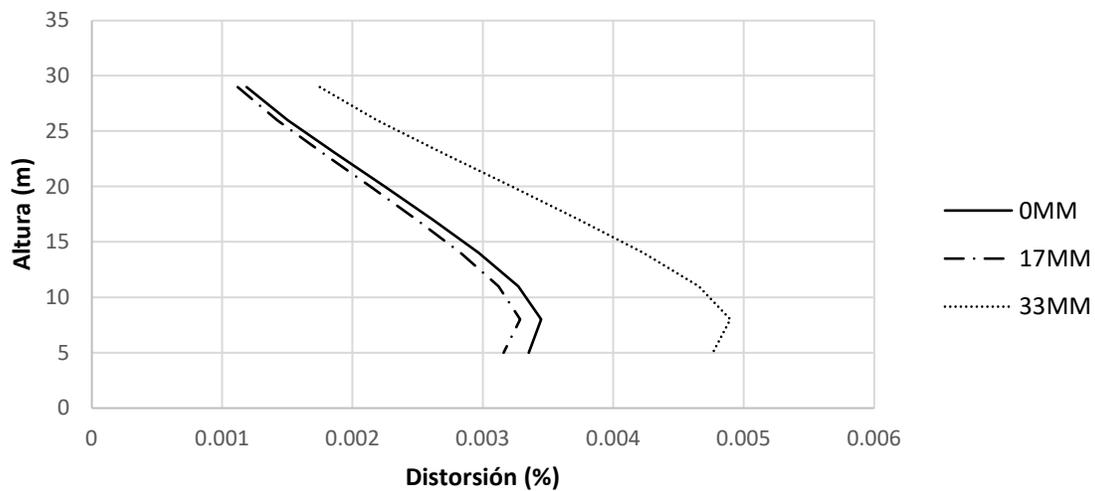


Perfil de desplazamientos en Y.

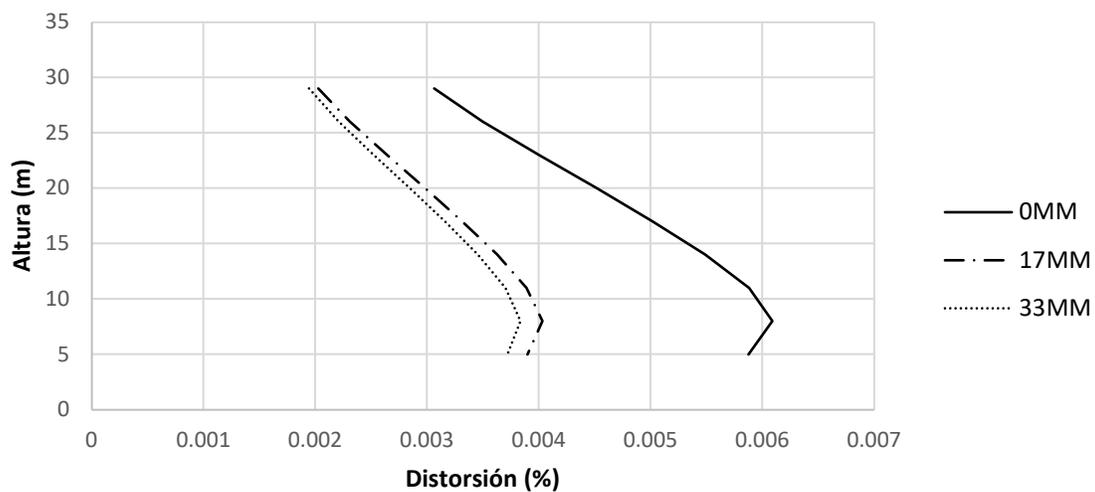
Figura 75. Desplazamientos obtenidos en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 0.

En el eje de las ordenadas se muestran los desplazamientos, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la altura del edificio. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual se somete la estructura. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm. Con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm. De los perfiles de desplazamiento mostrados en la figura y figura, se destaca la amplificación de los desplazamientos en la dirección X con un 40%, sin embargo, en la dirección perpendicular, se presenta una reducción en la deformación de la estructura del orden del 63%.

4.3.21 DISTORSIONES



Perfil de distorsiones en X .



Perfil de distorsiones en Y .

Figura 76. Distorsiones obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de concreto de 9 niveles, Caso 0.

En la **Figura 76**, se pueden observar que los perfiles de distorsiones para cada dirección de análisis. Estas corresponden a los resultados de las simulaciones para los marcos tridimensionales de acero de 9 niveles bajo el caso de estudio 0 considerando las componentes sísmicas invertidas. En el eje de las ordenadas se muestran las distorsiones, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la altura del edificio. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual se somete la estructura. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm. Con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm., De igual forma que en los desplazamientos, se puede observar que las distorsiones que se presentan en las estructuras sufren un aumento en la dirección *X* y *Y* del 50 y 57% respectivamente. Mientras que las corridas con 11 mm de asentamiento, arrojan perfiles de distorsiones los cuales oscilan entre los resultados de 0 mm y 22 mm.

4.3.22 SOBRECARGA

La sobrecarga se obtuvo de la estructura cuando esta alcanza el desplazamiento máximo en cada dirección de análisis.

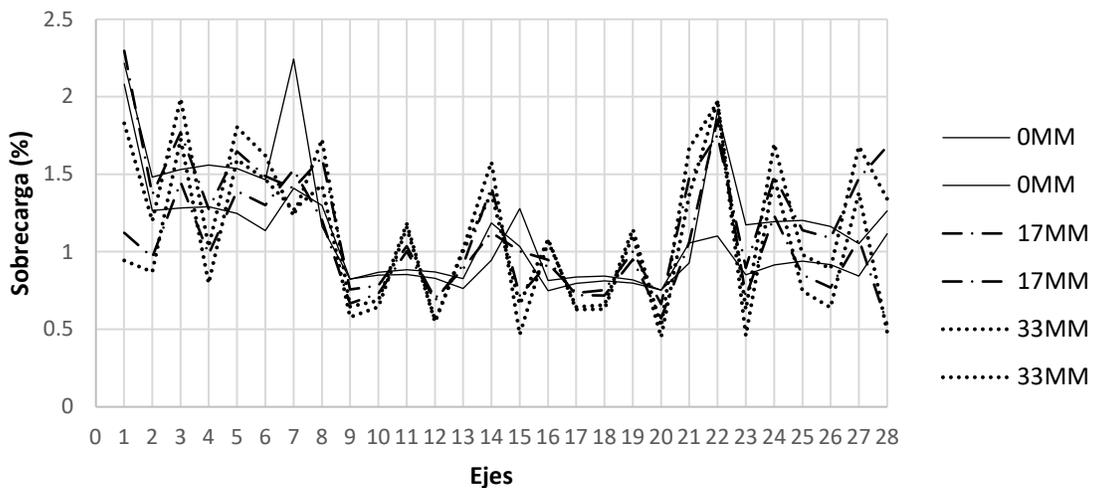
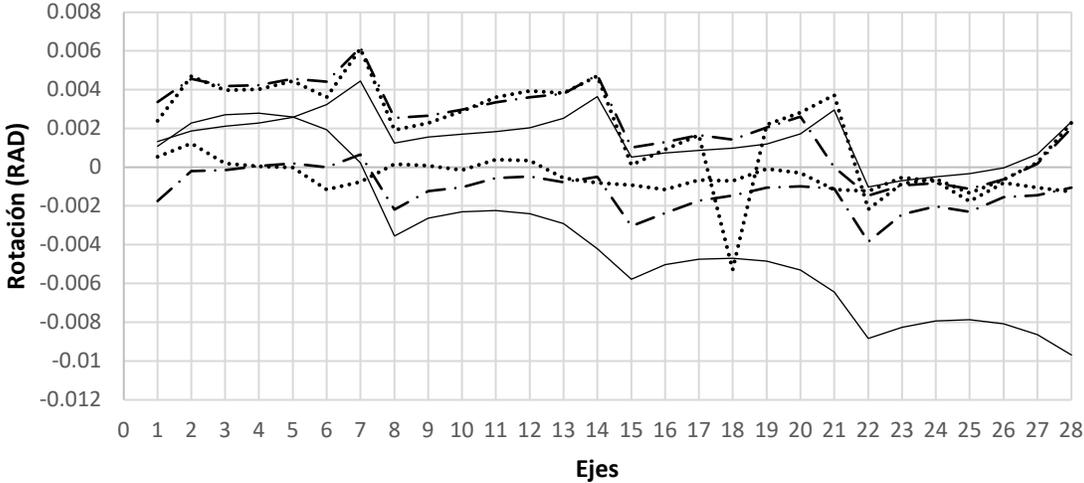


Figura 77. Sobrecargas obtenidas en los análisis dinámicos no lineales para los asentamientos diferenciales evaluados en el edificio de acero de 9 niveles, Caso 0.

En la **Figura 77**, se muestra la variación de la sobrecarga obtenida de las simulaciones. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada

columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la sobrecarga que se presenta en cada columna ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura para ambas direcciones del análisis. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm., con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm., Las sobrecargas obtenidas por en los análisis dinámicos, son comparada contra la obtenida en los modelos sin asentamiento, en la figura anterior, se presentan gráficamente los resultados en los cuales se puede observar que la sobrecarga en las columnas puede llegar a alcanzar valores cercanos a 129%.

4.3.23 ROTACIONES



Rotaciones en el aislador en dirección X

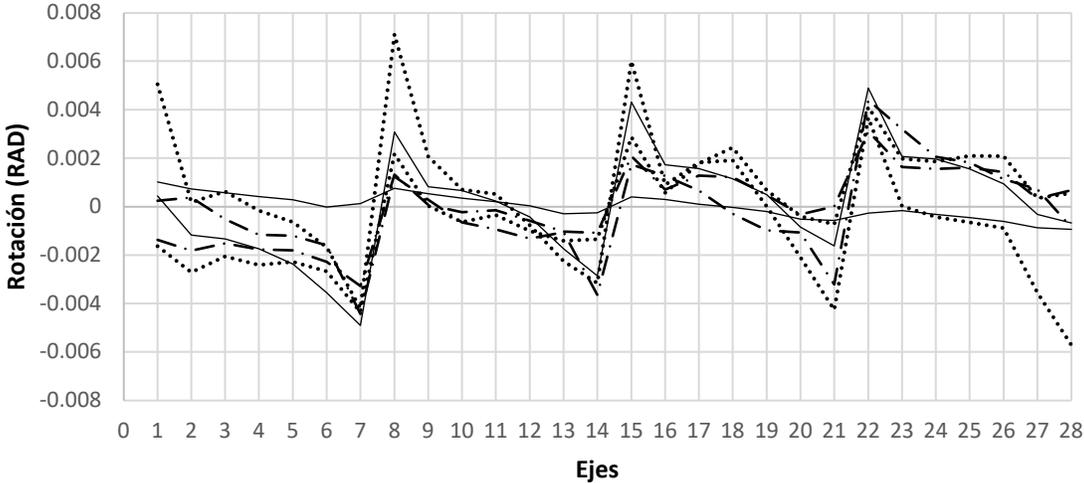


Figura 78. Análisis dinámico no lineal Caso 2 - 9 Niveles 11mm y Caso 2 - 9 Niveles 22mm.

En la **Figura 78**, se muestran los resultados de las simulaciones para los marcos de concreto. En el eje de las ordenadas se muestran los diferentes ejes del marco en el cual se ubica cada columna, mientras que, en el eje de las abscisas, se observa la rotación que se presenta en el aislador de las mismas ocasionada por el hundimiento diferencial. En la figura, se indican tres tipos de líneas diferentes. Estas, obedecen a los diferentes escenarios de hundimiento diferencial al cual, se somete la estructura. Con línea continua gruesa, se presentan los resultados para la condición de asentamiento de 0 mm., con línea de trazo y punto para la condición de 11 mm y finalmente, con línea punteada para un asentamiento de 22 mm. Así mismo, se muestran las rotaciones que se obtuvieron en los aisladores en cada una de las corridas, en estas se presentan gráficamente para cada una de las direcciones del análisis. En la dirección X, se puede apreciar que las rotaciones puedan alcanzar valores de 0.010 rad, mientras que en la dirección Y, estas alcanzan valores de 0.008.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.4.1 RESULTADOS DE SIMULACIONES 2D EN ESTRUCTURAS DE ACERO

4.4.2 CARGA AXIAL

Para los casos 0, 1 y 2 de las estructuras de 3 niveles, considerando un asentamiento diferencial de 48 mm, igual al límite máximo establecido en la norma, la sobrecarga llega a ser hasta del 36% en algunos elementos. Por otra parte, si se considera un 50% más de asentamiento diferencial, con un valor de 72 mm, la sobrecarga en los elementos alcanza valores cercanos a 47%. Finalmente, si se considera un asentamiento diferencial 50% menor al límite de la norma, el cual corresponde a 24 mm, la sobrecarga en las columnas es cercana al 20%.

En las estructuras de 6 niveles, considerando un asentamiento diferencial igual al límite normativo, la sobrecarga llega a ser del 51% en algunos elementos. Para un 50% más de asentamiento diferencial, el cual corresponde a 63 mm, la sobrecarga en los elementos alcanza valores cercanos al 75%. Si se considera un asentamiento diferencial 50% menor al límite normativo, el cual toma un valor de 21 mm, la sobrecarga en las columnas pasa a ser cercana al 25%.

Para las estructuras de 9 niveles, considerando un asentamiento diferencial de 33 mm igual al límite normativo, la sobrecarga llega a ser del 46% en algunos elementos. Por otra parte, si se considera un 50% más de asentamiento diferencial, el cual es de 50 mm, la sobrecarga

en los elementos alcanza valores de hasta el 70%. Si se considera un asentamiento diferencial 50% menor al límite normativo, el cual tiene un valor de 17 mm, la sobrecarga de los elementos es solo del 24%.

Adicionalmente, se puede observar que las estructuras diseñadas por carga gravitacional presentaron mayor capacidad de deformación a comparación a las estructuras diseñadas para resistir fuerzas laterales ya que la sobrecarga en las primeras alcanzó valores de 45% en los casos más desfavorables; mientras que las estructuras diseñadas para resistir cargas laterales se alcanzaron valores de sobrecarga cercanos al 75%.

4.4.3 ROTACIONES

Para las estructuras de 3 niveles, considerando un asentamiento diferencial de 48 mm igual al límite normativo, las rotaciones que se presentaron en los aisladores llegaron a alcanzar valores de 0.004 rad. Mientras tanto, si se considera un 50% más de asentamiento diferencial, correspondiente a un valor de 72 mm, las rotaciones en los aisladores resultaron cercanas a 0.006 rad. Finalmente, si se considera un 50% menos del asentamiento diferencial, con un valor de 24 mm, las rotaciones fueron inferiores a 0.003 rad.

En las estructuras de 6 niveles, considerando el asentamiento normativo, las rotaciones que se presentan en los aisladores llegan a alcanzar valores de 0.0057 rad. Para un 50% mayor al límite normativo, el cual es de 63 mm, las rotaciones son del orden de 0.008 rad. Si se considera un 50% menor al límite de la norma, el cual tiene un valor de 21mm, las rotaciones son inferiores a 0.0048 rad.

Para las estructuras de 9 niveles, considerando un asentamiento diferencial de 33 mm conforme a lo establecido en la norma, las rotaciones que se presentan en los aisladores llegan a alcanzar valores de 0.0025 rad. Si se considera un asentamiento 50% mayor al límite normativos, el cual corresponde a un valor de 50 mm de asentamiento, las rotaciones son cercanas al 0.009 rad. Si se considera un 50% menor a lo indicado en la normativa, el cual corresponde a un valor de 17 mm de asentamiento, las rotaciones son de 0.0023 rad.

Adicionalmente, se observó que en las estructuras diseñadas por carga gravitacional se presentan mayores rotaciones en los aisladores a comparación de las que están diseñadas para resistir fuerzas laterales ya que al comparar los resultados de los modelos, en todos los casos las rotaciones son superiores.

4.4.4 RESULTADOS DE SIMULACIONES 2D EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO

4.4.5 CARGA AXIAL

Para los casos 0, 1 y 2 de las estructuras de 3 niveles. Considerando un asentamiento diferencial de 32 mm igual al límite máximo a lo establecido en la norma, la sobrecarga es del 62% en algunos elementos. Si se considera un asentamiento 50% mayor al límite normativo, con un valor de 48 mm, la sobrecarga en los elementos alcanza valores cercanos al 80%. Si se considera un asentamiento 50% menor a lo indicado en la norma, el cual corresponde a 16 mm, la sobrecarga en las columnas es cercana al 32%.

En estructuras de 6 niveles, considerando un asentamiento diferencial de 28 mm conforme a lo establecido en la norma, la sobrecarga es de 50% en algunos elementos. Si se considera un asentamiento 50% mayor a lo indicado en la normativa, el cual corresponde a 42 mm, la sobrecarga en los elementos alcanza valores cercanos al 72%. Si se considera un asentamiento diferencial 50% menor al indicado en la norma, el cual toma un valor de 14 mm, la sobrecarga en algunos elementos pasa a ser cercana al 27%.

Para las estructuras de 9 niveles, considerando el asentamiento establecido en la norma el cual es de 22 mm, la sobrecarga llega a ser del 58% en algunos elementos. Si se considera un asentamiento 50% mayor al establecido en la norma, el cual es de 33 mm, la sobrecarga en los elementos alcanza valores cercanos al 81%. Si se considera un asentamiento 50% menor al indicado en las normas, el cual tiene un valor de 11mm, la sobrecarga de los elementos llega hasta el 32%.

Además, se puede observar que las estructuras diseñadas por carga gravitacional, presentan mayor capacidad de deformación a comparación de las estructuras diseñadas para resistir fuerzas laterales ya que la sobre carga en las estructuras diseñadas por carga gravitacional alcanza valores del 21% en los casos más desfavorables mientras que las estructuras diseñadas para resistir cargas laterales alcanzan valores cercanos al 81%.

4.4.6 ROTACIONES

Para estructuras de 3 niveles, considerando un asentamiento diferencial de 32 mm conforme a lo establecido en la norma, las rotaciones que se presentan en los aisladores llegan a alcanzar valores de 0.0088 rad, Si se considera un asentamiento 50% mayor al indicado en la normativa, el cual corresponde a un valor de 48 mm, las rotaciones en los aisladores son cercanas al 0.013 rad. Si se considera un asentamiento 50% menos al indicado en la norma, con un valor de 16 mm, las rotaciones son inferiores a 0.0075 rad.

En estructuras de 6 niveles, considerando un asentamiento diferencial de 28 mm conforme a lo establecido en la normativa, las rotaciones en los aisladores llegan a alcanzar valores de

0.0086 rad. Si se considera un asentamiento 50% mayor, el cual es de 42 mm, las rotaciones en los aisladores son mayores a 0.0048 rad. Si se considera un 50% menor al límite normativo, el cual tiene un valor de 14 mm, las rotaciones son inferiores a 0.0037 rad.

Para las estructuras de 9 niveles, considerando un asentamiento diferencial de 22 mm conforme a lo establecido en la norma, las rotaciones que se presentan en los aisladores llegan a alcanzar valores de 0.0027 rad. Si se considera un 50% mayor al límite normativo, el cual corresponde a un valor de 33 mm de asentamiento, las rotaciones en los aisladores son cercanas al 0.0027 rad. Si se considera un 50% menor al límite de la norma, el cual corresponde a un valor de 11 mm de asentamiento, las rotaciones son inferiores a 0.0024 rad.

Además, se observó que en las estructuras diseñadas por carga gravitacional presentan mayores rotaciones en los aisladores a comparación de las que las diseñadas para resistir fuerzas laterales ya que al comparar los resultados de los modelos, en todos los casos las rotaciones son superiores.

4.4.7 RESULTADOS DE SIMULACIONES 3D EN EDIFICIO DE ACERO

4.4.8 CARGA AXIAL

Para el caso 0, considerando un asentamiento diferencial de 33 mm igual al límite normativo, la sobrecarga llega a ser del 171% en algunos elementos, por otra parte, si se considera un asentamiento diferencial 50% menor al indicado en las normas, con un valor de 17 mm, la sobrecarga de los elementos baja hasta el 88%.

En el caso 1, considerando un asentamiento diferencial de 33 mm igual al límite normativo, la sobrecarga llega a ser del 257% en algunos elementos. Por otra parte, si se considera un asentamiento diferencial 50% menor, con un valor de 17 mm, la sobrecarga de los elementos llega a 133%.

Para el caso 2, considerando un asentamiento diferencial de 33 mm igual al límite normativo, la sobrecarga llega a ser del 198% en algunos elementos. Por otra parte, si se considera un asentamiento diferencial de sólo el 50%, el cual tiene un valor de 17 mm, la sobrecarga de los elementos baja a 104%.

Además, se puede observar que las estructuras diseñadas por carga gravitacional presentan mayor capacidad de deformación a comparación de las estructuras diseñadas para resistir fuerzas laterales. La sobrecarga en las primeras alcanzó valores del 198% en los casos más

desfavorables mientras que las estructuras diseñadas para resistir cargas laterales alcanzaron valores cercanos al 257%.

4.4.9 ROTACIONES

Para el caso 1, considerando un asentamiento de 33 mm conforme a lo establecido en la normativa, la rotación que se presenta en los aisladores de 0.002400%, por otra parte, si se considera un asentamiento 50% menor al límite normativo, el cual tiene un valor de 17 mm, la rotación en los aisladores toma valores máximos de 0.001200 rad.

En el caso 2, considerando un asentamiento de 33 mm igual al límite normativo, la rotación que se presenta en los aisladores de 0.002750%, por otra parte, si se considera un asentamiento de solo el 50%, el cual tiene un valor de 17 mm, la rotación en los aisladores toma valores máximos de 0.001600 rad.

Además, se observó que en las estructuras diseñadas por carga gravitacional presentan mayores rotaciones en los aisladores a comparación de las que las diseñadas para resistir fuerzas laterales ya que al comparar los resultados de los modelos, en todos los casos las rotaciones son superiores.

4.4.10 RESULTADOS DE SIMULACIONES 3D EN EDIFICIO DE CONCRETO

4.4.11 CARGA AXIAL

Para el caso 0, considerando un asentamiento de 22 mm conforme al límite normativo, la sobrecarga llega a ser del 131% en algunos elementos, por otra parte, si se considera un asentamiento 50% menor al lo establecido en la norma, el cual tiene un valor de 11 mm, la sobrecarga de los elementos llega hasta el 68%.

En el caso 1, considerando un asentamiento de 22 mm conforme a lo establecido en la norma, la sobrecarga llega a ser del 140% en algunos elementos, por otra parte, si se considera un asentamiento de solo el 50%, el cual tiene un valor de 11 mm, la sobrecarga de los elementos llega hasta el 72%.

Para el caso 2, considerando un asentamiento de 22 mm conforme a lo establecido en la normativa, la sobrecarga llega a ser del 140% en algunos elementos. Si se considera un asentamiento 50% menor al límite normativo, el cual tiene un valor de 11 mm, la sobrecarga de los elementos llega hasta el 73%.

Además, se puede observar que las estructuras diseñadas por carga gravitacional, presentan los mismos resultados que las estructuras diseñadas para resistir fuerzas laterales, esto se puede atribuir a la rigidez que presentan las estructuras de concreto.

4.4.12 ROTACIONES

Para el caso 1, bajo un asentamiento de 22 mm conforme a lo establecido en la normativa, la rotación que se presenta en los aisladores de 0.001400 rad, Si se considera un asentamiento 50% menor al límite normativo, el cual tiene un valor de 11 mm, la rotación en los aisladores toma valores máximos de 0.000800 rad.

En el caso 2, considerando un asentamiento diferencial de 22 mm conforme a lo establecido en la norma, la rotación que se presenta en los aisladores de 0.001400 rad, por otra parte, si se considera un asentamiento de solo el 50% al indicado en la normativa, el cual tiene un valor de 11 mm, la rotación en los aisladores toma valores máximos de 0.000800 rad.

Además, se observó que en las estructuras diseñadas por carga gravitacional presentan mayores rotaciones en los aisladores a comparación de las que las diseñadas para resistir fuerzas laterales ya que al comparar los resultados de los modelos, en todos los casos las rotaciones son superiores.

4.4.13 RESULTADOS DE SIMULACIONES DINÁMICAS NO LINEALES

4.4.14 DESPLAZAMIENTOS

Al comparar la respuesta obtenida de los marcos antes y después del asentamiento, bajo el caso 0, Se observa que los perfiles de desplazamientos obtenidos son iguales bajo todos los escenarios de asentamiento obteniéndose un desplazamiento en la dirección X de 19.80 cm, mientras que para la dirección Y es de 27.80 cm. esto se debe a que la estructura incursiona únicamente en el rango elástico por lo que no hay una modificación en el perfil de desplazamientos caso contrario a la simulación amplificada ya que se aprecia que existe un incremento en los valores obtenidos de un 20 % en la dirección X y del 18% en la dirección Y del análisis.

Adicionalmente, comparando la respuesta obtenida en el caso 1, los desplazamientos en cada dirección de análisis presentan incremento en los valores obtenidos de en la dirección X con un 20%, sin embargo, en la dirección perpendicular, se presenta una reducción en la deformación de la estructura del orden del 28%. Además, en el caso con las componentes invertidas, los perfiles en ambas direcciones aumentan para los diferentes niveles de asentamiento, siendo del 12 y 36% para la dirección X y Y respectivamente.

4.4.15 SOBRECARGA

Las sobrecargas obtenidas por en los análisis dinámicos, son comparada contra la obtenida en los modelos sin asentamiento, se puede observar que la axialización en las columnas puede llegar a alcanzar valores picos cercanos a 300 % de sobrecarga, por otra parte, cuando se realizan diseño por carga gravitacional, la estructura presenta mayor flexibilidad lo cual permite una mejor redistribución de la carga en todos los elementos.

4.4.16 ROTACIONES

Se observa que la rotación que se presenta en el aislador en la dirección X , pueda alcanzar valores de 0.010 rad, mientras que en la dirección Y , estas alcanzan valores de 0.008. Estos valores se presentan en los aisladores perimetrales en función de la forma en la que el edificio se asienta.

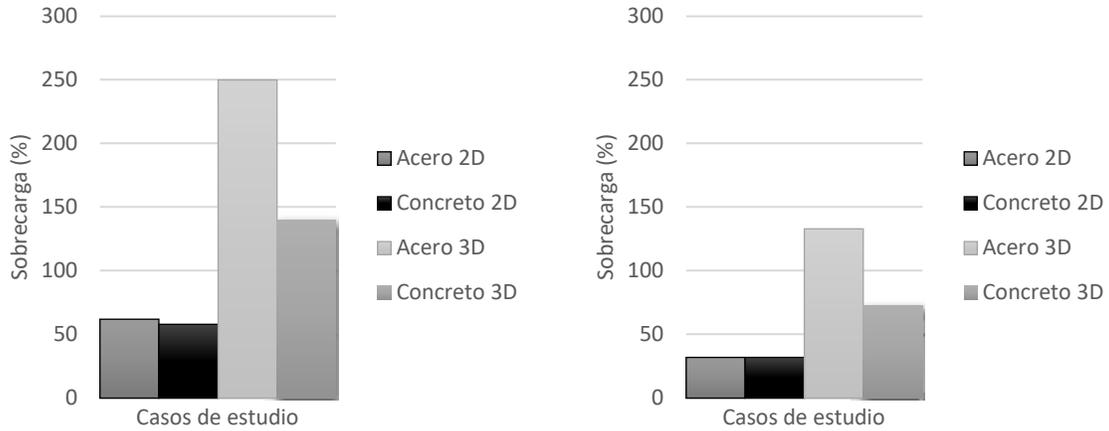
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

En este proyecto de investigación se evaluó la importancia de los asentamientos diferenciales en estructuras equipadas con aisladores sísmicos del tipo deslizante. Los asentamientos evaluados fueron aquellos límites establecidos en NTC-CADE (2017) de la Ciudad de México, para marcos de acero y marcos de concreto. Los resultados muestran que es recomendable realizar una disminución de, al menos, 50% del límite de asentamientos permitidos en las normas. Esto porque, al evaluar la sobrecarga en los apoyos de las estructuras en 2D, si se utilizan los límites consideraciones en las normas, la sobrecarga en puede alcanzar valores hasta del 62% superiores a sus contrapartes sin asentamientos diferenciales. Por otro lado, al considerar asentamientos diferenciales de la mitad de los valores límite, establecidos en las normas, la sobre carga se redujo a 32%, en los casos más desfavorables. Para el caso de las estructuras en 3D, si se considera un hundimiento diferencial igual al límite normativo, la sobre carga de las columnas es cercana al 250 y 140% para los marcos de acero y de concreto, respectivamente. Mientras que, si se utiliza un asentamiento 50% menor al indicado en la norma, sobrecarga alcanza valores de 133 y 73% para los marcos de acero y concreto, respectivamente. Estos resultados se pueden ver de manera gráfica en la Figura 79.

Por otro lado, evaluando la respuesta de las estructuras convencionales (ver Figura 80). Para los marcos planos, de acero y concreto, los resultados obtenidos muestran sobrecargas en los apoyos con valores de 47 y 57%, respectivamente. En los marcos tridimensionales, éstos valores llegan a ser 87 y 131%, respectivamente. Si se reducen los asentamientos al 50% del límite normativo, los valores de sobrecarga disminuyen a 23 y 30% para los marcos planos, y a 45 y 68% para las estructuras en 3D.

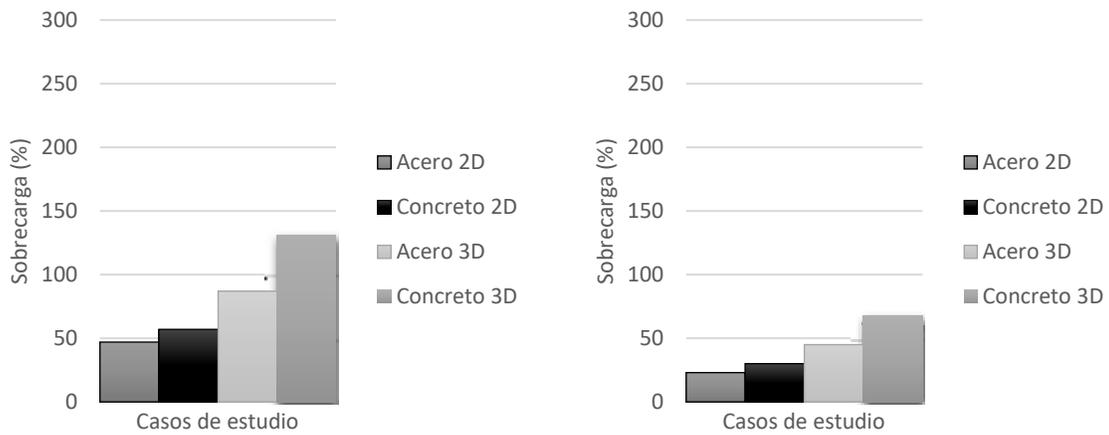
Al analizar la respuesta obtenida de los casos con y sin aisladores, o sea comparando las figuras 79 y 80, se puede ver que las estructuras equipadas con aislamiento sísmico presentan valores de sobrecarga mayores. Esto se debe a que algunos apoyos aislados no son capaces de transmitir tensiones al presentarse asentamientos diferencias, por lo que existe una redistribución más crítica de sobrecarga en otros apoyos



a) Con asentamiento normativo.

b) Con la mitad del asentamiento normativo.

Figura 79. Resultados de estructuras con aislamiento sísmico.



a) Con asentamiento normativo.

b) Con la mitad del asentamiento normativo.

Figura 80. Resultados de estructuras sin aislamiento sísmico.

Por otro lado, al comparar la respuesta de las estructuras aisladas, se observó que los asentamientos diferenciales pueden llegar a modificar la respuesta dinámica. Esto se concluye porque se apreció amplificación en las historias de desplazamiento en algunas de las direcciones horizontales del movimiento con disminución en la dirección perpendicular.

De las rotaciones obtenidas en las diferentes simulaciones, se observó que éstas no modifican la respuesta de la estructura y, a pesar de los diferentes niveles de asentamiento, las rotaciones se mantienen relativamente en los mismos intervalos. Sin embargo, es importante evaluarlas, ya que pueden ocasionar daños locales en las placas cóncavas de los aisladores, pues el área de contacto disminuye.

Por otra parte, es importante mencionar que las estructuras diseñadas únicamente por carga gravitacional presentaron mayor flexibilidad, por lo que los asentamientos diferenciales aplicados generaron sobrecargas menores que aquellas estructuras más rígidas. Se recomienda estudiar esos efectos con mayor detalle en el futuro, con la finalidad de ofrecer recomendaciones de diseño.

También se observó que los asentamientos pueden llegar a generar colapsos parciales en las estructuras, por lo que es importante su revisión en el proceso de diseño de estructuras aisladas.

5.2 RECOMENDACIONES

El presente estudio se limitó a la evaluación de los asentamientos diferenciales. Sin embargo, se recomienda ampliar este estudio, para considerar efectos adicionales como la interacción suelo-estructura.

Además, es necesario considerar la componente vertical del movimiento sísmico ya que podrían incrementar las demandas de carga vertical en los apoyos de forma considerable.

Finalmente, es importante ampliar el estudio para evaluar más variables, como diferente número de niveles, sitios, suelos, sistemas estructurales, entre otros.

REFERENCIAS

- Aguilar J. (2020). Comportamiento sísmico de edificios con aisladores de péndulo de fricción en la zona del lago de la Ciudad de México (tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, CDMX.
- ASCE 7-17 (2017). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. Reston, Virginia: American society of Civil Engineers.
- ASCE/SEI 7 (2017), "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures." American Society of Civil Engineers: VA, EUA.
- Avilés J. y Pérez L. (2004). Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 71, 1 - 36.
- Avilés J., Aguilar H. y Pérez L. (1995). Interacción dinámica suelo-estructura en el Valle de México. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 50, 31 - 45.
- Comisión Federal de Electricidad. (2019). Diseño de estructuras con aislamiento de base. Manual de diseño de obras civiles, c.3.2., 1 - 157.
- ETABS (2020), Programa de análisis estructural de edificios, Computers and Structures, Inc.
- Eurocode 8 (2004) Design of Structures for Earthquake Resistance Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. European Commission for Standardization.
- Eurocode 8 (2004), Seismic Design of Buildings Worked Examples. Lisbon, 10-11 feb. 2011: European Commission.
- Fernández L. y Avilés J. (2008). Efectos de interacción suelo-estructura en edificios con planta baja blanda. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 79, 71 - 90.
- García J. (2012). Evaluación de daño en edificios considerando los efectos de interacción suelo-estructura. (tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, México, D. F.
- González R. y Noguez FJ. (1994). Respuesta teórica de un edificio con aisladores de base. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 46, 23-52.

Guerrero H. Aguilar J. y Sámano O. (2022) Comportamiento Sísmico de Edificios con Aisladores de Péndulo de Fricción en la Zona del Lago de la Ciudad de México, Revista de Ingeniería Sísmica No. 107, 1-21

Martínez L. (2019). Efectos de la interacción suelo estructura estática en los elementos mecánicos de las estructuras (tesis de maestría). Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Meli R. y Hernández O. (1987 - 2004). Efectos de hundimientos diferenciales en construcciones a base de muros de mampostería. Facultad de Ingeniería, 1, 1 – 130.

Minitab (2021) Software de Estadística, Minitab, LLC.

Naranjo F. (2020) Diseños ortogonales de Taguchi fraccionados, Ingeniería Investigación y Tecnología, Volumen XXI (numero 2) abril-junio 2020 1-12.

NTC-DCEA (2017), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero”, Gaceta Oficial de la Ciudad de México, No. 220 Bis., Ciudad de México.

NTC-DS (2017), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo”, Gaceta Oficial de la Ciudad de México, No. 220 Bis., Ciudad de México.

PRISM (2020), Programa de procesamiento de acelerogramas. Department of Architectural Engineering, INAH University.

Reinoso E. (1996), “Algunos resultados recientes sobre el peligro sísmico en la ciudad de México”, Revista de Ingeniería Sísmica, UNAM, Ciudad de México, No. 53, pp 1-24.

Reinoso E. (2007), “Riesgo sísmico de la Ciudad de México”, UNAM, Ciudad de México, pp. 50.

Tena A. (2017). Diseño sísmico simplificado de estructuras con muros de mampostería aisladas sísmicamente. Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, 22, 1-33.

Tena A. (2019). Aislamiento sísmico en México. Normatividad propuesta para suelos firmes y aspectos a considerar en suelos blandos. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, simposio nacional de ingeniería estructural: aislamiento sísmico e interacción suelo–estructura.

Tena A. (2019). Interacción suelo-estructura. Reflexiones sobre su importancia en la respuesta dinámica de estructuras durante sismos. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 24, 141-165.

Tena A. (2020). Aspectos a considerar en el diseño de estructuras con aislamiento sísmico en suelos firmes y blandos. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 25,3, 333-365.

Tena A. (2019). Normatividad Propuesta para Aislamiento Sísmico en México en suelos firmes. Aspectos a considerar en suelos blandos. Casalco, III Congreso Sistemas de Control de Respuesta Sísmica, 1 - 70.

Tena A. y J. L. Escamilla-Cruz (2007), "Torsional amplifications in asymmetric base-isolated structures", *Engineering Structures*, Vol. 29, No. 2, pp. 237-247.